



Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

**Variaciones de las reservas de agua durante
la sequía del año 2009 en la
provincia de Buenos Aires a partir de datos
satelitales de
la misión GRACE**

María Soledad Montenegro

*Director: Dr. Luis Guarracino
Co-directora: Dra. Claudia Tocho*

Diciembre, 2010

Agradecimientos

Se agradece al Dr. Marcelo Verni del Instituto de Hidrología de Llanuras Dr. Eduardo J. Usunoff por brindar y permitir la utilización de los datos del nivel freático de la estación de Azul. Al Departamento de Geofísica Aplicada de la FCAGLP (Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de La Plata), en particular, al Geof. Andrés Cesanelli por proveer los datos del nivel freático de la estación La Plata. A los responsables de la estación meteorológica de la FCAGLP por brindar los datos de precipitación de la estación La Plata.

Soledad Montenegro agradece a sus profesores, miembros de la FCAGLP por la formación recibida; y en especial, a los directores de esta Tesis; Luis Guarracino y Claudia Tocho por su apoyo y disponibilidad para la realización de este trabajo.

Resumen

La sequía agrícola ocurre cuando la cantidad de precipitación, su distribución, las reservas de agua en el suelo y las pérdidas producidas por la evapotranspiración se combinan para causar una disminución considerable de los rendimientos del cultivo y el ganado. Desde el punto de vista hidrogeofísico, la sequía se manifiesta como una disminución de las reservas de agua en la zona afectada por este evento. Durante el año 2009, la provincia de Buenos Aires se vió afectada por una sequía que se estima ha sido el peor evento de este tipo que atravesó el país en más de medio siglo y cuyos efectos climáticos repercutieron en un descenso significativo en los cuerpos de agua superficiales, una disminución de los niveles freáticos en toda la región y significativas pérdidas en la economía de la principal región agrícola-ganadera del país.

El presente trabajo de Tesis analiza la potencialidad de la misión satelital Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) para detectar y estudiar esta impactante sequía. La misión espacial GRACE tiene como principal objetivo la medición de variaciones espacio-temporales del campo de gravedad terrestre, siendo estas variaciones de gravedad originadas principalmente por las variaciones de las reservas de agua. Para estudiar los efectos de la sequía en las reservas de agua subterráneas durante el año 2009 se tomó como referencia el año 2008 que puede considerarse a los fines de este análisis como un año hidrológico normal. Los datos utilizados consisten en alturas de agua equivalente calculados cada 10 días a partir de los datos de la misión GRACE por el Grupo de Investigación de Geodesia Espacial del Centro Nacional de Estudios Espaciales de Francia (CNES/GRGS). Estos datos satelitales que poseen una cobertura regional muy amplia, han sido comparados con datos puntuales de dos estaciones de medición de niveles freáticos ubicadas en las ciudades de Azul y La Plata.

A partir de los datos de alturas de agua equivalente se realizó un seguimiento de la evolución de la sequía en la provincia de Buenos Aires que pudo ser validado por mediciones de los niveles freáticos. A partir de la correlación de los datos satelitales y de campo se calcularon propiedades de la zona de estudio, como la capacidad específica y las variaciones de humedad del suelo en la zona no saturada. El carácter regional del fenómeno de la sequía observado a partir de los datos de GRACE también queda de manifiesto en los descensos de los niveles freáticos observados en las estaciones de Azul y La Plata. Los resultados obtenidos muestran la utilidad de los datos de GRACE para cuantificar las reservas de agua subterráneas y realizar estudios regionales en zonas donde no se cuenta con datos de campo o resultan de difícil acceso.

Índice general

Resumen	I
1. Introducción	1
1.1. Objetivo del trabajo	1
1.2. Impacto de la sequía	2
2. Misión GRACE	8
2.1. Campo de gravedad terrestre y misión GRACE.....	8
2.2. Desarrollo del campo de gravedad terrestre en armónicos esféricos.....	9
2.3. Cálculo de la altura de agua equivalente	11
2.4. Valores de altura de agua equivalente provistos por el CNES/GRGS	15
3. Variaciones de las reservas de agua en el período 2008-2009	17
3.1. Procesamiento de datos	17
3.2. Variaciones de las reservas de agua	18
3.3. Análisis de los resultados	26
4. Comparación de datos satelitales con variaciones de nivel freático	28
4.1. Variaciones relativas de las reservas de agua y nivel freático.....	28
4.2. Interpolación de los datos de GRACE.....	29
4.3. Datos del nivel freático.....	31
4.4. Variaciones relativas de los datos de GRACE y de las mediciones de nivel freático	31
4.4.1. Relación entre los datos de GRACE y el nivel freático para la estación de Azul.....	32
4.4.2. Relación entre los datos de GRACE y el nivel freático para la estación de La Plata	34
5. Conclusiones.....	39
6. Agradecimientos	40
7. Referencias	41

Índice de Figuras

1.1.	(a) Imagen satelital del sur de la provincia de Buenos Aires. Febrero 2008	3
1.1.	(b) Imagen satelital del sur de la provincia de Buenos Aires. Febrero 2009	3
1.2.	Imagen satelital de la provincia de Buenos Aires. Febrero 2008	4
1.3.	Imagen satelital de la provincia de Buenos Aires. Febrero 2009	5
1.4.	Imagen satelital de NDVI en la Región Pampeana, Mesopotamia, Uruguay y sur de Brasil.....	6
3.1	Región delimitada para altura de agua equivalente para la provincia de Buenos Aires y estaciones de medición de niveles freáticos.....	17
3.2.	Esquema de interpolación de los datos de la serie 2008.....	19
3.3.	(a) Altura de agua equivalente para el período $i=9$ del año 2009	19
3.3.	(b) Altura de agua equivalente para el período $i=9$ del año 2008.....	19
3.3.	(c) Variación de la reserva de agua continental	19
3.4.1.	Período $i=1$ (03 al 12 de enero.....)	20
3.4.2.	Período $i=2$ (13 al 22 de enero)	20
3.4.3.	Período $i=3$ (23 de enero al 01 de febrero)	20
3.4.4.	Período $i=4$ (02 al 11 de febrero).....	20
3.4.5.	Período $i=5$ (12 al 21 de febrero).....	20
3.4.6.	Período $i=6$ (22 de febrero al 03 de marzo)	20
3.4.7.	Período $i=7$ (04 al 13de marzo)	21
3.4.8.	Período $i=8$ (14 al 23 de marzo)	21
3.4.9.	Período $i=9$ (24 de marzo al 02 de abril)	21

3.4.10.	Período i=10 (03 al 12 de abril)	21
3.4.11.	Período i=11 (13 al 22 de abril)	21
3.4.12.	Período i=12 (23 de abril al 02 de mayo)	21
3.4.13.	Período i=13 (03 al 12 de mayo)	22
3.4.14.	Período i=14 (13 al 22 de mayo)	22
3.4.15.	Período i=15 (23 de mayo al 01 de junio)	22
3.4.16.	Período i=16 (02 al 11 de junio)	22
3.4.17.	Período i=17 (12 al 21 de junio)	22
3.4.18.	Período i=18 (22 de junio al 01 de julio)	22
3.4.19.	Período i=19 (02 al 11 de julio)	23
3.4.20.	Período i=20 (12 al 21 de julio)	23
3.4.21.	Período i=21 (22 al 31 de julio)	23
3.4.22.	Período i=22 (01 al 10 de agosto)	23
3.4.23.	Período i=23 (11 al 20 de agosto)	23
3.4.24.	Período i=24 (21 al 30 de agosto)	23
3.4.25.	Período i=25 (31 de agosto al 09 de septiembre)	24
3.4.26.	Período i=26 (10 al 19 de septiembre)	24
3.4.27.	Período i=27 (20 al 29 de septiembre)	24
3.4.28.	Período i=28 (30 de septiembre al 09 de octubre)	24
3.4.29.	Período i=29 (10 al 19 de octubre)	24
3.4.30.	Período i=30 (20 al 29 de octubre)	24
3.4.31.	Período i=31 (30 de octubre al 08 de noviembre)	25
3.4.32.	Período i=32 (09 al 18 de noviembre)	25
3.4.33.	Período i=33 (19 al 28 de noviembre)	25
3.4.34.	Período i=34 (29 de noviembre al 08 de diciembre)	25

3.4.34.	Período $i=35$ (09 al 18 de diciembre)	25
3.4.36.	Período $i=36$ (19 al 29 de diciembre)	25
4.1.	Esquema de interpolación para las coordenadas (φ', λ)	30
4.2	Relación lineal entre el nivel freático y la altura de agua equivalente provista por GRACE para la estación de Azul durante el período 2008-2009.....	32
4.3	Variaciones de agua subterránea (NF) y de altura equivalente de agua (H Grace) provista por GRACE para la estación de Azul durante el período 2008-2009.....	33
4.4	Relación lineal entre el nivel freático y la altura equivalente de agua provista por GRACE para la estación de La Plata durante el año 2009	35
4.5	Variaciones de agua subterránea (NF) y de altura equivalente de agua (H Grace) provista por GRACE para la estación de La Plata durante el año 2009.....	36
4.6	Valor medio de la precipitación, variaciones del agua subterránea y de altura de agua equivalente durante los $N=40$ períodos para la estación de La Plata.....	38

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se expondrán los objetivos del trabajo de la presente Tesis de Grado y se exhibirán los acontecimientos que tuvieron lugar a causa de la sequía sufrida en la Provincia de Buenos Aires durante el año 2009, proporcionándose un diagnóstico del impacto que este evento tuvo en la región.

1.1. Objetivo del trabajo

El objetivo del presente trabajo es analizar la potencialidad de la misión satelital Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) para detectar y estudiar la importante sequía que se produjo durante el año 2009 en la llanura pampeana. Esta sequía afectó drásticamente la economía local, siendo ésta la principal región agrícola-ganadera de la Argentina (Borda y Gonzalez Ferrin, 2009). Desde el punto de vista hidrofísico la sequía se manifiesta como una disminución de las reservas de agua en la zona afectada por este evento.

La misión espacial GRACE es un proyecto conjunto de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos (NASA) y el Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) -Centro Aeroespacial Alemán- cuyo principal objetivo es la medición de variaciones espacio-temporales del campo de gravedad terrestre (Wahr et al., 1998). Estas variaciones de gravedad son originadas principalmente por las variaciones de las reservas de agua y han sido utilizadas para realizar numerosos estudios hidrológicos a escala regional (Pérez et al., 2009; Rodell et al., 2007; Rodell et al., 2009; Schmidt et al., 2006; Tocho et al., 2009, Guarracino et al., 2009).

Para comparar y analizar los efectos de la sequía en las reservas de agua durante el año 2009, se ha tomado como referencia el año 2008; ya que éste último puede considerarse como un año hidrológico normal. El presente trabajo se ha realizado en base a datos de altura de agua equivalente calculados cada 10 días para los años 2008 y 2009; provistos por el Centro Nacional de Estudios Espaciales y el Grupo de Investigación de Geodesia Espacial (CNES/GRGS) (Biancale et al., 2010). Estos datos, que poseen una cobertura regional muy amplia, han sido comparados con datos puntuales de dos estaciones de medición de niveles freáticos ubicadas en las ciudades de La Plata y Azul. Como se demostrará, la comparación de los datos satelitales y de campo ha permitido validar la metodología de análisis propuesta y obtener información complementaria sobre el

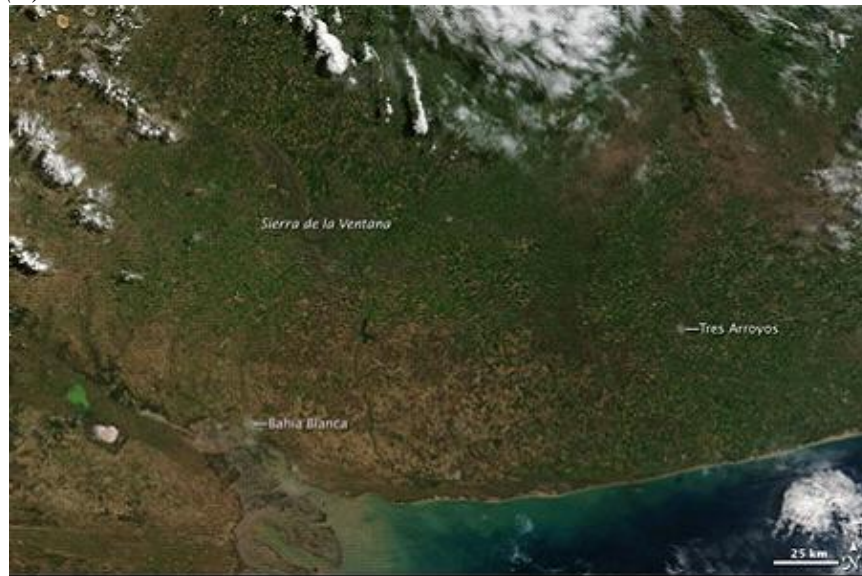
fenómeno estudiado. Asimismo se han utilizado datos de precipitación de la estación de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de La Plata para interpretar los resultados obtenidos.

1.2. Impacto de la sequía

La sequía agrícola, según la Organización Meteorológica Mundial, ocurre cuando la cantidad de precipitación, su distribución, las reservas de agua en el suelo y las pérdidas producidas por la evapotranspiración se combinan para causar una disminución considerable de los rendimientos del cultivo y el ganado. Por lo tanto, la sequía es un fenómeno que está dado por la combinación de condiciones meteorológicas, hidrológicas, agrícolas y también por el efecto de la actividad humana. El análisis de las sequías se realiza generalmente a través de los índices climáticos, que reúnen en una sola variable, los efectos combinados de más de un parámetro. Dentro de este tipo de índice se halla el Índice Normalizado de Densidad de Vegetación (Normalized Density Vegetation Index o NDVI), también conocido sencillamente como *Índice Verde*. Éste es un coeficiente empleado para discriminar masas vegetales, que se determina a partir de mediciones satelitales de la radiación emitida. Se basa en que la firma espectral característica de la vegetación muestra un claro contraste entre las bandas visibles (especialmente la roja) y la infrarroja. Cuanto mayor sea dicho contraste, mayor vigor presentará la cubierta analizada. Los valores de NDVI oscilan entre los extremos 1 (vegetación muy densa) y -1 (ausencia total de vegetación, estos valores se registran en los cuerpos de agua). Se puede dividir en cuatro categorías: *Alto* (mayor a 0.6); *Medio* (entre 0.4 y 0.6); *Medio/Bajo* (entre 0.2 y 0.4) y *Bajo* (menor a 0.2).

Este índice es un indicador de comprobada eficacia para realzar la señal de la vegetación frente a otras cubiertas de la superficie terrestre. En la Figura 1.1 se ilustra de forma impactante los efectos de la sequía más importante que ha sufrido en los últimos tiempos la principal región agrícola de la Argentina. Éstas son imágenes pertenecientes al sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) a bordo del satélite Terra de la NASA.

(a)



(b)

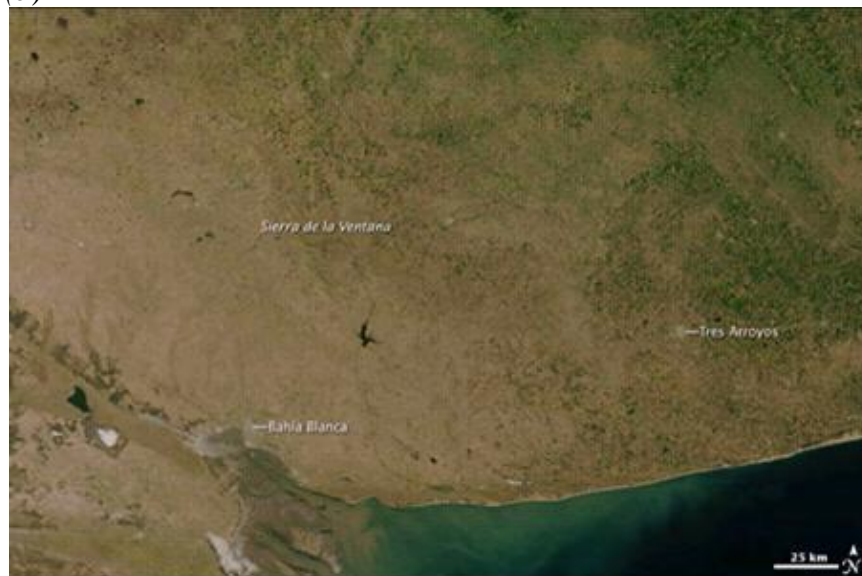


Figura 1.1 (a) Imagen satelital del sur de la provincia de Buenos Aires. Febrero 2008. (b) Imagen satelital del sur de la provincia de Buenos Aires. Febrero 2009.

El satélite Terra de la NASA captó estas dos imágenes del sur de la provincia de Buenos Aires con un año de diferencia. La comparación entre febrero de 2008 y el mismo mes de 2009 refleja dramáticamente los cambios en el terreno y los cultivos debido a la crítica escasez de lluvias.

