



Aportes de las misiones espaciales gravimétricas a los nuevos modelos geopotenciales: *Evaluación de los Modelos Geopotenciales EGM2008 y EIGEN 6C4 para Santiago del Estero*

Infante, Claudia⁽¹⁾; Galván, Lucrecia⁽¹⁾; Goitea, Iber⁽¹⁾; Duro, Javier⁽¹⁾; González Heffner, Julieta⁽²⁾; Llanos, Melina⁽²⁾; y Orieta, Jorge⁽²⁾

(1) Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías, Universidad Nacional de Santiago del Estero.
cinfante@unse.edu.ar/ claudia.nfnt@gmail.com/lgalván@unse.edu.ar/ihgoi@unse.edu.ar.

(2) Estudiantes de Ing. en Agrimensura. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías, Universidad Nacional de Santiago del Estero. ju_li_90@hotmail.com/

RESUMEN

El desarrollo de la geodesia espacial ha permitido un mejor conocimiento del campo gravitacional terrestre a escala global y regional. Las últimas misiones satelitales gravimétricas, tales como CHAMP (CHALLENGING Mini-satellite Payload), GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) y GOCE (Gravity Field and Steady State Ocean Circulation Explorer), con satélites de órbita baja, diseñados principalmente para monitorear el campo gravitacional terrestre, han contribuido al conocimiento más preciso del mismo, y en consecuencia se han desarrollado Modelos Geopotenciales Globales (MGG) de alta resolución espacial y precisión, debido a sus menores errores de omisión y comisión. Existen diferentes tipos de modelos geopotenciales según la naturaleza de los datos considerados en su cálculo: solo satélite, solo datos terrestres o combinados (datos de satélite más terrestres). Estos últimos son los MGG que logran la mayor resolución espacial porque incorporan además de datos satelitales, numerosas fuentes de datos de gravedad terrestre (tierra, mar y aire). La larga longitud de onda de los modelos resulta más preciso gracias al aporte de los datos satelitales, como análisis de las orbitas y sus perturbaciones provocadas por las anomalías de las masas terrestres; la altimetría satelital que proporciona información fundamental sobre la altura de los océanos y datos de las misiones espaciales gravimétricas. Estas características justifican el interés en analizar su comportamiento a escalas regionales o provinciales (Hirt, 2011; Pavlis, 2008; Introcaso 2006; Del Cogliano 2006; Galván et al., 2014; Infante, 2013).

Se aborda en particular, en el presente trabajo, el estudio y evaluación de los MGG EGM2008 (Pavlis, et al., 2008) y EIGEN 6C4 (Förste, et al., 2014) para el territorio de la provincia de Santiago del Estero. En particular EIGEN 6C4 incorpora datos de la misión gravimétrica GOCE completa. La evaluación se realiza por comparación entre anomalías gravimétricas de aire libre y Bouguer en puntos de la red de nivelación de alta precisión del Instituto Geográfico Nacional (IGN). La desviación estándar de los residuos de las anomalías gravimétricas de aire libre es de 4,51 [mGal] y 4,57 [mGal] para los modelos EGM2008 y EIGEN 6C4, respectivamente; mientras que cuando consideramos las anomalías de Bouguer los residuos toman valores de desviación estándar de 3,87 [mGal] y 3,94 [mGal] respectivamente. Se analiza la correlación de las anomalías gravimétricas con la topografía de la región. Como resultado de este análisis se produce un mapa de anomalías gravimétricas de aire libre y Bouguer a escala regional para la provincia. Se prevén como tareas futuras el análisis del estado isostático de estructuras geológicas identificadas en la provincia a partir del análisis de anomalías de aire libre y Bouguer.