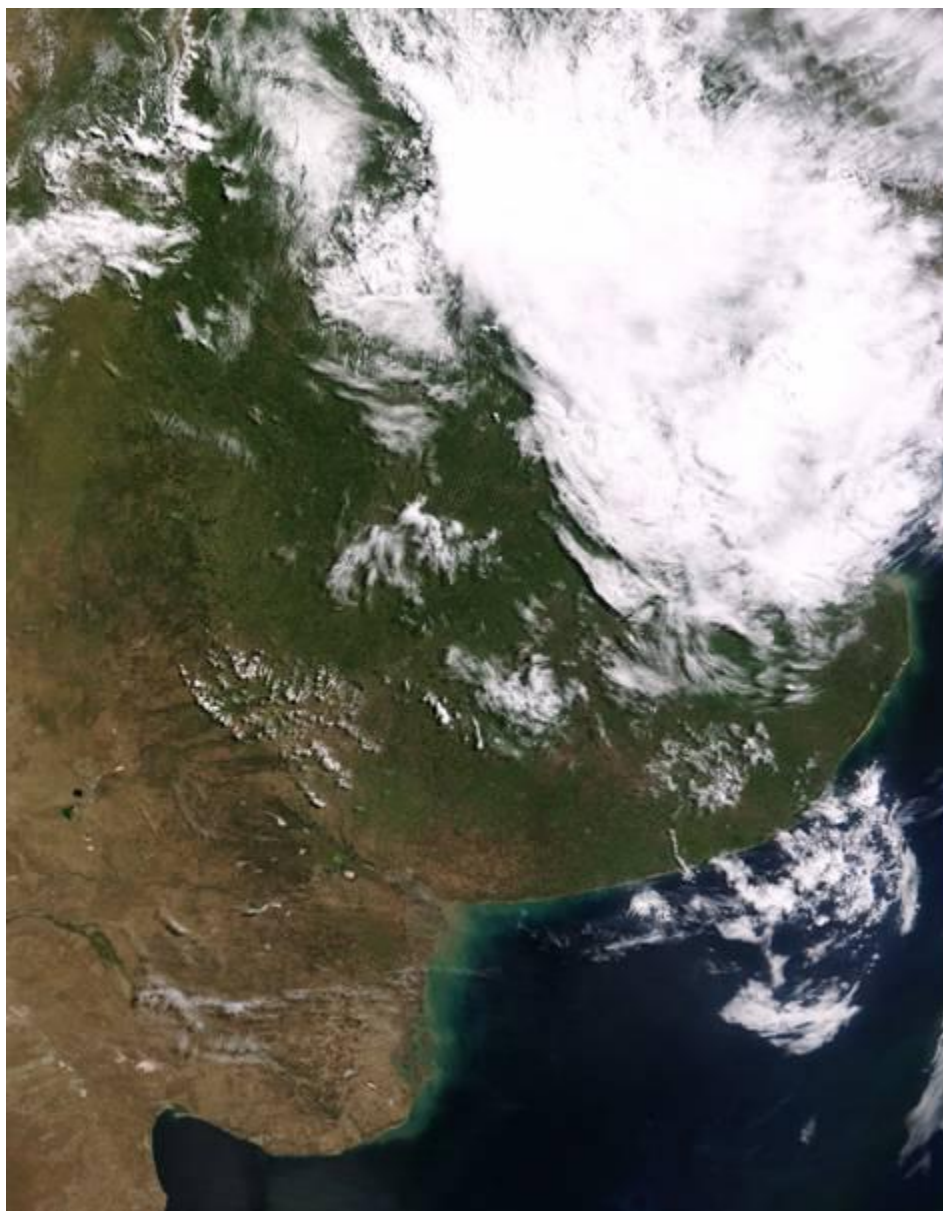


Figura 1.2. Imagen satelital de la provincia de Buenos Aires. Febrero 2008.

La imagen satelital de la Figura 1.2, tomada el 22 de febrero de 2008, un mes relativamente normal, nos muestra al sector sur de la provincia de Buenos Aires cubierto de brillantes tonos verdes, lo que indica el saludable crecimiento de los cultivos de ese año. Por el contrario, la imagen satelital de la Figura 1.3, correspondiente al 23 de febrero de 2009, presenta un panorama desolador, con mosaicos de color verde pálido y marrón, que delatan la crítica situación que atravesó el sector agrícola a principio del 2009. Se

estimó que debido a la sequía, la cosecha del año 2009 fue de un 30 a un 60 por ciento menor que la del año anterior, según el tipo de cultivo.

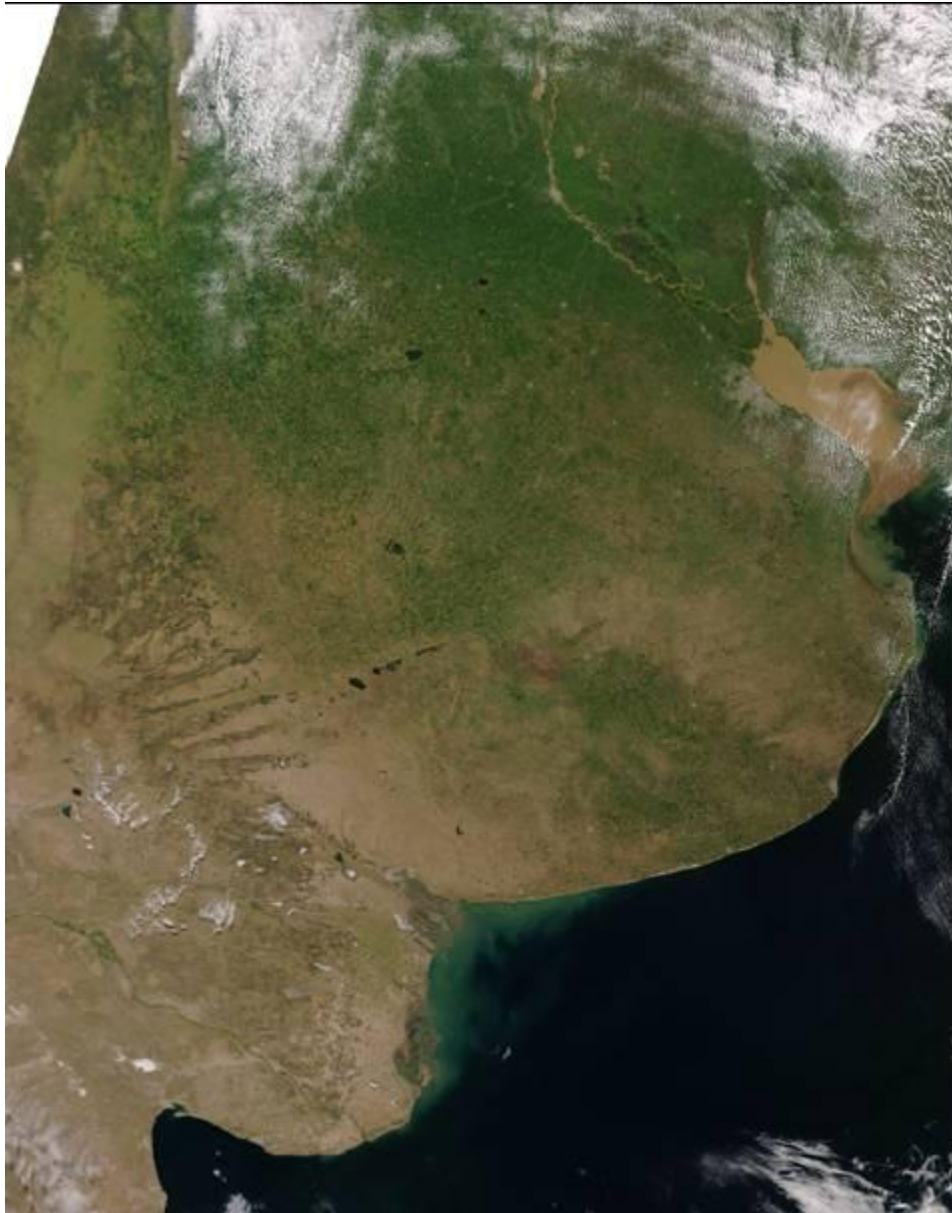


Figura 1.3. Imagen satelital de la provincia de Buenos Aires. Febrero 2009.

Por otra parte, la imagen de la Figura 1.4 nos muestra la magnitud del problema de la sequía, a una escala espacial mucho más amplia. En base a las observaciones del sensor MODIS del satélite Terra de la NASA, se ha comparado el índice de vegetación NDVI

desde el 17 de enero al 1 de febrero de 2009, con respecto al índice de vegetación promedio registrado entre los años 2000 al 2008 (Marini, 2009a). Los tonos marrones indican que el índice verde se encuentra por debajo del promedio, lo que significa que se ha detectado un menor grado de fotosíntesis en esos lugares; las tonalidades de color crema representan a las condiciones que se mantienen de acuerdo al promedio, en tanto que los escasos puntos de color verde muestran un desarrollo superior al índice de vegetación típico de los últimos años.

Como resultado, se observa que toda la región pampeana, la Mesopotamia, Uruguay y el sur de Brasil han resultado seriamente perjudicados por la extrema sequía durante el año 2009.

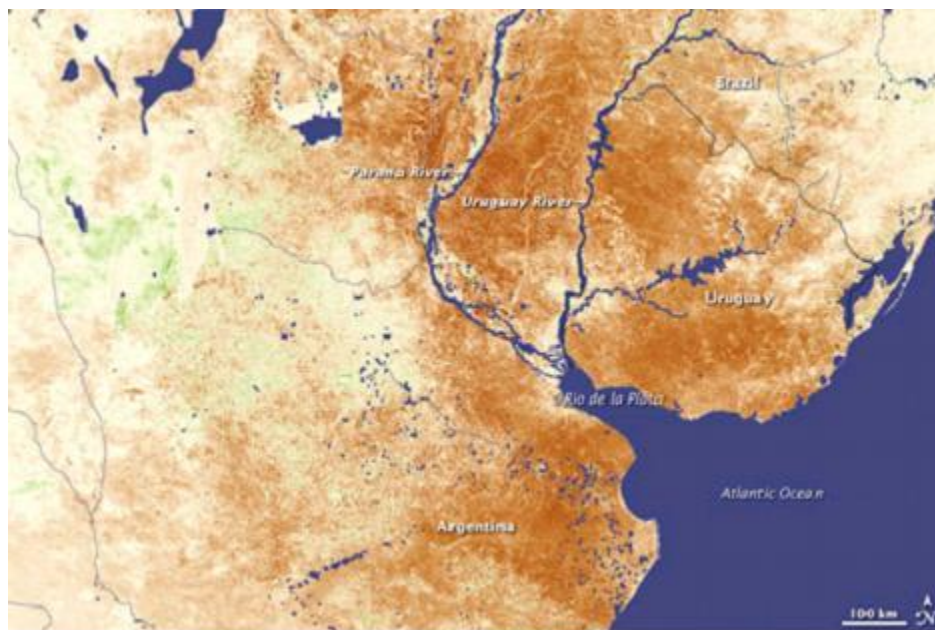


Figura 1.4. Imagen satelital de NDVI en la Región Pampeana, Mesopotamia, Uruguay y sur de Brasil.

La sequía se inició en 2008 y se prolongó hasta septiembre del año 2009 (Borda y Gonzalez Ferrin, 2009). El Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) evaluó que en la zona de la Pampa Húmeda los efectos climáticos repercutieron en muertes de animales y en la peor campaña de trigo en los últimos 30 años, obligando a los productores a realizar traslados de rodeos y provocando que el resto de los cultivos atravesase también por un impacto muy importante.

La ausencia de precipitaciones se registró a partir del mes de diciembre de 2008, justamente cuando los cultivos de algodón, maíz y sobre todo soja, necesitan de un mayor aporte hídrico para su desarrollo. El estrés producido por la sequía no solamente provoca

una disminución en el crecimiento de los cultivos, sino que también los vuelve más vulnerables ante la aparición de plagas y enfermedades. Además, las lluvias producidas a destiempo complican todavía más a las tareas de cosecha debido a la diferencia de madurez y altura de las plantaciones.

Respecto al ganado, las consecuencias de ésta sequía fueron la mortalidad de vientres por falta de agua y de forraje, la disminución del 64,3% de la tasa de preñez, disminución del stock de hembras, reducción de la producción de terneros y por último, la disminución en la producción de carne.

El sistema hidrológico de la provincia también se vió sensiblemente afectado, se registraron bajas en ríos como el Río Salado, uno de los principales afluentes de la provincia. La laguna de Chascomús que ocupa una superficie de más de 3000 hectáreas y cuya cota normal es de 7,50 m.s.n.m; tuvo un pronunciado descenso durante la sequía llegando a una cota de 6,12 m.s.n.m. En el mes de enero de año 2009, la fuerte bajante hizo que el agua se retirara más de 10 m de la costa dejando un paisaje atípico; ya que la laguna no tiene playa y la bajante produjo en algunos espacios playas de más de 200 m. Esta laguna forma parte de un sistema de siete lagunas encadenadas, algunas de las cuales, como la laguna Las Barrancas, presentaron situaciones aún más complicadas que el espejo de agua de Chascomús. Asimismo, otro ejemplo de las consecuencias de este fenómeno fue la disminución de la superficie de los cuerpos lagunares que componen el partido de Puan, al sudoeste de la provincia donde se evidenció una drástica disminución de la superficie de diversas lagunas (Marini y Vernanzi, 2010). También al sudoeste de la provincia de Buenos Aires se encuentra el dique Paso de las Piedras, alimentado por el río Sauce Grande. Su superficie máxima ha sido estimada en 4000 hectáreas, siendo su mayor profundidad de 28 m. Durante el fenómeno, se observó una disminución paulatina de la superficie de agua en el dique que se redujo 924 hectáreas desde marzo del 2008 a noviembre del 2009 (Marini, 2009a, 2009c y 2010).

En síntesis, se estima que ésta ha sido la peor sequía que atravesó el país en más de medio siglo, cuyos efectos climáticos repercutieron en un descenso significativo en los cuerpos de agua superficiales, disminución de los niveles freáticos en toda la región, muertes de animales y en la peor campaña de trigo en los últimos 30 años. En el presente trabajo de Tesis este fenómeno se analizará desde un punto de vista hidrogeofísico, estudiando su incidencia en las reservas de agua de la provincia de Buenos Aires mediante el uso datos satelitales y de campo.

Capítulo 2

Misión GRACE

En el presente capítulo se exponen los objetivos de la misión GRACE junto con las bases teóricas relacionadas con la medición del campo de gravedad terrestre. Se introduce el concepto de altura equivalente de agua y los lineamientos teóricos generales que permite estimar la altura de agua equivalente a partir de las variaciones temporales de gravedad.

2.1. Campo de gravedad terrestre y misión GRACE

Como es sabido, el campo de gravedad de la Tierra es originado tanto por la distribución de masas de la Tierra sólida como la distribución de las capas de fluidos que la rodean: atmósfera, océanos, hielos, aguas superficiales y aguas subterráneas. Las mareas en el océano y en la parte sólida, las perturbaciones atmosféricas, el reacondamamiento de la corteza debido a deshielos, los cambios estacionales en las aguas superficiales y subterráneas producen variaciones en la distribución de masas de la Tierra. Estas variaciones indefectiblemente se manifiestan como una variación temporales del campo de gravedad observado.

La misión espacial GRACE es un proyecto conjunto entre la NASA y el Centro Aeroespacial Alemán. Esta misión fue propuesta en 1996 por los siguientes centros de investigación: Center for Space Research (UTCSR) de la Universidad de Texas, GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ), Jet Propulsion Laboratories (JPL), Space Systems/Loral (SSL), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), y Astrium GMBH. El principal objetivo de la misión es proveer modelos de alta resolución del campo de gravedad de la Tierra con cierta periodicidad y con una precisión sin precedentes para mediciones de gravedad satelital. Los satélites de GRACE fueron lanzados el 17 de marzo de 2002 y originalmente se estimó una duración de la misión de 5 años. Sin embargo, el éxito obtenido y la calidad de los datos llevaron a extender su duración hasta el año 2015.

Técnicamente la misión consiste en dos satélites idénticos que se mueven en una órbita casi polar (inclinación de 89°) y aproximadamente circular ($e < 0.005$) a 500 km de altitud, con un período de 95 minutos. Esta geometría permite una media de 15 revoluciones por día alrededor del planeta con una cobertura global y homogénea. La separación entre ambos satélites es de aproximadamente 220 km \pm 50 km. y haciéndose maniobras correctivas cada 30 a 60 días para mantener acotada esa distancia.

Los modelos de alta resolución provistos por GRACE permiten determinar variaciones espacio-temporales del campo de gravedad terrestre con periodicidad de 10 días o de aproximadamente 1 mes. Los datos obtenidos son aplicables al estudio de numerosos problemas geofísicos como por ejemplo el almacenamiento de agua continental (Schmidt et al., 2006), las variaciones del nivel medio global del mar (Chambers et al., 2004), el balance de masa en las capas de hielo polar (Chen et al., 2008) y las deformaciones en la corteza producidas por terremotos (Chen et al., 2007).

A escalas temporales menores a un año, las variaciones de gravedad son principalmente atribuidas a cambios en el almacenamiento de agua continental. Hasta el lanzamiento de GRACE no se disponía de mediciones directas de las variaciones del almacenamiento a escala global, por lo que sólo podían estimarse a partir de modelos hidrológicos. El almacenamiento de agua continental total puede considerarse en términos generales compuesto por las siguientes contribuciones: *a*) agua de la vegetación superficial (biomasa), *b*) aguas subterráneas (zona saturada), *c*) humedad del suelo (zona no saturada), *d*) aguas superficiales (ríos, lagos, embalses y humedales) y *e*) depósitos de nieve o hielo.

Los datos provistos por GRACE suministran información sobre las variaciones temporales del almacenamiento continental sin discriminar la fuente que les da su origen. En éste trabajo asumiremos que las variaciones del almacenamiento son debidas exclusivamente a las fluctuaciones de aguas subterráneas y superficiales, dejando a un lado el aporte de hielo o nieve, debido a la ubicación geográfica de nuestra zona de estudio. Asimismo, el efecto de la biomasa se considerará despreciable frente al resto de los fenómenos.

2.2. Desarrollo del campo de gravedad terrestre en armónicos esféricos

Como se mencionó anteriormente, la misión espacial GRACE está conformada por dos satélites idénticos que se trasladan a baja altitud en una órbita aproximadamente polar. Las perturbaciones que se observan en la órbita de los satélites y su distancia relativa permiten estimar el potencial de gravedad terrestre W . En esta sección introducimos brevemente la descripción del campo en armónicos esféricos, cuyos coeficientes son provistos por la misión GRACE.

El potencial de gravedad W se define como la suma de los potenciales de la fuerza gravitatoria V y el potencial debido a la fuerza centrífuga Φ :

$$W = V + \Phi. \tag{2.1}$$

En general el potencial gravitacional V se puede expresar como:

$$V = \iiint_{Tierra} \frac{dM}{l}, \quad (2.2)$$

donde $G = 6.6742 \times 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$ es la constante de gravitación universal, dM el diferencial de masa y l la distancia desde dM al punto potenciado.

El potencial V dado por (2.2) depende de la distribución de masas del planeta que resulta desconocida. Una forma sencilla de analizar dicho potencial V es mediante su desarrollo en armónicos esféricos que nos permitirá expresarlo en términos de una serie de coeficientes que pueden ser determinados a partir de mediciones de gravedad satelitales y de superficie.

En un punto externo al planeta (fuera de las masas) V satisface la ecuación de Laplace (Hofmann-Wellenhof y Moritz, 2005):

$$\Delta V = 0, \quad (2.3)$$

por lo que allí es factible de ser analizado por medio de un desarrollo en armónicos esféricos. Luego, el potencial gravitacional terrestre puede expresarse del siguiente modo (Heiskanen and Moritz, 1967):

$$V(r, \varphi, \lambda) = \frac{GM}{r} \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^n \overline{P_{nm}}(\sin\varphi) (\overline{C_{nm}} \cos(m\lambda) + \overline{S_{nm}} \sin(m\lambda)) \right), \quad (2.4)$$

siendo M la masa total de la Tierra; a , el radio ecuatorial o semieje mayor; φ , la latitud; λ , la longitud; r , la distancia geocéntrica; C_{nm} y S_{nm} , los coeficientes del desarrollo en armónicos esféricos normalizados y $\overline{P_{nm}}$, las funciones de Legendre de primera clase normalizadas.

El potencial centrífugo Φ resulta más sencillo de determinar y se lo expresa del siguiente modo:

$$\Phi = \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos^2 \varphi, \quad (2.5)$$

siendo ω es la velocidad angular terrestre.

Luego reemplazando (2.4) y (2.5) en (2.1) puede expresarse el potencial de gravedad W mediante un desarrollo en armónicos esféricos:

$$W(r, \varphi, \lambda) = \frac{GM}{r} \left(1 + \sum_{n=1}^{N_{max}} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^n \overline{P_{nm}}(\sin\varphi) (\overline{C_{nm}} \cos(m\lambda) + \overline{S_{nm}} \sin(m\lambda)) \right) + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos^2 \varphi. \quad (2.6)$$

Notar que en la ecuación (2.6) se ha truncado la serie en el grado y orden máximo N_{max} , que dependerá de los datos y la precisión alcanzada.

Como se mencionó anteriormente, el campo de gravedad de la Tierra W es producto de la distribución de masas, tanto superficiales como profundas. Los cambios que se producen en la distribución de masa se traducirán en variaciones temporales del campo de gravedad. Es por ello que resulta más adecuado para nuestro análisis expresar la ecuación (2.6) del siguiente modo:

$$W(r, \varphi, \lambda, t) = \frac{GM}{r} \left(1 + \sum_{n=1}^{N_{max}} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^n \overline{P_{nm}}(\sin\varphi) (\overline{C_{nm}}(t) \cos(m\lambda) + \overline{S_{nm}}(t) \sin(m\lambda)) \right) + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos^2 \varphi, \quad (2.7)$$

donde ahora los coeficientes $\overline{C_{nm}}$ y $\overline{S_{nm}}$ dependen del tiempo y serán los provistos por la misión GRACE.

2. 3. Cálculo de la altura de agua equivalente

Hasta aquí hemos analizado la forma de representar el campo de gravedad variable en el tiempo por medio del desarrollo en armónicos esféricos (2.7). Para poder calcular valores de las variaciones de las reservas de agua continental a partir de las variaciones de gravedad debemos formular y resolver el problema inverso. Para ello introduciremos en primer lugar el concepto de *altura de agua equivalente* (Wahr y Molenaar, 1998). La altura de agua equivalente es una representación idealizada de la medida del espesor de una capa de agua que se debería remover, o agregar, sobre la superficie de la Tierra, si las variaciones totales de la gravedad observada se debieran al cambio de agua almacenada (Seitz et al., 2008).

Para formular el problema inverso comenzaremos por definir el geoide. En términos generales se lo define como la superficie equipotencial del campo de gravedad terrestre que coincide con la superficie de los mares en equilibrio. La altura de esta superficie de equilibrio respecto a un elipsoide de referencia se conoce con el nombre de ondulación geoidal N y puede ser obtenida mediante la fórmula de Bruns (Hofmann- Wellenhof y Moritz, 2005):

$$N(\varphi, \lambda) = \frac{1}{\gamma(\varphi)} (W(a, \varphi, \lambda) - U(\varphi)), \quad (2.8)$$

donde $W(a, \varphi, \lambda)$ es el potencial de gravedad definido por la ecuación (2.1), $U(\varphi)$ es la expresión del potencial normal del elipsoide de referencia y $\gamma(\varphi)$ es la gravedad normal.

Las variaciones temporales de masa inducen variaciones en la ondulación N . Estas variaciones temporales $\Delta N(t)$ son estimadas como una diferencia entre las soluciones $N(\varphi, \lambda, t)$ obtenida a partir de los datos de GRACE para una época t y de un geode estático medio $N_o(\varphi, \lambda)$ (Wahr y Molenaar, 1998):

$$\Delta N(t) = N(\varphi, \lambda, t) - N_o(\varphi, \lambda). \quad (2.9)$$

La componente estática del campo gravitacional de la Tierra $N_o(\varphi, \lambda)$ corresponde aproximadamente al 99% del campo total debido predominantemente a las contribuciones de masas no variables con el tiempo (Ramillien, 2005). Estas componentes $N_o(\varphi, \lambda)$ pueden ser fácilmente estimadas calculando la media temporal de una serie suficientemente larga de los modelos mensuales del geopotencial obtenidos a partir de los datos de GRACE.

Utilizando las ecuaciones (2.1), (2.7), (2.8) y (2.9) se obtiene la siguiente representación en armónicos esféricos de la variación de la ondulación del geode con el tiempo, en aproximación esférica:

$$\Delta N(t) = a \sum_{n=1}^{N_{max}} \sum_{m=0}^n \overline{P_{nm}}(\text{sen}\varphi) (\Delta \overline{C_{nm}}(t) \cos(m\lambda) + \Delta \overline{S_{nm}}(t) \text{sen}(m\lambda)), \quad (2.10)$$

donde

$$\Delta \overline{C_{nm}}(t) = \overline{C_{nm}}(t) - \overline{C_{nm}}^0, \quad (2.11)$$

$$\Delta \overline{S_{nm}}(t) = \overline{S_{nm}}(t) - \overline{S_{nm}}^0, \quad (2.12)$$

siendo $\overline{C_{nm}}^0$ y $\overline{S_{nm}}^0$ los coeficientes del desarrollo en armónicos esféricos del geode estático medio $N_o(\varphi, \lambda)$.

Las variaciones en la ondulación del geode se deben a una redistribución de la densidad terrestre que designaremos $\Delta\rho(r, \varphi, \lambda, t)$. La variación en los coeficientes del desarrollo en armónicos esféricos debido a $\Delta\rho(r, \varphi, \lambda, t)$ está dada por (Chao y Gross, 1987):

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta \overline{C_{nm}}(t) \\ \Delta \overline{S_{nm}}(t) \end{array} \right\} = \frac{3}{4\pi a \rho_m (2n+1)} \iiint \Delta\rho(r, \varphi, \lambda) \left(\frac{r}{a}\right)^{n+2} \overline{P_{mn}}(\text{sen}\varphi) \left\{ \begin{array}{l} \cos(m\lambda) \\ \text{sen}(m\lambda) \end{array} \right\} \cos(\varphi) d\varphi d\lambda dr, \quad (2.13)$$

siendo $\rho_m = 5517 \text{kg/m}^3$ es la densidad media de la Tierra.

Si desarrollamos $\Delta\rho$ utilizando funciones de Legendre se tiene:

$$\Delta\rho(r, \varphi, \lambda, t) = \sum_{n=0}^{N_{max}} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^n \overline{P_{nm}}(\text{sen}\varphi) (\Delta\rho_{nm}^c(r, t) \cos(m\lambda) + \Delta\rho_{nm}^s(r, t) \text{sen}(m\lambda)), \quad (2.14)$$

donde $\Delta\rho_{nm}^c(r, t)$ y $\Delta\rho_{nm}^s(r, t)$ son coeficientes que dependen del tiempo y de la profundidad.

A partir de estas dos últimas ecuaciones y utilizando las propiedades de ortogonalidad obtenemos la siguiente relación:

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{\Delta C_{nm}}(t) \\ \overline{\Delta S_{mn}}(t) \end{array} \right\} = \frac{3}{a\rho_m(2n+1)} \int \left\{ \begin{array}{l} \Delta\rho_{nm}^c(r, t) \\ \Delta\rho_{nm}^s(r, t) \end{array} \right\} \left(\frac{r}{a}\right)^{n+2} dr. \quad (2.15)$$

En la ecuación (2.15) se hace evidente la ambigüedad asociada al método gravimétrico, ya que $\overline{\Delta C_{nm}}(t)$ y $\overline{\Delta S_{mn}}(t)$ sólo proveen información sobre la integral en la dirección radial de los coeficientes. Luego, no resulta posible determinar a partir de ellos la ley de variación de la densidad con la profundidad.

Supongamos ahora que las variaciones en los coeficientes se deben a variaciones de masas concertadas en una delgada capa de espesor H cercana a la superficie de la Tierra; que contenga las regiones de la atmósfera, océanos, glaciares y reservorios donde se producen las variaciones más importantes de masa. En este caso, el espesor H estaría determinado por el espesor de la tropósfera y la zona de variación de las aguas subterráneas, que puede estimarse en 10 km. Si H es delgado comparado con la resolución horizontal de las observaciones, entonces la amplitud de las anomalías de densidad puede determinarse unívocamente (Wahr y Molenaar, 1998).

Tomando un espesor H suficientemente pequeño como para que $(N_{max} + 2) H/a \ll 1$, se tiene que $(r/a)^{n+2} \approx 1$ para todos los valores de n , bajo esta hipótesis la ecuación (2.13) toma la forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{\Delta C_{mn}^{Masa\ Sup}}(t) \\ \overline{\Delta S_{mn}^{Masa\ Sup}}(t) \end{array} \right\} = \frac{3}{4\pi a\rho_m(2n+1)} \iint \Delta\sigma(r, \varphi, \lambda) \overline{P_{mn}}(\text{sen}\varphi) \left\{ \begin{array}{l} \cos(m\lambda) \\ \text{sen}(m\lambda) \end{array} \right\} \cos(\varphi) d\varphi d\lambda dr, \quad (2.16)$$

donde $\Delta\sigma(\varphi, \lambda)$ es la densidad superficial definida como la integral radial de $\Delta\rho$ en la capa superficial de espesor H :

$$\Delta\sigma(\varphi, \lambda, t) = \int_{\text{capa sup}} \Delta\rho(\varphi, \lambda, t) dr. \quad (2.17)$$

Cualquier carga en la superficie terrestre también produciría una deformación en la parte sólida de la Tierra, que implica una nueva anomalía de densidad en profundidad. La señal debida a estas nuevas anomalías es normalmente una fracción de la causada por la

masa superficial y es fácilmente representada a través de los números de Love k_n (Farrell, 1972; Chao y Gross, 1994). A partir de los valores de k_n se pueden expresar las variaciones de los coeficientes debidas a esta contribución de la Tierra sólida de la siguiente manera:

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{\Delta C_{mn}^{Tierra Sólida}}(t) \\ \overline{\Delta S_{mn}^{Tierra Sólida}}(t) \end{array} \right\} = k_n \left\{ \begin{array}{l} \overline{\Delta C_{mn}^{Masa Sup}}(t) \\ \overline{\Delta S_{mn}^{Masa Sup}}(t) \end{array} \right\}. \quad (2.18)$$

Luego, el cambio total en los coeficientes del desarrollo en armónicos esféricos será:

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{\Delta C_{mn}}(t) \\ \overline{\Delta S_{mn}}(t) \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \overline{\Delta C_{mn}^{Tierra Sólida}}(t) \\ \overline{\Delta S_{mn}^{Tierra Sólida}}(t) \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \overline{\Delta C_{mn}^{Masa Sup}}(t) \\ \overline{\Delta S_{mn}^{Masa Sup}}(t) \end{array} \right\}. \quad (2.19)$$

A partir de las ecuaciones (2.16), (2.18) y (2.19) se puede expresar la dependencia de los coeficientes del potencial con la densidad como:

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{\Delta C_{mn}}(t) \\ \overline{\Delta S_{mn}}(t) \end{array} \right\} = \frac{3}{4\pi a \rho_m} \frac{(1 + k_n)}{(2n + 1)} \iint \Delta\sigma(r, \varphi, \lambda) \overline{P_{mn}}(\text{sen}\varphi) \left\{ \begin{array}{l} \cos(m\lambda) \\ \text{sen}(m\lambda) \end{array} \right\} \cos(\varphi) d\varphi d\lambda dr. \quad (2.20)$$

Extendiendo $\Delta\sigma(\varphi, \lambda, t)$ como una suma de funciones de Legendre, similar a la ecuación (2.14) utilizada para $\Delta\rho$ y aplicando propiedades de ortogonalidad se obtiene:

$$\Delta\sigma(\varphi, \lambda, t) = a \frac{\rho_m}{3} \sum_{n=0}^{N_{max}} \sum_{m=0}^n \frac{(2n + 1)}{(1 + k_n)} \overline{P_{nm}}(\text{sen}\varphi) (\overline{\Delta C_{nm}}(t) \cos(m\lambda) + \overline{\Delta S_{nm}}(t) \text{sen}(m\lambda)). \quad (2.21)$$

La ecuación (2.21) nos permite calcular la distribución de la densidad superficial a partir de los coeficientes del desarrollo del potencial de gravedad; resolviendo así el problema inverso.

Las masas continentales de agua consideradas incluyen las aguas del suelo, aguas subterráneas y nieve. Estas tres contribuciones son expresadas en términos de la altura de agua equivalente $h(\varphi, \lambda, t)$, de la siguiente forma

$$h(\varphi, \lambda, t) = \frac{\Delta\sigma(\varphi, \lambda, t)}{\rho_w}, \quad (2.22)$$

donde ρ_w es la densidad del agua que consideramos constante e igual a 1000 kg/m^3 .

Reemplazando la ecuación (2.1) en la ecuación (2.22) se puede expresar la altura de agua equivalente como:

$$h(\varphi, \lambda, t) = a \frac{\rho_m}{\rho_w} \sum_{n=1}^{N_{max}} \sum_{m=0}^n \frac{(2n+1)}{3(1+k_n)} \overline{P_{nm}(\sin\varphi)} (\overline{\Delta C_{nm}(t)} \cos(m\lambda) + \overline{\Delta S_{nm}(t)} \sin(m\lambda)). \quad (2.23)$$

siendo

$$\begin{cases} \widetilde{\Delta C_{nm}(t)} \\ \widetilde{\Delta S_{nm}(t)} \end{cases} = \frac{\rho_m(2n+1)}{3\rho_w(1+k_n)} \begin{cases} \overline{\Delta C_{nm}(t)} \\ \overline{\Delta S_{nm}(t)} \end{cases}. \quad (2.24)$$

Esta ecuación nos muestra que es posible calcular la altura equivalente de agua a partir de los coeficientes del desarrollo en armónicos esféricos que nos provee la misión GRACE, resolviendo así el problema inverso. Esta metodología nos permite analizar y cuantificar las variaciones temporales de las reservas de agua continentales en todo el planeta, aún en aquellas regiones de accesibilidad restringida.