PALABRAS CLAVE: Modelos Geopotenciales Globales; EGM2008; EIGEN 6C4; Anomalías de Aire Libre, Anomalías de Bouguer.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la geodesia espacial gravimétrica ha permitido un mejor conocimiento del campo gravitacional terrestre a escala global y regional. Estos importantes avances han propiciado la aparición de Modelos Geopotenciales Globales (MGG) más precisos y con mejores resoluciones espaciales, lo que se traduce en modelos con menores errores de comisión y omisión. Estas características justifican el interés en analizar su comportamiento a escalas regionales o provinciales. Los MGG describen el campo de gravedad global de la Tierra y se expresan principalmente en términos de coeficientes armónicos esféricos. Existen diferentes tipos de modelos geopotenciales según la naturaleza de los datos considerados en su cálculo: solo satélite, solo datos terrestres o combinados (datos de satélite más terrestres). Estos últimos son los MGG que logran la mayor resolución espacial porque incorporan además de datos satelitales, numerosas fuentes de datos de gravedad terrestre (tierra, mar y aire). La larga longitud de onda de los modelos resulta mas preciso gracias al aporte de los datos satelitales, como análisis de las orbitas y sus perturbaciones provocadas por las anomalías de las masas terrestres; la altimetría satelital que proporciona información fundamental sobre la altura de los océanos y datos de las misiones espaciales gravimétricas, tales como las misiones de GFZ CHAMP (CHAllenging Mini-satellite Payload), GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) y GOCE (Gravity Field and Steady State Ocean Circulation Explorer); (Förste, 2014; Hirt, 2011; Pavlis, 2008; Kotsakis 2008; Introcaso 2006; Del Cogliano 2006; Galván et al., 2014; Infante, 2013).

Se aborda en particular, en el presente trabajo, el estudio y evaluación de los MGG EGM2008 (Pavlis, et al., 2008) y EIGEN 6C4 (Förste, et al., 2014) para el territorio de la provincia de Santiago del Estero por ser los MGG de mayor resolución espacial de libre. En particular EIGEN 6C4 incorpora datos de la misión gravimétrica GOCE completa. La evaluación se realiza por comparación con datos terrestres gravimétricos de la red de nivelación de alta precisión del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Se analizan las variaciones de las anomalías gravimétricas de Bouguer derivadas del MGG para el territorio de la provincia, y su relación con la topografía. Se prevén como tareas futuras el análisis del estado isostático de estructuras geológicas identificadas en la provincia a partir del análisis de anomalías de aire libre y Bouguer.

POTENCIAL DEL CAMPO DE GRAVEDAD

El conocimiento del campo de gravedad terrestre es fundamental para las Ciencias de la Tierra en general y para la Geodesia en particular debido a que prácticamente todas las observaciones geodésicas están vinculadas al mismo. Resulta conveniente representar el campo de gravedad terrestre a través de una magnitud escalar llamada potencial V . El potencial gravitacional terrestre V es producido por efecto de las masas terrestres y se determina a través de la expresión (1).

$$V = G \iiint \frac{dm}{r} \quad (1)$$

Siendo G la constante gravitacional, dm el elemento de masa y r la distancia geocéntrica. El mayor inconveniente de esta ecuación es el desconocimiento de la distribución de densidad de



masa en el interior de la tierra. En consecuencia para evaluar el potencial gravitacional será necesario recurrir a mediciones vinculadas al campo exterior del planeta. Usualmente la expresión $1/r$ del integrando de la ecuación (2) se desarrolla en términos de armónicos esféricos:

$$V = \frac{GM}{r} \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n \left(\Delta C_{nm} \cos .m\lambda + \Delta S_{nm} .sen.m\lambda \right) \bar{P}_{nm}(\cos \vartheta) \right] \quad (2)$$

Siendo n: grado y m: orden del desarrollo en serie. Se denota con: r la distancia geocéntrica, M la masa de la Tierra más la Atmósfera, a semieje mayor del elipsoide de referencia, \bar{P}_{nm} las funciones asociadas de Legendre normalizadas, C_{nm} y S_{nm} los coeficientes armónicos esféricos, ϑ la colatitud y λ la longitud.

El desarrollo en serie del potencial V, expresado según (2) representa una descomposición espectral en longitudes de onda. La longitud de onda asociada con el desarrollo al grado y orden n, es:

$$\kappa = \frac{360}{n} 111 km \quad (3)$$

Que corresponde a una resolución de $180^\circ/n$. El modelo geopotencial queda definido por el conjunto de coeficientes armónicos esféricos normalizados C_{nm} y S_{nm} de la ecuación (2) los cuales son determinados observacionalmente. A partir del modelo definido por (2) cualquier magnitud del potencial terrestre puede ser calculada (Del Cogliano, 2006).