Resulta importante mencionar que al convertir los datos satelitales en altura de agua equivalente, se observa un ruido de alta frecuencia que toma la forma de bandas longitudinales en la dirección norte-sur conocidas como *stripes*. Esta es una característica de las soluciones de GRACE. El origen de los stripes no está completamente claro, aunque se considera que ocurren debido a que los satélites miden gradientes de gravedad a lo largo de su órbita, y como ésta tiene una inclinación de 89° , el camino que recorren tiene orientación norte-sur. Por lo tanto, la sensibilidad en la dirección este-oeste es pequeña y cualquier error en las medidas o en el procesamiento, tiende a ser incorporado en los gradientes que poseen dirección este-oeste. Este ruido debe ser eliminado de la señal, ya que enmascara completamente la información de interés. Para eliminarlo, se suele utilizar el filtro propuesto por Swenson y Wahr (2006).

2.4. Valores de altura de agua equivalente provistos por el CNES/GRGS

Las alturas de agua equivalente utilizadas en el presente trabajo son provistas por el Centro Nacional de Estudios Espaciales/Grupo de Investigación de Geodesia Espacial (CNES/GRGS) y están basadas en los datos de la misión GRACE y la misión soporte LAGEOS (LAsER GEODynamics Satellite) (Biancale et al., 2010). LAGEOS es una serie de satélites artificiales diseñados para proporcionar órbitas de referencia para estudios de geodinámica de la Tierra. Los datos son provistos en forma de grillas globales de $1^\circ \times 1^\circ$ (en ITRF2000 y expresados en metros) de forma mensual o cada un período de 10 días.

Los valores de altura de agua equivalente son obtenidos a partir de los coeficientes para del desarrollo en armónicos esféricos del modelo de campo de gravedad brindado por la misión GRACE (Wahr y Molenaar, 1998). Este modelo tiene coeficientes armónicos de grado 2 hasta grado y orden 50. Los modelos que son proporcionados cada 10 días, están basados exclusivamente en los 10 días (máximo) de datos que están dentro

de éste intervalo de tiempo. Estos modelos son estabilizados con el campo medio EIGEN-GRGS.RL02.MEAN-FIELD (Bruinsma et al., 2010) que incluye componentes lineales, anuales y semianuales y se calcula para cada época dada. Luego, los valores de altura de agua equivalente suministrados son las diferencias entre las soluciones variables en el tiempo y el campo estático.

Los datos son de libre acceso y no necesitan ningún tipo de suavizado o filtrado, ya que han sido estabilizados durante el proceso de generación. Todas las señales no hidrológicas han sido removidas mediante modelos numéricos considerando los siguientes efectos variables: atracción de luna, el sol y los planetas; mareas terrestres; mareas oceánicas; mareas atmosféricas; mareas polares terrestres y oceánicas; la influencia gravitacional de la presión atmosférica en las órbitas satelitales y la respuesta del dominio oceánico a la fuerza atmosférica (presión y viento). Estas dos últimas variables son modeladas a partir del campo 3-D de presión atmosférica European Centre for Medium-Range Weather Forecast (3D-ECMWF) y por el modelo MOG2D (2D Gravity Waves Model), respectivamente.

Capítulo 3

Variaciones de las reservas de agua en el período 2008-2009

En este capítulo se analizarán los efectos de la sequía que afectara a la provincia de Buenos Aires durante el año 2009. Para poder observar y comparar los efectos de la sequía en las reservas de agua se ha tomado como referencia el año 2008, ya que puede considerarse como un año hidrológico normal.

3.1. Procesamiento de datos

El siguiente análisis se ha realizado en base a datos de altura de agua equivalente calculados cada 10 días para los años 2008 y 2009; provistos por el CNES/GRGS (Biancale et al., 2010). Dichos datos de altura de agua equivalente son provistos como valores promedios para grillas globales de 1° x 1° cada períodos de 10 días.

En principio, se determinó el área de estudio, una región que contuviese a la provincia de Buenos Aires en su totalidad, quedando delimitada por un cuadrado cuyos vértices son las coordenadas: (-32° 30'; -64° 30'), (-32° 30'; -55° 30'), (-41° 30'; -64° 30') y (-41° 30'; -55° 30'). En la Figura 3.1 se ilustra la región de estudio y las estaciones donde se realizará la comparación de los datos satelitales con las mediciones de los niveles freáticos.

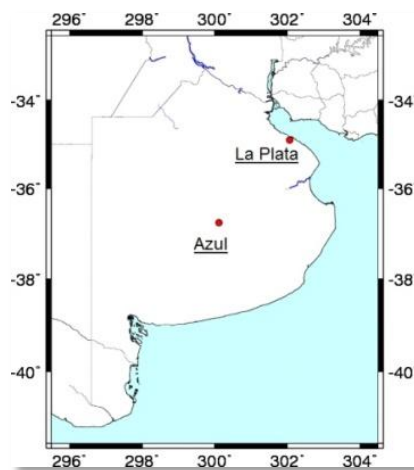


Figura 3.1 Región delimitada para altura de agua equivalente para la provincia de Buenos Aires y estaciones de medición de niveles freáticos.

Para el análisis se seleccionaron los datos de altura equivalente de agua provistos por GRACE correspondientes a dicha región para todos los períodos de 10 días que conformasen los años 2008 y 2009. Estos períodos no son coincidentes de un año al otro y es por ello que deberá realizarse una interpolación temporal para poder compararlos.

El procesamiento de los datos se hizo en forma automatizada. Con este fin se desarrolló un programa que selecciona de la grilla global los datos de la región de estudio e interpola los valores de altura equivalente para las estaciones puntuales seleccionadas. Esto da como resultado la salida de tres archivos:

1. Archivo de alturas equivalentes de agua para la provincia de Buenos Aires.
2. Archivo de altura equivalente de agua para la estación de Azul.
3. Archivo de altura equivalente de agua para la estación de La Plata.

Estos dos últimos archivos se utilizarán al momento de correlacionar los datos satelitales provistos por la misión GRACE con los datos puntuales de campo de las estaciones, como se verá en el Capítulo 4.

El archivo de alturas equivalentes de agua para la provincia de Buenos Aires es una matriz cuadrada de 10 x 10 valores. El primer elemento de ésta matriz corresponde al punto de coordenadas (-32° 30', -64° 30'). Los años 2008 y 2009 conforman 72 períodos de 10 días (36 por año); obteniéndose entonces 72 matrices con los datos de altura de agua equivalente para la región.

3.2. Variaciones de las reservas de agua

Como hemos mencionado, el objetivo de este capítulo es calcular las variaciones en las reservas de agua en la provincia de Buenos Aires durante la sequía del año 2009. Para cuantificar este efecto se tomó como referencia las alturas de agua equivalente del año 2008, que puede considerarse a los efectos del presente análisis como año hidrológico normal.

Las variaciones relativas de las reservas de agua Δh_{GRACE} se calcularán mediante la siguiente diferencia (ecuación 3.1):

$$\Delta h_{GRACE}^i(\varphi, \lambda) = h_{GRACE2009}^i(\varphi, \lambda) - h_{GRACE2008}^i(\varphi, \lambda), \quad i = 1, \dots, 36. \quad (3.1)$$

donde $h_{GRACE2008}$ y $h_{GRACE2009}$ son los valores correspondientes a los años 2008 y 2009. El supraíndice i indica el período de 10 días para el cual se realiza el cálculo.

Los datos brindados por GRACE están dados cada 10 días de forma continua, por lo que la fecha de comienzo del primer período de la serie del año 2009 no coincide con la

del primer período de la serie del año 2008. Los períodos de un año al otro están desfasados en 4 días por lo que resulta necesario realizar una interpolación temporal que nos permita poder calcular las variaciones relativas de la ecuación (3.1).

Para realizar la interpolación tomaremos como referencia los períodos de 10 días de la serie de datos del año 2009. La interpolación se realizará de acuerdo con el esquema presentado en la Figura 3.2. Utilizaremos el supraíndice i para indicar los períodos de 10 días del año 2009 y el supraíndice j para los períodos correspondientes al año 2008. Dado que el período i (2009) está formado por 6 días del período j (2008) y 4 días del período $j+1$ (2008) realizaremos la interpolación del siguiente modo:

$$h_{GRACE2008}^i(\varphi, \lambda) = \frac{6}{10} h_{GRACE2008}^j(\varphi, \lambda) + \frac{4}{10} h_{GRACE2008}^{j+1}(\varphi, \lambda). \quad (3.2)$$

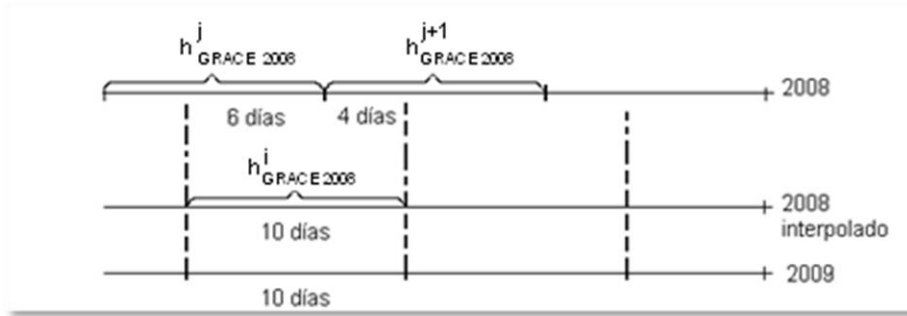


Figura 3.2. Esquema de interpolación de los datos de la serie 2008.

Una vez interpolados los valores de la altura de agua equivalente para el año 2008 con la ecuación (3.2) se calcularon las variaciones de las reservas utilizando (3.1). A modo de ejemplo se ilustra en la Figura 3.2 $h_{GRACE2009}$, $h_{GRACE2008}$ y Δh_{GRACE} para el período $i=9$ (24 de marzo al 2 de abril).

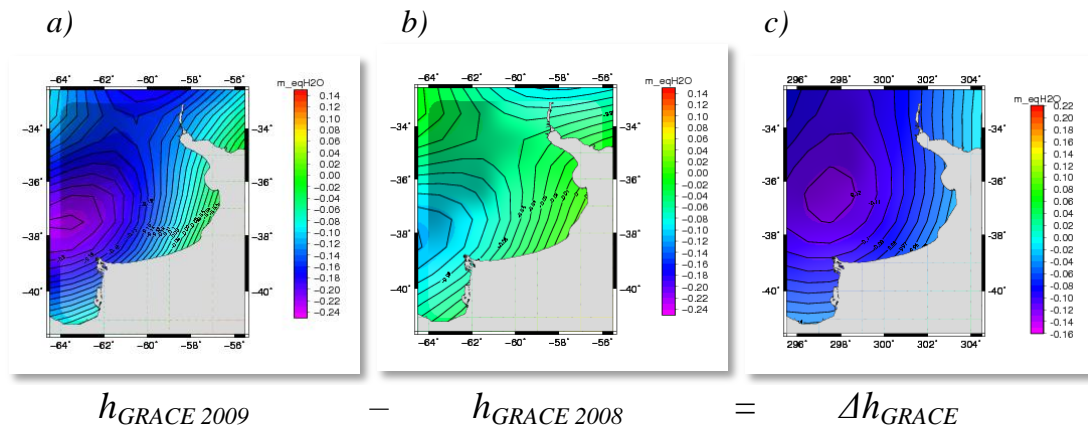


Figura 3.3. a) Altura de agua equivalente para el período $i=9$ del año 2009; b) Altura de agua equivalente para el período $i=9$ del año 2008; c) Variación de la reserva de agua continental.

Las Figuras 3.4.1 a 3.4.38 ilustran las variaciones relativas de las reservas de agua del año 2009 para la región de la provincia de Buenos Aires ($i=1, \dots, 36$).

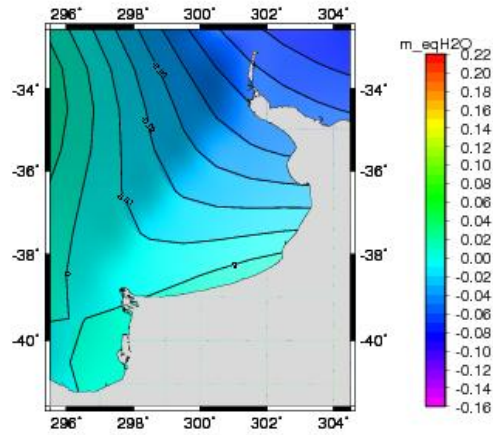


Figura 3.4.1. Período $i=1$ (03 al 12 de enero).

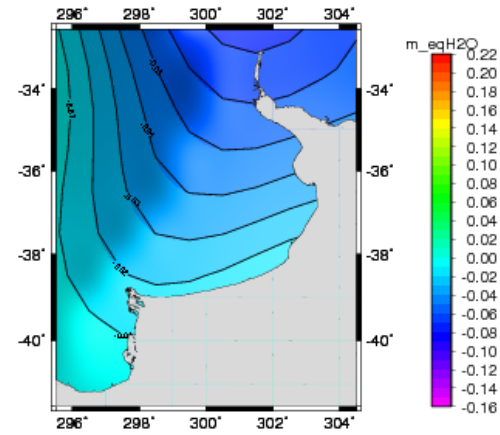


Figura 3.4.2. Período $i=2$ (13 al 22 de enero).

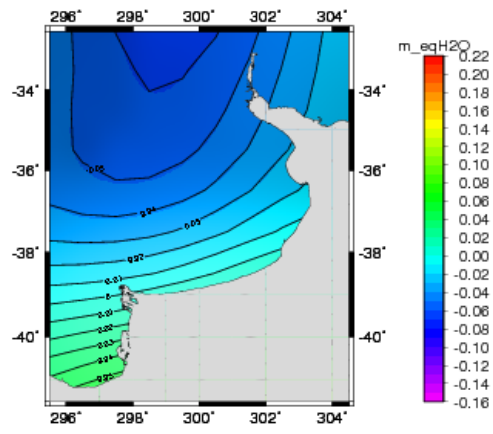


Figura 3.4.3. Período $i=3$ (23 de enero al 01 de febrero).

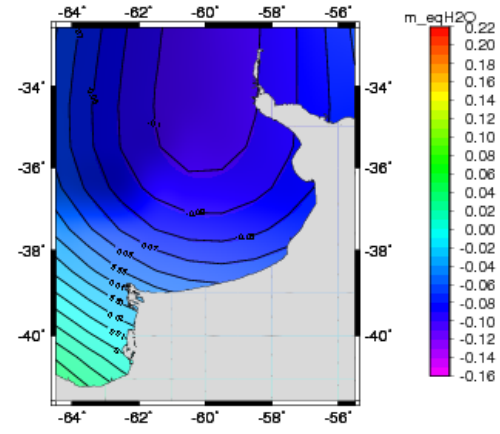


Figura 3.4.4. Período $i=4$ (02 al 11 de febrero)

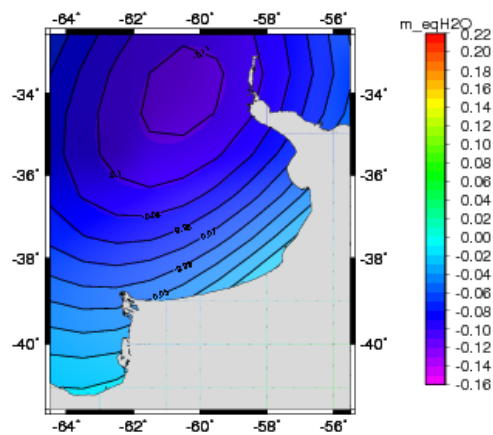


Figura 3.4.5. Período $i=5$ (12 al 21 de febrero).

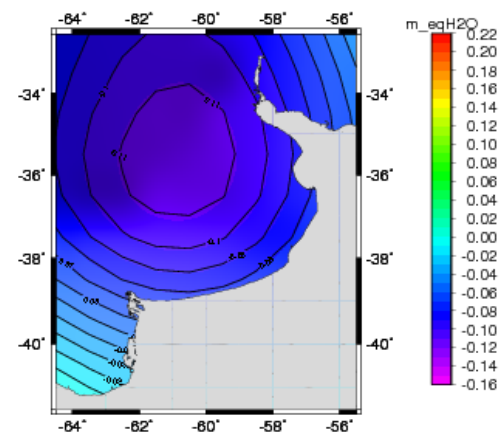


Figura 3.4.6. Período $i=6$ (22 de febrero al 03 de marzo).

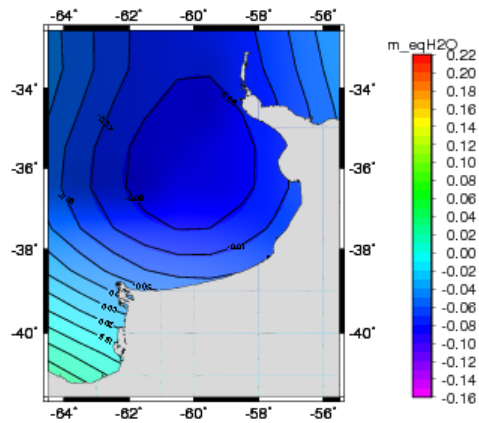


Figura 3.4.7. Período i=7 (04 al 13 de marzo).

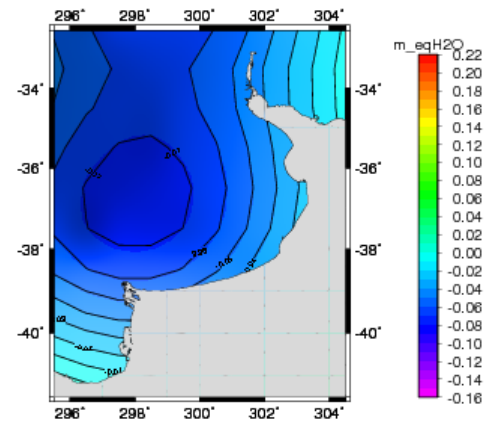


Figura 3.4.8. Período i=8 (14 al 23 de marzo)

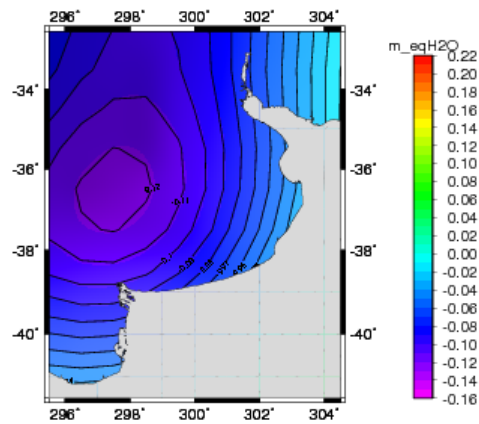


Figura 3.4.9. Período i=9 (24 de marzo al 02 de abril).

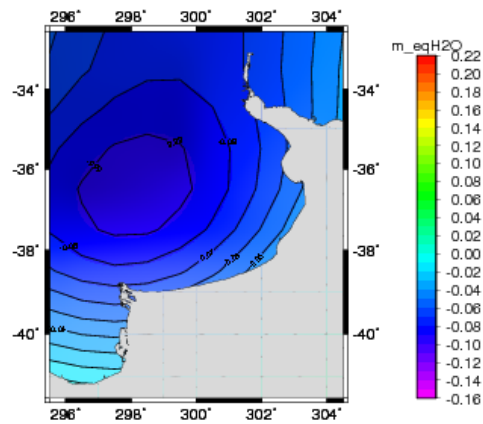


Figura 3.4.10. Período i=10 (03 al 12 de abril).

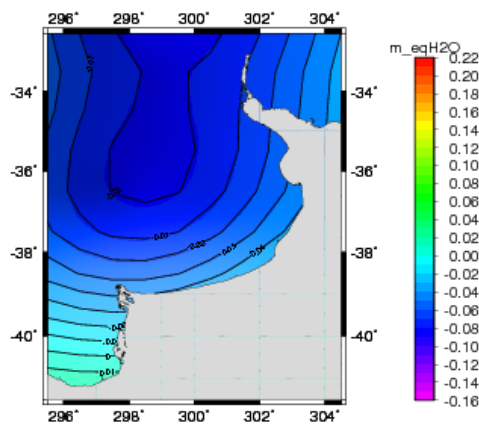


Figura 3.4.11. Período i=11 (13 al 22 de abril).

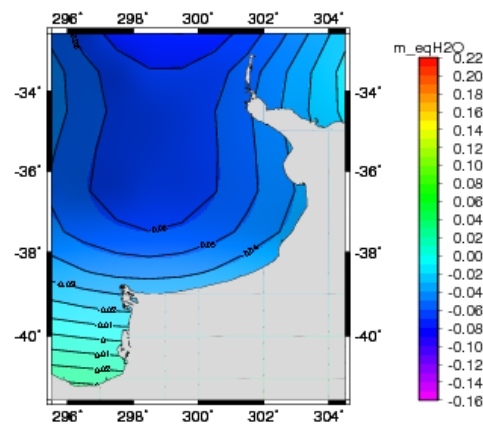


Figura 3.4.12. Período i=12 (23 de abril al 02 de mayo)

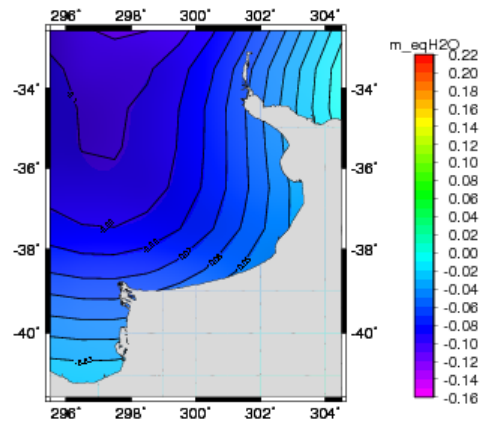


Figura 3.4.13. Período i=13 (03 al 12 de mayo).

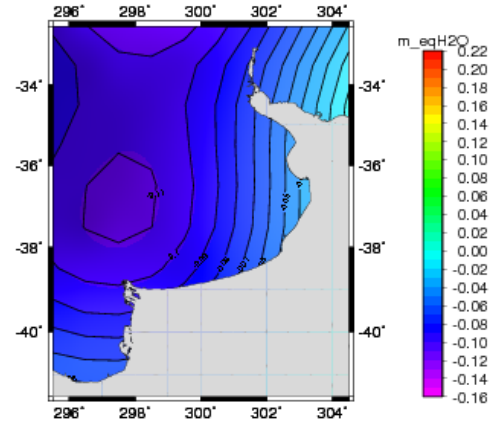


Figura 3.4.14. Período i=14 (13 al 22 de mayo).

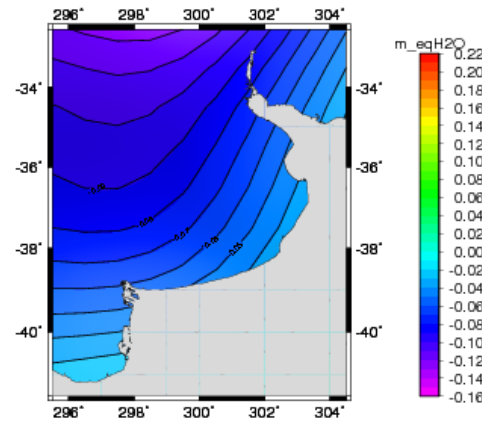


Figura 3.4.15. Período i=15 (23 de mayo al 01 de junio).

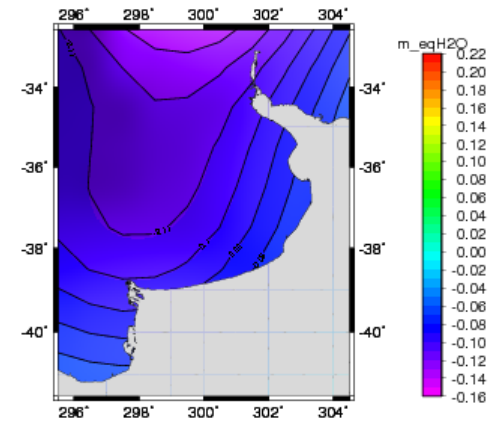


Figura 3.4.16. Período i=16 (02 al 11 de junio).

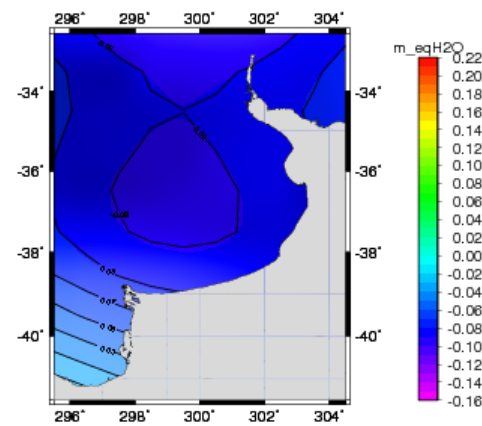


Figura 3.4.17. Período i=17 (12 al 21 de junio).

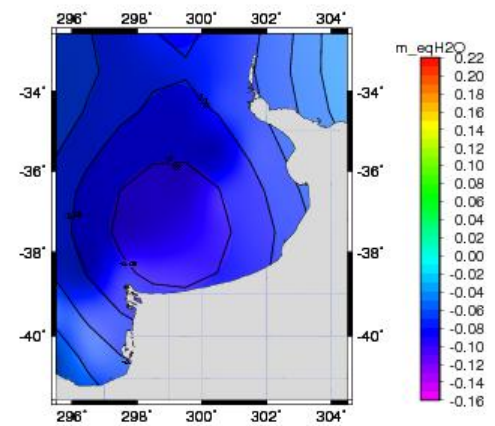


Figura 3.4.18. Período i=18 (22 de junio al 01 de julio).

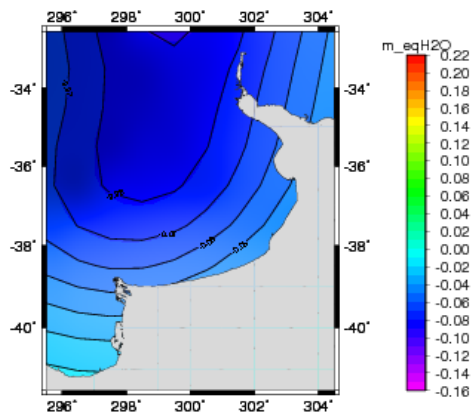


Figura 3.4.19. Período i=19 (02 al 11 de julio).

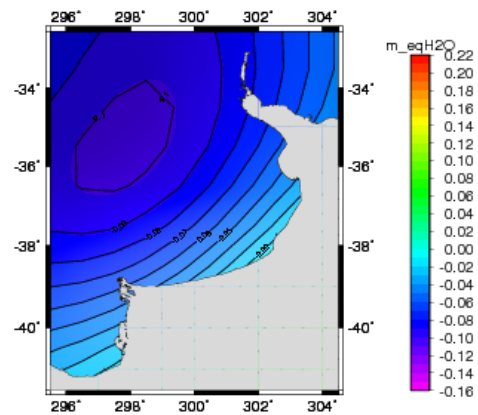


Figura 3.4.20. Período i=20 (12 al 21 de julio).

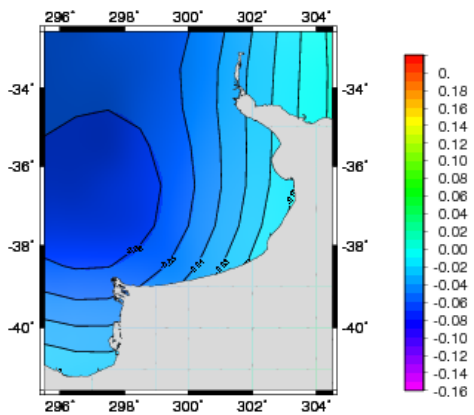


Figura 3.4.21. Período i=21 (22 al 31 de julio).

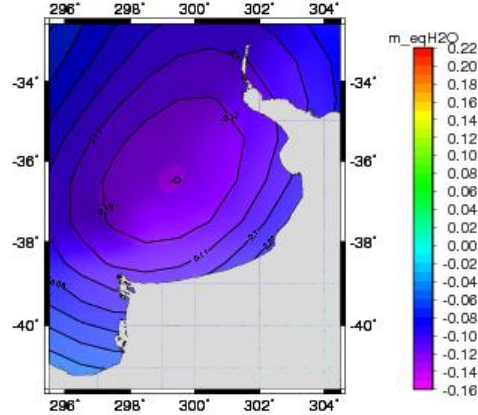


Figura 3.4.22. Período i=22 (01 al 10 de agosto).

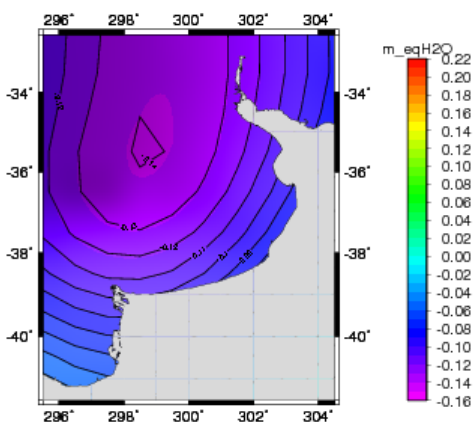


Figura 3.4.23. Período i=23 (11 al 20 de agosto).

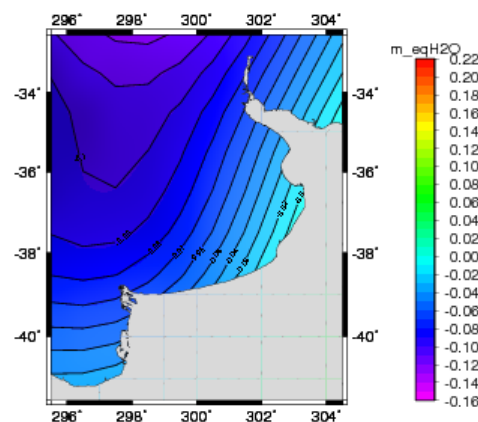


Figura 3.4.24. Período i=24 (21 al 30 de agosto).

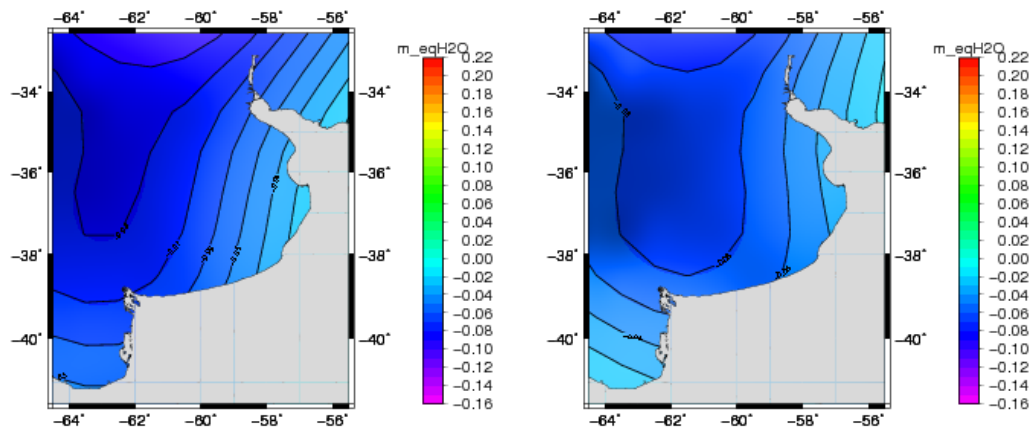


Figura 3.4.25. Período $i=25$ (31 de agosto al 09 de septiembre). Figura 3.4.26. Período $i=26$ (10 al 19 de septiembre).

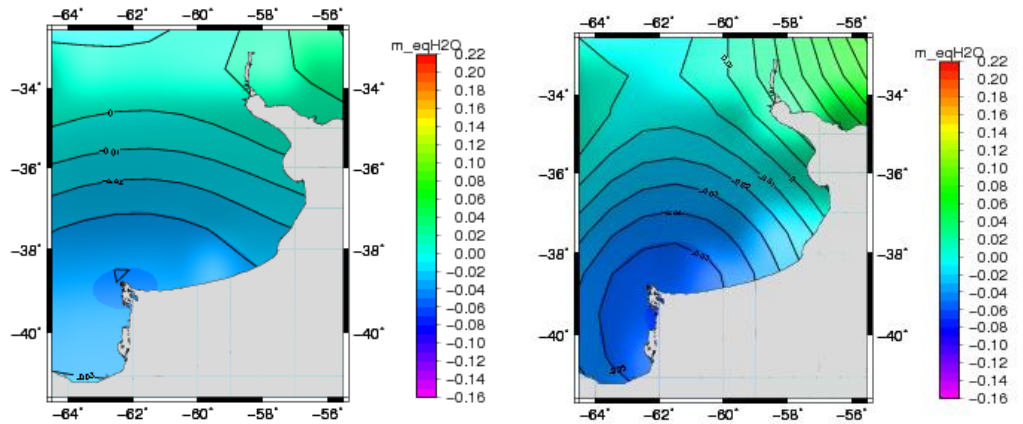


Figura 3.4.27. Período $i=27$ (20 al 29 de septiembre). Figura 3.4.28. Período $i=28$ (30 de septiembre al 09 de octubre).

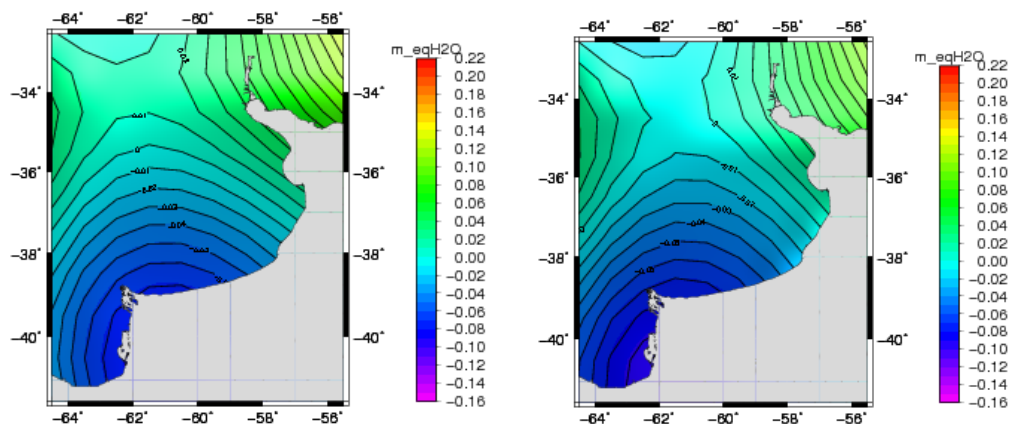


Figura 3.4.29. Período $i=29$ (10 al 19 de octubre). Figura 3.4.30. Período $i=30$ (20 al 29 de octubre).

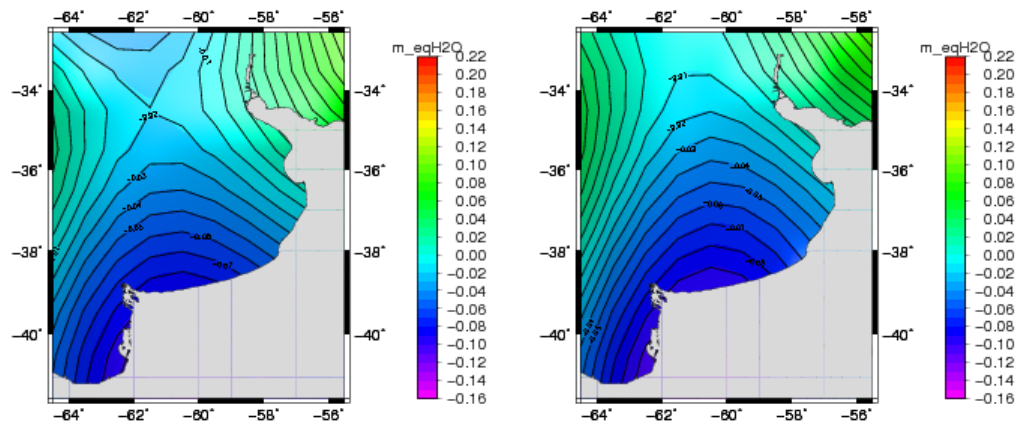


Figura 3.4.31. Período i=31 (30 de octubre al 08 de noviembre) Figura 3.4.32. Período i=32 (09 al 18 de noviembre)

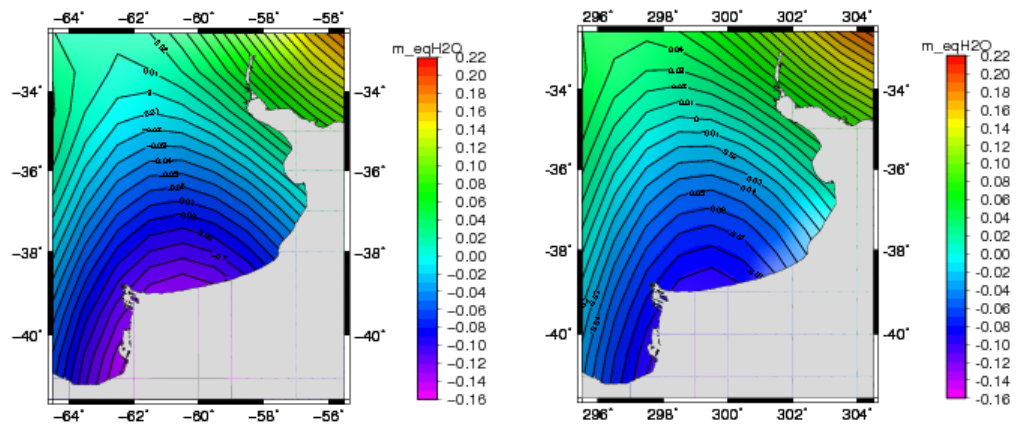


Figura 3.4.33. Período i=33 (19 al 28 de noviembre)

Figura 3.4.34. Período i=34 (29 de noviembre al 08 de diciembre)

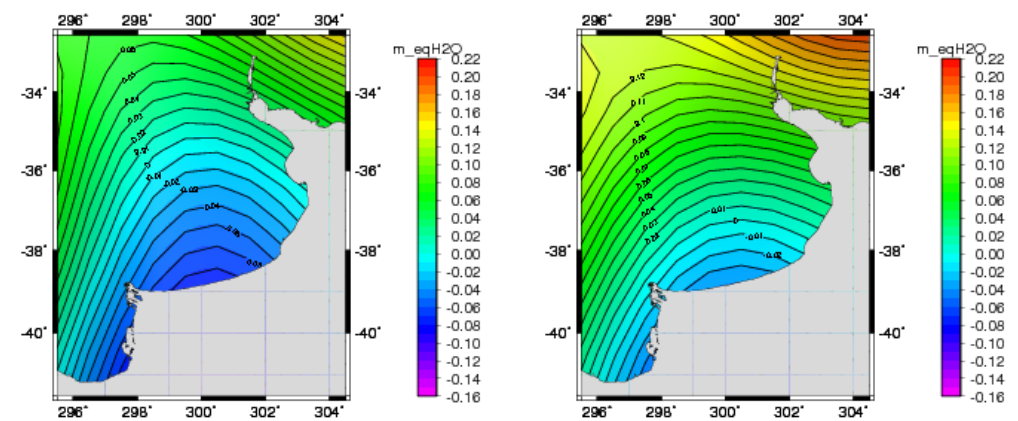


Figura 3.4.35. Período i=35 (09 al 18 de diciembre)

Figura 3.4.36. Período i=36 (19 al 29 de diciembre)

3.3. Análisis de los resultados

Las Figuras 3.4.1 a 3.4.36 ilustran claramente el efecto de la sequía sobre las reservas de aguas en la provincia de Buenos Aires obtenidas a partir de los datos provistos por GRACE. En principio, se observa que la región presenta anomalías en su mayoría negativas durante gran parte del año, lo que significa que las alturas de agua equivalentes fueron en general, menores a las alturas de agua correspondientes al año 2008. La fase más crítica de la sequía se extendió hasta el mes de septiembre.

Durante el período comprendido entre el mes de enero y mediados de septiembre es cuando se advierten las anomalías regionales más significativas; se puede observar que ocurren durante los siguientes períodos: $i=5$ y 6 (Figuras 3.4.5 y 3.4.6) correspondiente a los días 12 de febrero al 3 de marzo; $i=9$ (Figura 3.4.9) del 24 de marzo al 2 de abril; $i=14, 15$ y 16 (Figuras 3.4.14 a 3.4.16) del 13 de mayo al 11 de junio; y finalmente $i=22, 23$ y 24 (Figura 3.4.22 a 3.4.24) del 1 al 30 de agosto.

Las variaciones en las reservas de agua alcanzan su mínimo absoluto durante el mes de agosto. El mínimo calculado corresponde al segundo período del mes ($i=23$) con un valor de $-0,140$ m para las coordenadas de latitud $-35^{\circ} 30'$ y longitud $-61^{\circ} 30'$. Resulta importante destacar que en el informe técnico del INTA que evalúa la evolución del índice verde durante 2009 en el área de influencia de la estación experimental agropecuaria de Bordenave ($-37^{\circ} 50' 55''$, $-63 01' 20''$) se reporta para el mes de agosto la peor situación en la merma del NDVI (Marini, 2009c). También se observan otros mínimos como los ocurridos en el mes de marzo ($i=9$) con un valor de $-0,124$ m; en mayo ($i=15$) con un valor de $-0,124$ m; en junio ($i=16$) con un valor de $-0,137$ m y agosto ($i=22$) con un valor de $-0,130$ m. Estas disminuciones en las reservas de agua pueden asociarse a los efectos de la sequía que registraban los medios de comunicación desde principio del año 2009^[1], y que continuaron informando durante los meses hibernales^{[2][3]}.

Hacia finales del mes de septiembre ($i=27$) se comienza a observar una leve recuperación en las reservas de agua. Sin embargo, hasta el final de la época de análisis, perdura la anomalía negativa que afectara al sur de la provincia de Buenos Aires, área mayormente perjudicada por el fenómeno de la sequía.

Por otra parte, se han realizado estudios que mediante la aplicación de imágenes satelitales analizan la disminución de los cuerpos lagunares en el partido de Puan, al sudoeste de la provincia. Estos estudios evidenciaron una drástica disminución de la superficie de diversas lagunas que de 16.376 hectáreas en enero de 2005 disminuyó a

¹ Nota del 29/01/2009 en el diario “El País” de España: “Argentina sufre su peor sequía” (http://www.elpais.com/articulo/internacional/Argentina/sufre/peor/sequia/elpepiint/20090129elpepiint_12/Tes)

² Nota del 06/06/2009 en el diario “La Nación”: “La sequía vuelve a golpear al agro”. (http://www.lanacion.com.ar/nota.asp?nota_id=1125013)

³ Nota de 16/07/2009 en el diario “La Nueva Provincia” (Bahía Blanca): “La sequía no da respiro” (http://www.lanueva.com/edicion_impresa/nota/16/07/2009/97g002.html)

3389 hectáreas en mayo de 2009, esto es un descenso del 79,3% acentuado mayormente durante el año 2009 (Marini y Vernanzi, 2010). Con la misma técnica se estudió el Dique Las Piedras, ubicado al sudoeste de la provincia y alimentado por el río Sauce Grande donde también se observó una disminución paulatina de la superficie del agua en el dique. Esta disminución se pone de manifiesto en la comparación efectuada entre enero del año 2005 y mayo del 2009, donde la superficie del espejo de agua desciende de 3214 a 1900 hectáreas (Marini, 2009a y 2009d); y en particular de mayo a noviembre del 2009 que disminuye de 1900 a 1621 hectáreas (Marini, 2010).

Finalmente, cabe destacar que en el tercer período de noviembre ($i=33$) al sur de la provincia se observa una anomalía negativa del orden de magnitud del mínimo absoluto de la serie. Esta anomalía presenta características más locales que las anomalías expuestas anteriormente y condice con el hecho de que la sequía afectara en forma más persistente en el tiempo el sector sur de la provincia. En particular durante los últimos meses del año 2009, en la localidad de Carmen de Patagones (situada en el extremo sur bonaerense) los medios periodísticos compararon lo que antes era una zona verde dedicada a la cría de ganados con un desierto que reunía las mismas características que el Sahara^{[4][5][6]}.

A partir del análisis propuesto se puede concluir que los datos de alturas de agua equivalentes provistos por la misión GRACE permiten realizar un seguimiento de la evolución del fenómeno de sequía en la provincia de Buenos Aires durante la época estudiada. Se pudo determinar un mayor impacto durante el período de tiempo que se extiende desde principios de enero y hasta mediados del mes de septiembre. Estos resultados concuerdan con los exhibidos en los registros del INTA (Borda y Gonzalez Ferrin, 2009) respecto a la finalización del fenómeno de sequía en el mes de septiembre. Si bien no existen muchos trabajos científicos publicados sobre los efectos de la sequía del año 2009, los resultados obtenidos en este trabajo concuerdan con numerosos artículos periodísticos que reflejaron distintos aspectos de este fenómeno en la Provincia de Buenos Aires. En este sentido resulta de importancia destacar la utilidad de la técnica satelital empleada que permite cuantificar las reservas de agua y realizar un estudio regional en zonas donde no se cuenta con datos de campo o resultan de difícil acceso.

⁴ Nota del 04/10/2009 en el diario “La Nación”: “Cierran campos en el sur bonaerense” (http://www.lanacion.com.ar/nota.asp?nota_id=1182237).

⁵ Nota del 15/11/2009 en el diario “Clarín”: “Carmen de Patagones Resiste al viento, la arena y la sequía extrema” (<http://edant.clarin.com/diario/2009/11/15/sociedad/s-02041330.htm>).

⁶ Nota del 27/12/2009 en el diario “El Día” (La Plata): “Por la sequía, la NASA compara a Carmen de Patagones con el Sahara” (<http://www.eldia.com.ar/edis/20091227/informaciongeneral3.htm>).

Capítulo 4

Comparación de los datos satelitales con mediciones de nivel freático

En el siguiente capítulo se comparan las alturas de agua equivalentes obtenidas con GRACE con mediciones de niveles freáticos en estaciones puntuales ubicadas en las localidades de Azul y La Plata. Este análisis permitirá validar la técnica satelital empleada y obtener información complementaria sobre el fenómeno estudiado.

4.1. Variaciones relativas de las reservas de agua y nivel freático

En términos generales, las variaciones del almacenamiento de agua terrestre incluyen los aportes de distintos componentes como el agua subterránea, la humedad del suelo, la nieve y el hielo. Luego, las variaciones relativas de las reservas de agua Δh_{GRACE} brindadas por la misión satelital GRACE para un determinado período se pueden expresar como (Rodell et al., 2007):

$$\Delta h_{GRACE} = \Delta NF + \Delta HS + \Delta NH, \quad (4.1)$$

donde ΔNF es la variación del almacenamiento de agua subterránea; ΔHS , la variación de la humedad del suelo en la zona no saturada y ΔNH es la variación de nieve y hielo expresada en su equivalente en agua.

Dada la ubicación geográfica de la zona de estudio, el último término de (4.1) no se tendrá en cuenta en el análisis, por lo que utilizaremos la siguiente ecuación:

$$\Delta h_{GRACE} = \Delta NF + \Delta HS. \quad (4.2)$$

El primer término del miembro derecho de la ecuación (4.2) puede ser calculado a partir de las variaciones del nivel freático (Yeh, et al., 2006):

$$\Delta NF = S_y \Delta h_{NF}, \quad (4.3)$$

donde S_y es la capacidad específica del suelo de la región y Δh_{NF} la variación del nivel freático con respecto a un valor estacionario. La capacidad específica representa la fracción de volumen de agua que puede ser drenado por gravedad en un acuífero libre y es igual a la porosidad menos la capacidad de campo. Finalmente, reemplazando (4.3) en (4.2) podemos expresar las variaciones relativas de las reservas de agua como:

$$\Delta h_{GRACE} = S_y \Delta h_{NF} + \Delta HS. \quad (4.4)$$

La ecuación (4.4) expresa una dependencia lineal entre las variables Δh_{GRACE} y Δh_{NF} . Luego si se dispone de una serie de datos de estas variables es posible estimar la capacidad específica S_y a partir de la pendiente de la recta (4.4) y el término ΔHS a partir de la ordenada al origen. El término ΔHS representa las variaciones de humedad del suelo con respecto a la humedad media de la zona no saturada y suele ser despreciable frente a las variaciones del nivel freático. Resulta importante remarcar que las variables Δh_{GRACE} , Δh_{NF} y ΔHS de la ecuación (4.4) son variaciones relativas con respecto a un valor medio o valor estacionario.

En este capítulo analizaremos los datos de GRACE en dos estaciones puntuales ubicadas en La Plata y Azul y los compararemos con mediciones de variaciones de los niveles freáticos. La ecuación (4.4) nos permitirá validar los resultados obtenidos con esta técnica satelital. En la interpretación de los resultados deberá tenerse en cuenta que los datos de la misión GRACE son de carácter regional mientras que los datos de niveles freáticos corresponden a medidas puntuales.

4.2. Interpolación de los datos de GRACE

Como vimos en el Capítulo 2, los datos de altura de agua equivalente son proporcionados en grillas globales de $1^\circ \times 1^\circ$. El primer paso para realizar el análisis propuesto consistirá en interpolar los valores de altura equivalente provistos por GRACE en las estaciones de medición de La Plata y Azul.

La interpolación se realizará de acuerdo con el esquema presentado en la Figura 4.1. La interpolación para el valor de la altura equivalente en las coordenadas de la estación (φ', λ') se calcula a partir de los valores de la grilla de coordenadas más próximas $h_{\varphi, \lambda}$; $h_{\varphi, \lambda+L}$; $h_{\varphi+L, \lambda}$ y $h_{\varphi+L, \lambda+L}$ (indicados en la Figura 4.1 con puntos negros). La fórmula de interpolación adoptada es la siguiente:

$$h_{\varphi', \lambda'}^i = \frac{1}{2} \left[h_{\varphi, \lambda+k}^i + \frac{j}{L} (h_{\varphi+L, \lambda+k}^i - h_{\varphi, \lambda+k}^i) + h_{\varphi+j, \lambda}^i + \frac{k}{L} (h_{\varphi+j, \lambda+L}^i - h_{\varphi+j, \lambda}^i) \right] \quad (4.5)$$

siendo

$$h_{\varphi, \lambda+k}^i = h_{\varphi, \lambda}^i + \frac{k}{L} (h_{\varphi, \lambda+L}^i - h_{\varphi, \lambda}^i), \quad (4.6)$$

$$h_{\varphi+L, \lambda+k}^i = h_{\varphi+L, \lambda}^i + \frac{k}{L} (h_{\varphi+L, \lambda+L}^i - h_{\varphi+L, \lambda}^i), \quad (4.7)$$

$$h_{\varphi+j, \lambda}^i = h_{\varphi, \lambda}^i + \frac{j}{L} (h_{\varphi+L, \lambda}^i - h_{\varphi, \lambda}^i), \quad (4.8)$$

y

$$h_{\varphi+j, \lambda+L}^i = h_{\varphi, \lambda+L}^i + \frac{j}{L} (h_{\varphi+L, \lambda+L}^i - h_{\varphi, \lambda+L}^i); \quad (4.9)$$

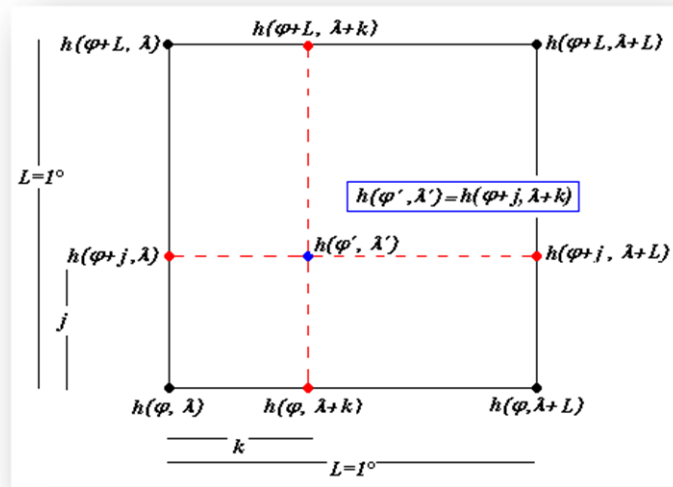


Figura 4.1. Esquema de interpolación para las coordenadas (φ', λ') .

donde el supraíndice i indica el período de 10 días considerado, $L=1^\circ$ es la distancia entre datos; $j = \varphi' - \varphi$ ($0^\circ \leq j \leq 1^\circ$) y $k = \lambda - \lambda'$ ($0^\circ \leq k \leq 1^\circ$).

Este procedimiento, como se mencionara en el Capítulo 3, se hizo de forma automatizada mediante un programa que interpola los valores de altura equivalente para las coordenadas seleccionadas para cada período de 10 días, durante los años 2008 y 2009.

La estación de Azul posee coordenadas de latitud $-36^\circ 46' 01''$ y longitud $-59^\circ 52' 52''$. Esta ubicación nos brinda una posición privilegiada para el estudio de la provincia de Buenos Aires, ya que se encuentra en el centro de la misma (Figura 3.1). Para esta estación se cuenta con un registro completo de niveles freáticos que nos permite realizar un análisis para la época comprendida entre el 30 de diciembre de 2007 y el 7 de enero de 2010. Esta época comprende 74 períodos de 10 días de la serie de datos de GRACE.

La estación de La Plata se localiza en las coordenadas de latitud $-34^\circ 54' 05''$ y longitud $-57^\circ 55' 09''$ (Figura 3.1). La serie de datos de niveles freáticos para esta estación no está completa y es por ello que la serie de datos de altura de agua equivalente se calculó desde el día 4 de diciembre de 2008 hasta el día 7 de enero de 2010, dando como resultado un total de 40 períodos de 10 días.

4.3. Datos del nivel freático

Los datos del nivel freático de la estación de Azul ubicada en el Campus Universitario fueron provistos por el Instituto de Hidrología de Llanuras Dr. Eduardo J. Usunoff (Varni et al., 2010). Los registros consisten en valores diarios de la cota del nivel freático respecto al nivel medio del mar. Para el análisis propuesto, se calcularon valores promedios cada 10 días en coincidencia con los períodos de los datos suministrados por la misión GRACE.

Para la estación de La Plata, las variaciones del nivel freático fueron registradas por el freatómetro dependiente del Departamento de Geofísica Aplicada de la FCAGLP (Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de La Plata); que entró en actividad el día 4 de diciembre del año 2008. En este caso, los registros consisten en variaciones milimétricas respecto a una profundidad arbitraria con una frecuencia de 10 minutos. Las mediciones debieron ser transformadas a al valor de cota del nivel freático respecto al nivel medio del mar y reducidas a un valor medio cada 10 días.

4. 4. Variaciones relativas de los datos de GRACE y de las mediciones de nivel freático

Las alturas de agua equivalente provistas por el Centro Nacional de Estudios Espaciales/Grupo de Investigación de Geodesia Espacial (CNES/GRGS) son variaciones relativas respecto a un valor medio de las reservas de agua que corresponde al promedio de toda la serie de datos disponibles de la misión GRACE (2002-2010). El análisis que realizamos involucra períodos de tiempos menores por lo que resulta conveniente referir las variaciones de la altura de agua equivalente y del nivel freático a valores medios correspondientes al período analizado.

Para referir las variaciones de la altura equivalente h_{GRACE}^i al valor medio de una serie compuesta por N datos realizamos el siguiente cálculo:

$$\Delta h_{GRACE}^i = h_{GRACE}^i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_{GRACE}^i, \quad i = 1, \dots, N; \quad (4.10)$$

En el caso de la estación de Azul $N=74$ siendo el valor medio calculado de -0,153 m. Para la serie de la estación de La Plata $N=40$ y el valor medio calculado es de -0,119 m.

Para referir los valores de nivel freático al valor medio de la serie se realiza un procedimiento análogo:

$$\Delta h_{NF}^i = h_{NF}^i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_{NF}^i, \quad i = 1, \dots, N; \quad (4.11)$$

donde h_{NF}^i son los valores promedios de las cotas del nivel freático determinadas cada 10 días. La serie del nivel freático para la estación de Azul tiene un valor medio de 127,248 m s.n.m mientras que la correspondiente a La Plata posee un valor medio de 2,547 m s.n.m.

4. 4. 1. Relación entre los datos de GRACE y el nivel freático para la estación de Azul

De acuerdo con la ecuación (4.4) existe una relación lineal entre las variaciones de la altura de agua equivalente y las variaciones de nivel freático. Para poder verificar en forma experimental esta relación graficaremos los valores de Δh_{GRACE}^i versus Δh_{NF}^i , obtenidos con las ecuaciones (4.10) y (4.11) respectivamente. En la Figura 4.2 se ilustra la relación entre estas variables para la estación de Azul durante el período comprendido entre el día 30 de diciembre de 2007 y hasta el día 7 de enero de 2010.

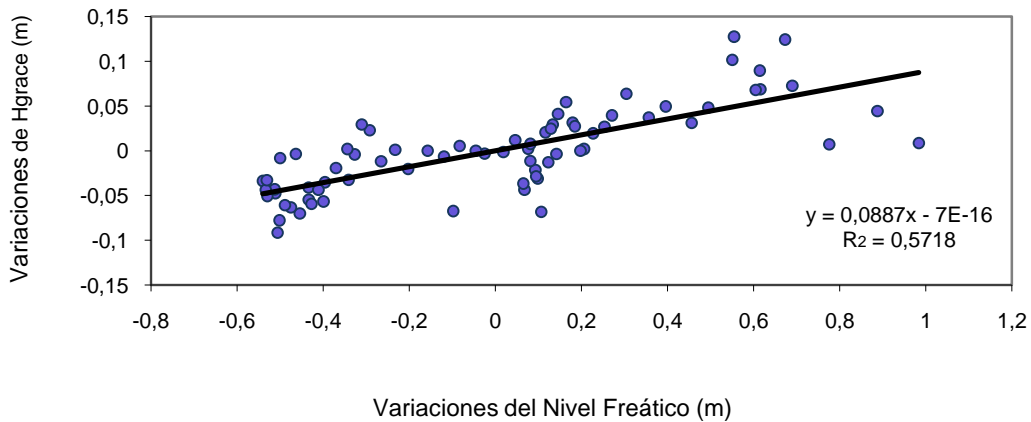


Figura 4.2 Relación lineal entre el nivel freático y la altura equivalente de agua provista por GRACE para la estación de Azul durante el período 2008- 2009.

Los datos de la series presentan una dispersión uniforme con una tendencia aproximadamente lineal de pendiente positiva que evidencia una clara correlación entre las variaciones de nivel freático medidas en la estación y los datos satelitales de GRACE. Una forma de caracterizar el comportamiento de esta relación es ajustar la ecuación de una recta a los datos observados (ver Figura 4.2). La pendiente de la recta de ajuste es 0,0887 y la ordenada al origen de $-7 \cdot 10^{-16}$ m, siendo el coeficiente de ajuste lineal $R^2=0,5718$.

Comparando estos valores con la expresión (4.4) podemos inferir los siguientes valores para la capacidad específica S_y y la variación relativa de la humedad del suelo ΔHS :

$$\begin{aligned} S_y &= 0,0887, \\ \Delta HS &= -7 \times 10^{-16} m. \end{aligned} \quad (4.12)$$

El valor estimado de capacidad específica para la región de estudio es similar al valor de 0.08 encontrado por Yeh y colaboradores en Illinois (USA) (Yeh et al., 1998) a partir de balances de agua mensuales, mientras que la variación de humedad del suelo resulta poco significativa. Esta forma de obtener la capacidad específica resulta novedosa ya que ha sido determinada *in situ* y por mediciones satelitales. Por otra parte, si se dispone de un valor de la capacidad de campo para la zona es posible estimar la porosidad como la suma de este valor más la capacidad específica estimada.

Otra forma de visualizar la correlación entre los datos es multiplicar la serie de Δh_{NF} por el factor de capacidad específica S_y para obtener las variaciones de almacenamiento de agua subterránea en la zona saturada ΔNF (ecuación 4.3). En la Figura 4.3 se ilustran las series ΔNF y Δh_{GRACE} para la época 2008-2009.



Figura 4.3 Variaciones de agua subterránea (NF) y de altura de agua equivalente provista por GRACE (H Grace) para la estación de Azul durante el período 2008- 2009.

La Figura 4.3 muestra que la serie de las variaciones de aguas subterráneas reproduce en forma más suave los cambios de altura equivalente de agua calculados con GRACE. Ambas series presentan una tendencia de pendiente negativa desde el comienzo del año 2008 hasta casi el final del año 2009, donde se registra una leve recuperación en coincidencia con la finalización del período de sequía.

Las variaciones de mayor frecuencia que se observan en la serie de datos de GRACE deben asociarse a la masa de agua que se encuentra en tránsito por la zona no saturada. Esta masa de agua es detectada por GRACE ni bien se produce la infiltración pero solo será detectada por el freatómetro cuando el agua llegue a la zona saturada. Durante el tránsito por la zona no saturada la masa de agua sufre un proceso de dispersión que hace que el ascenso de los niveles freáticos se produzca en forma suave. Como consecuencia de lo anterior existe un desfase entre la serie de datos de GRACE y las variaciones de aguas subterráneas detectadas por los freatógrafos que debe tenerse en cuenta a la hora de interpretar los resultados.

Las variaciones relativas en las reservas de agua obtenidas con GRACE poseen amplitudes que van de 0,127 m a -0,091 m, correspondiendo el valor mínimo al período de 10 días que comienza el 1 de agosto de 2009. En cuanto a las variaciones de las aguas subterráneas, las amplitudes oscilan entre 0,087 m y -0,048 m y el mínimo tiene lugar el período que comienza el 10 de septiembre de 2009. Como se vio en el Capítulo 3, las anomalías más significativas registradas en la región de estudio son las que tienen lugar en los períodos $i=22$ e $i=23$, del 1 al 20 de agosto (ver Figuras 3.4.22 y 3.4.23).

A partir de este análisis, podemos concluir que para la estación de Azul, las series presentan un mismo patrón de comportamiento, ya que los cambios más significativos de la serie de altura de agua equivalente son también evidenciados por la serie de variaciones de agua calculadas a partir de los niveles freáticos. En particular, el fenómeno de la sequía que afectara la zona durante el año 2009 hasta el mes de septiembre, queda evidenciado en las dos series a partir de la baja en los valores de las variaciones durante el año 2009 y su recuperación a partir de fines del mes de septiembre para el nivel freático y principios de octubre para la serie de datos de GRACE.

4. 4. 2. Relación entre los datos de GRACE y el nivel freático para la estación de La Plata

Para la estación de La Plata realizamos un análisis análogo al anterior durante el período comprendido desde el 4 de diciembre de 2008 y hasta el 7 de enero de 2010. En la Figura 4.4 se ilustra la relación entre los valores de Δh_{GRACE}^i y Δh_{NF}^i . Nuevamente se observa una dispersión uniforme de los datos con una tendencia aproximadamente lineal y de pendiente positiva que permite validar la ecuación (4.4).

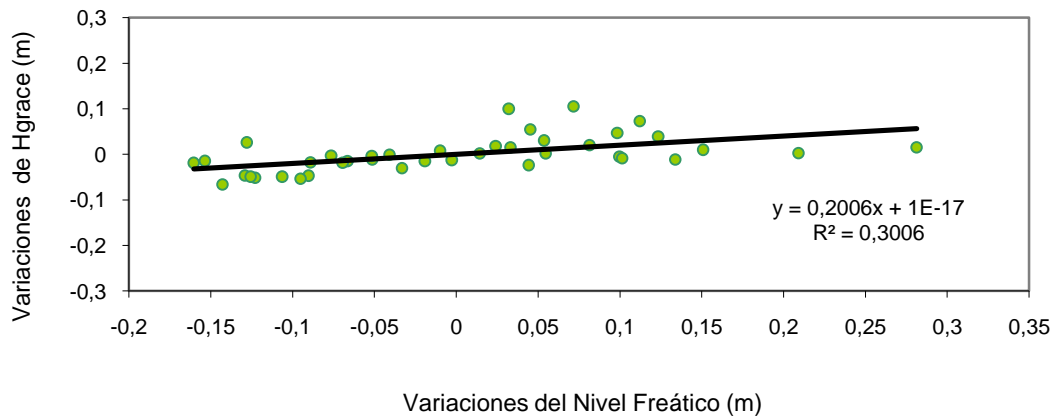


Figura 4.4. Relación lineal entre el nivel freático y la altura equivalente de agua provista por GRACE para la estación de La Plata durante el año 2009.

La recta de ajuste que se muestra en la Figura 4.4 tiene pendiente 0,2006 y ordenada al origen -4×10^{-17} , siendo el coeficiente de ajuste lineal $R^2=0,3006$. Al comparar estos valores con la expresión (4.4) podemos deducir los siguientes valores para la capacidad específica S_y y la variación relativa de la humedad del suelo ΔHS :

$$\begin{aligned} S_y &= 0,2006, \\ \Delta HS &= -4 \times 10^{-17} m. \end{aligned} \quad (4.13)$$

En este caso el valor estimado de la capacidad específica es algo elevado, y puede atribuirse al hecho de que la estación de La Plata se encuentra muy cercana al Río de La Plata. Los valores satelitales de GRACE no son puntuales sino que integran valores sobre una región extensa. En la estación de La Plata estos valores están afectados por la presencia del río por lo que la capacidad específica hallada correspondería al de un medio equivalente que tiene en cuenta la porosidad del suelo y la “porosidad” del río que es 1.

La Figura 4.5 muestra la serie Δh_{GRACE} y los valores correspondientes de agua subterránea obtenidos a partir de Δh_{NF} para el año 2009. En general, la serie de las variaciones de aguas subterráneas acompaña el patrón de comportamiento que presenta la serie de alturas de agua equivalente provista por GRACE durante todo el período.

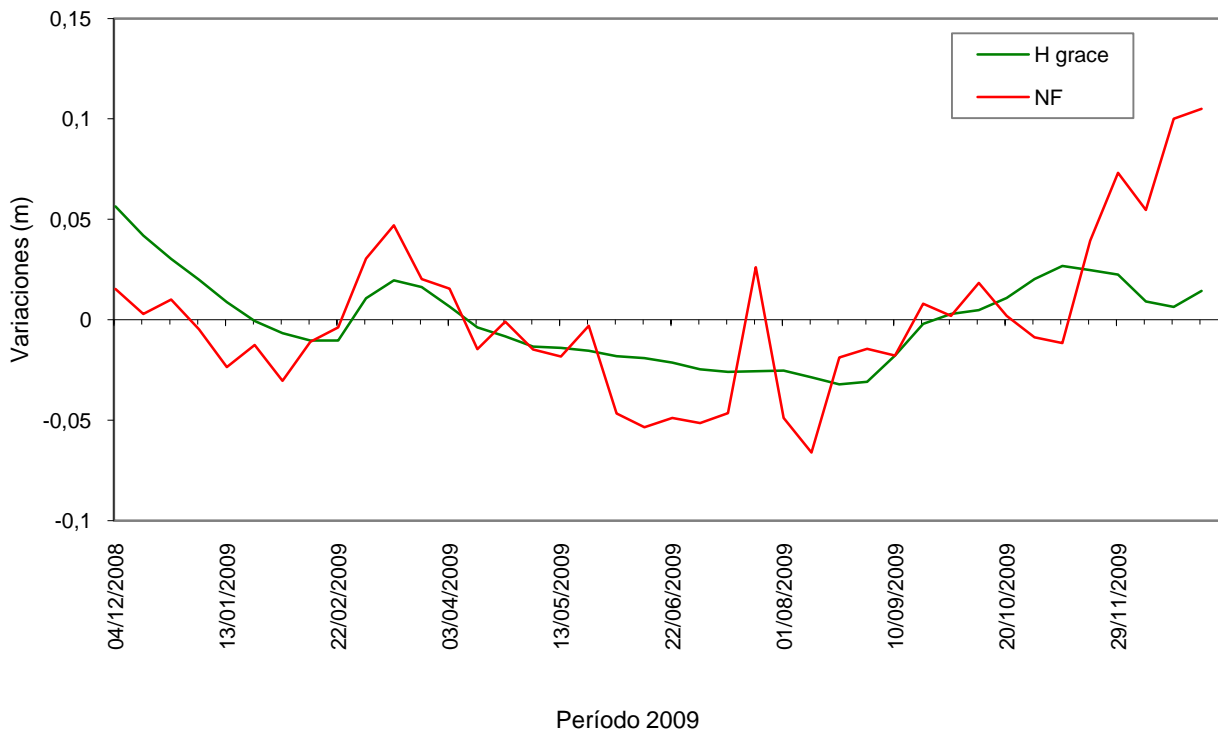


Figura 4.5. Variaciones de agua subterránea (NF) y de altura de agua equivalente provista por GRACE (H Grace) para la estación de La Plata durante el año 2009.

Si bien para esta estación no contamos con datos del año 2008, ambas series presentan al comienzo del período una caída de pendiente negativa que pone en evidencia que el fenómeno de descenso comenzó con anterioridad, tal como lo se observa en la estación de Azul. Las series presentan dos mínimos (en febrero y agosto) que se pueden correlacionar con fenómenos locales que han sido ampliamente reportados por los medios de comunicación.

El primer mínimo corresponde al mes de febrero de 2009. La serie de alturas de agua equivalente alcanza este mínimo durante el período de 10 días que comienza el 2 de febrero; para la serie de las variaciones de aguas subterráneas ocurre durante el período que comienza el 22 de febrero. En el Capítulo 3 se observa que en el mes febrero se inician los mayores descensos de las reservas de agua, afectando principalmente la zona noreste de la provincia (Figuras 3.4.4 a 3.4.6). Para esta época, el fenómeno de la sequía empieza a profundizarse y los medios de comunicación tanto locales^[1], como nacionales^[2] comienzan

¹ Nota del 06/02/2009 en el diario “El Día”: “La sequía en la Región (Gran La Plata)” (<http://www.eldia.com.ar/edis/20090206/20090206121457.htm#>).

² Nota del 08/02/2009 en el diario “Clarín”: “La sequía ya golpea a las ciudades y dicen que seguirá hasta abril” (<http://edant.clarin.com/diario/2009/02/08/sociedad/s-01854689.htm>).

a informar a cerca de la sequía en las zonas rurales del Gran La Plata y en la ciudad de La Plata.

Durante el período de 10 días que comienza el 22 de julio, la serie de alturas de agua equivalente presenta un máximo. La ocurrencia de este máximo coincide con el período para el cual se observa una mejoría en la reservas de agua, particularmente en la zona este de la provincia (ver Figura 3.4.21). En la serie de las variaciones de aguas subterráneas este incremento se reproduce de forma muy suave.

En el mes de agosto se observa el segundo mínimo de ambas series. Para la serie de alturas de agua equivalente se registra durante el período que comienza el 11 de agosto con un valor de -0,66 m que, como ilustra la Figura 3.4.23, es cuando el fenómeno de la sequía tiene su mayor impacto. Para la serie de las variaciones de aguas subterráneas el mínimo se registra un tiempo después, durante el período que comienza el 31 de agosto con un valor de -0,031 m. A partir del mes de septiembre las series presentan una recuperación de sus valores, que se condice con la finalización del fenómeno de la sequía. La presencia de los mínimos de las series durante el mes de agosto y la tendencia creciente a partir del mes de septiembre muestran una similitud con lo observado en la estación de Azul que nos permite concluir que el fenómeno fue de naturaleza regional.

Para la estación de La Plata se cuenta con valores de precipitación de la estación meteorológica de la FCAGLP. La serie de datos calculada es un valor promedio de las precipitaciones cada 10 días; coincidente con los $N=40$ períodos para los que se cuenta con los datos de alturas equivalentes de agua.

Para la estación de La Plata se cuenta además con valores diarios de precipitación de la estación meteorológica de la FCAGLP. Para poder comparar estos datos con los de la serie de GRACE calculamos valores promedios de las precipitaciones para los 40 períodos de 10 días de la serie. En la Figura 4.6 se ilustran los valores medios de precipitación junto con las variaciones relativas de la altura de agua equivalente y del agua subterránea.

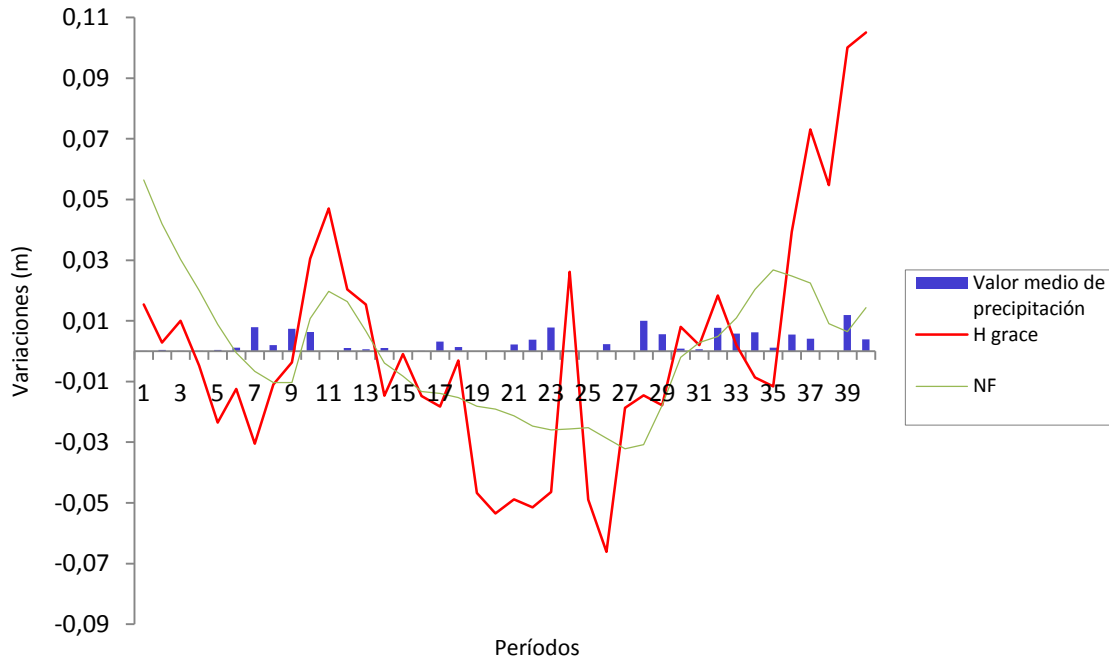


Figura 4.6. Valor medio de la precipitación, variaciones del agua subterránea y de altura de agua equivalente provistas por GRACE durante los $N=40$ períodos para la estación de La Plata.

En líneas generales se observa que luego de registrarse las precipitaciones, las series de las alturas de agua equivalente de GRACE y de las aguas subterráneas presentan alzas en sus registros con cierto desfase. Por otra parte, cuando no se registran precipitaciones y sólo hay pérdida de masa de agua por el efecto de evapotranspiración también se advierte con un cierto retardo una disminución de los valores en ambas series.

Finalmente resulta oportuno destacar que el carácter regional del fenómeno de la sequía observado en el Capítulo 3 a partir de los datos de GRACE también queda de manifiesto en los descensos de los niveles freáticos observados en las estaciones de Azul y La Plata.

Capítulo 5

Conclusiones

En el presente trabajo de tesis se ha analizado la sequía que tuvo lugar en la provincia de Buenos Aires durante el año 2009 utilizando una técnica satelital basada en mediciones de variaciones temporales de gravedad. Este fenómeno afectó sensiblemente la economía local ya que ocurrió en la principal región agrícola-ganadera del país y ha sido considerada como la peor sequía de los últimos 50 años. Se han elaborado numerosos informes que estudian el impacto principalmente sobre la agricultura y algunos factores climáticos particulares. El descenso de los niveles freáticos en pozos y la disminución de los cuerpos superficiales de agua en la región han sido reportados por distintos medios periodísticos pero no existen trabajos científicos que analicen estos efectos a escala regional. En este trabajo se analizó precisamente el efecto que produjo la sequía sobre las reservas de aguas.

La misión espacial GRACE provee una metodología que permite analizar en forma regional las variaciones de las reservas de agua. Esta metodología nos permitió realizar un análisis de la evolución espacial de la sequía en la provincia de Buenos Aires identificando las zonas y los períodos más críticos que pudieron correlacionarse con fenómenos puntuales reportados por informes técnicos o artículos periodísticos. Las variaciones de las reservas de aguas obtenidas con GRACE fueron validadas con datos de campo en dos estaciones de la provincia de Buenos Aires (La Plata y Azul). Los datos de campo consisten en mediciones de las variaciones de nivel freático que muestran una correlación aproximadamente lineal con los datos satelitales. La comparación de estos datos con los datos satelitales permitió además establecer un valor de la capacidad específica del suelo para la estación de Azul que es similar al obtenido con otra metodología de cálculo.

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran la utilidad y la potencialidad de la misión espacial GRACE para analizar las variaciones de las reservas de agua subterráneas a escala regional. Resulta importante destacar que la intensidad de una sequía no sólo depende de las condiciones climáticas particulares sino también de las reservas de agua existentes en la región. La mayoría de las técnicas satelitales se basa en imágenes que permiten caracterizar variables superficiales o de muy poca penetración en el terreno, en este sentido debe destacarse que GRACE es la única técnica satelital que puede utilizarse para el monitoreo de aguas subterráneas.

Referencias

- Biancale, R., Lemoine, J.M., Balmino, G., Bruinsma, S., Perosanz, F., Marty, J.C. (CNES/GRGS, Toulouse, France), Loyer, S., Bourgogne S. (Noveltis, Toulouse, France), Gégout, P. (EOST, Strasbourg, France), 2010. 7 years of gravity variations from GRACE and LAGEOS data from CNES/GRGS. (<http://grgs.obs-mip.fr/index.php/fre/Donnees-scientifiques/Champ-de-gravite/grace/release02>).
- Borda, M., Gonzalez Ferrin, S., 2009. La sequía y su perjuicio al agro. Compilación de informes relacionados al tema. Informe Estación Experimental Agropecuaria Bordenave. INTA.
- Chambers, D.P., Wahr, J., Nerem, R.S., 2004. Preliminary observations of global ocean mass variations with GRACE. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L13310, doi: 10.1029/2004GL020461.
- Chao, B.F., Gross, R.S., 1987. Changes in the Earth's rotation and low-degree gravitational field induced by earthquakes. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 91, 569-596.
- Chao, B. F., Gross, R. S., 1994. The geoid and Earth rotation. *Geoid and Its Geophysical Interpretation*. P 285-298, CRC Press.
- Chen, J. L., Wilson, C. R., Blankenship, B. D., Young, D., 2008. Antarctic regional ice loss rates from GRACE. *Earth and Planetary Science Letters* 266: 140- 148.
- Chen, J. L., Wilson, C. R., Tapley, B. D., Grand, S., 2007. GRACE detects coseismic and postseismic deformation from the Sumatra-Andaman earthquake. *Res. Lett.*, 34(13) L13302, doi: 10.1029/2007GL030356.
- Farrell, W.E., 1972. Deformation of the Earth by surface loading. *Rev. Geophys.*, 10,761-797.
- Guarracino, L., Tocho, C., Monachesi, L., Cesanelli, A., 2009. Variaciones del almacenamiento integrado de aguas superficiales y subterráneas en Sudamérica a partir de datos gravimétricos satelitales. *Actas del VI Congreso Argentino de Hidrogeología*, 9 páginas.
- Heiskanen, Moritz, 1967. *Physical Geodesy*. W. H. Freeman and Company, San Francisco.
- Hofmann-Wellenhof, B., Moritz, H., 2005. *Physical Geodesy*. Editorial Springer. 403 Páginas. ISBN 3211235841.
- Marini, F., 2009a. Evolución de la superficie ocupada por agua en el dique Paso de Las Piedras durante 2008. Informe Técnico Laboratorio de Teledetección y SIG. Estación Experimental Agropecuaria Bordenave. INTA.
- Marini, F., 2009b. Panorama climático en el área de influencia de la EEA Bordenave. Evolución del índice verde desde el 18 de diciembre de 2008 al 24 de mayo de 2009. Informe Técnico Laboratorio de Teledetección y SIG. Estación Experimental Agropecuaria Bordenave. INTA.

- Marini, F., 2009c. Sequía en el área de influencia de la EEA Bordenave Evolución del índice verde durante 2009. Combinación de elevadas temperaturas y escasas precipitaciones. Informe Técnico Laboratorio de Teledetección y SIG. Estación Experimental Agropecuaria Bordenave. INTA.
- Marini, F., 2009d. Superficie del Dique Paso de las Piedras actualizada al 23 de setiembre de 2009 en base a imágenes satelitales. Informe Técnico Laboratorio de Teledetección y SIG. Estación Experimental Agropecuaria Bordenave. INTA.
- Marini F., 2010. Oscilaciones en la superficie del Dique Paso de las Piedras entre noviembre de 2009 y abril de 2010. Estudio en base a imágenes satelitales. Informe Técnico Laboratorio de Teledetección y SIG. Estación Experimental Agropecuaria Bordenave. INTA
- Marini, F., Vernanzi, S., 2010. Estudio de la disminución de los cuerpos lagunares en el partido de Puan durante la sequía 2008-2009 mediante aplicación de imágenes satelitales. Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario del 31 de mayo al 4 de Junio de 2010.
- Pérez, D., Guarracino, L., Tocho, C., 2009. Variaciones temporales del almacenamiento global de agua en los hemisferios Norte y Sur a partir de datos gravimétricos de la misión espacial GRACE. Presentado en la XXIV Reunión Científica de la Asociación de Geofísicos y Geodestas, 14 al 17 de Abril de 2009, Mendoza, Argentina.
- Ramillien, G., Frappart, F., Cazenave, A., 2005. Time variations of land water storage from an inversion of 2 years of GRACE geoids. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 235 (1-2), 283-301.
- Rodell, M., Chen, J., Kato, H. Famiglietti, J.S., Nigro J., Wilson C.R., 2007. Estimating groundwater storage changes in the Mississippi River basin (USA) using GRACE *Hydrogeology J.* 15(1), 159-166, doi: 10.1007/s10040-006-0103-7.
- Rodell, M., Velicogna, I., Famiglietti J.S., 2009. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. *Nature*, 460: 999-1002.
- Schmidt, Schwintzer, R. P., Flechtner, F., Reigber, Ch., Günter, A., Döll, P., Ramillien, G., Cazenave, A., Petrovic, S., Jochmann, H., Wünsch, J., 2006. GRACE Observations of changes in continental water storage. *Global and Planetary Change*, 50:112-126.
- Sietz, F., Schmidt, M., Shum, C. K., 2008. Signals of extreme weather conditions in Central Europe in GRACE 4-D hydrological mass variations. *Earth and Planetary Science Letters* 268, p 165-170.
- Swenson, S., Wahr, J., 2006. Post-processing removal of correlated errors in GRACE data. *Geophys Res Lett* 33:L08402. DOI 101029/2005GL025285.
- Tocho, C., Guarracino, L., Monachesi, L., Cesanelli, A., Antico, P., 2009. Seasonal variability of land water storage in South America using GRACE data. *Proceedings de la Reunión Científica "Geodesy for Planet Earth", IAG 2009*, Buenos Aires, Argentina, en prensa.
- Varni, M., Comas, R.,Weinzettel, P, Dietrich, S., 2010. Análisis de 18 años de registros diarios de nivel freático en la zona central de la Cuenca del Arroyo de Azul, Buenos

Aires, Argentina. Actas del Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, Azul, Buenos Aires, Argentina.

Wahr, J., Molenaar, M., 1998. Time variability of the Earth's gravity field: hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *J. Geophys. Res.* 103 (B12) 30205– 30229.

Yeh, P., Irizarry, M., Eltahir, E., 1998. Hydroclimatology of Illinois: A comparison of monthly evaporation estimates based on atmospheric water balance with estimates based on soil water balances. *J. Geophysic. Res.* 103 (D16), 19823 – 19837.

Yeh, P., Swenson, S.C., Famigliatti, J.S, Rodell, M., 2006. Remote sensing of groundwater storage changes in Illinois using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE). *Water Resources Research*, Vol. 42, W12203, doi: 10.1029/2006WR005374.