ANOMALÍAS GRAVIMÉTRICAS

La anomalía de la gravedad Δg se define como la diferencia entre la gravedad observada **g** en P sobre el geoide o reducida al geoide y la gravedad normal (o teórica) γ en Q sobre el elipsoide (Heiskanen y Moritz, 1967, Hofmann y Moritz, 2005):

$$\Delta g = g_P - \gamma_Q \quad (4)$$

Siendo Δg la anomalía gravimétrica, g_P la gravedad en el geoide y γ_Q la gravedad normal sobre el elipsoide (Figura 1).

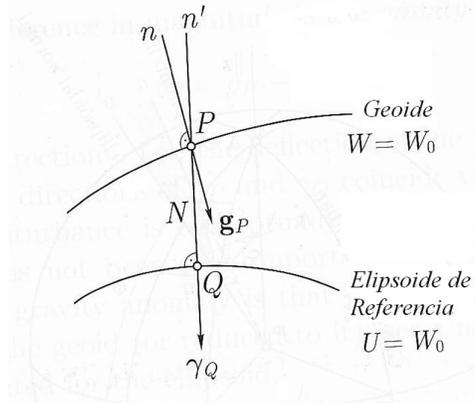


Figura 1. Anomalía de la gravedad [Hofmann-Wellenhof, B.& Moritz, H, 2005]

La anomalía gravimétrica obtenida en (4) se conoce como anomalía de aire libre pues se obtiene aplicando la corrección de aire libre al valor de la gravedad observada para reducirla al geode. La reducción o corrección de aire libre sólo considera el efecto de la diferencia de altura entre el punto de observación y el geode sin considerar el efecto de las masas.

Los modelos geopotenciales definidos según la expresión (2) permiten determinar cualquier magnitud del potencial. El valor de la anomalía gravimétrica de aire libre se obtiene a partir de la expresión (2) mediante la expresión (5).

$$\Delta g = \frac{GM}{r^2} \left[\sum_{n=2}^{\infty} (n-1) \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n \left(\Delta C_{nm} \cos m\lambda + \Delta S_{nm} \sin m\lambda \right) P_{nm}(\cos \vartheta) \right] \quad (5)$$

Las anomalías de aire libre sólo consideran la variación de la gravedad con la altura y la variación por latitud pero no tienen en cuenta la masa interpuesta entre la estación y la superficie de referencia. El efecto gravimétrico de la masa topográfica contenida entre la estación y el geode puede modelarse utilizando la atracción de una placa infinita o de una capa esférica, ambas de densidad constante.

Las anomalías de Bouguer Δg_B remueven las masas topográficas existentes entre la estación y el geode y se calculan mediante la siguiente fórmula (Barthelmes, F. 2002):

$$\Delta g_B = \Delta g - \delta g_B \quad (6)$$

donde, δg_B es el efecto gravimétrico de las masas topográficas y se calcula mediante un valor que se denomina corrección de Bouguer.

La corrección de Bouguer considera el efecto gravimétrico de las masas topográficas entre la estación P y el geode P_0 y se calcula tradicionalmente, suponiendo que la masa entre el datum vertical (geode) y la estación puede ser representada por una lámina o placa horizontal infinita con espesor igual a la altura H de la estación (Figura 2).

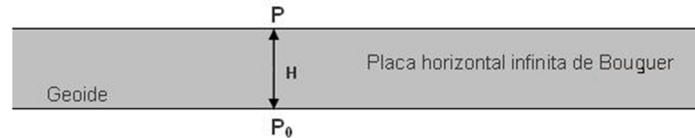


Figura 2. Placa horizontal infinita de Bouguer [Hofmann-Wellenhof, B.& Moritz, H, 2005].

El efecto gravimétrico δg_B de la placa plana se calcula con la ecuación (7) (Heiskanen y Moritz, 1967; Hofmann y Moritz, 2005):

$$\delta g_B = 2\pi G \rho H = 4.193 \times 10^{-5} \rho H, \quad (7)$$

donde la constante gravitacional G es $6.673 \pm 0.001 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1} \text{ s}^{-2}$ (Mohr y Taylor, 2001), ρ es la densidad de la placa horizontal en gramos por centímetros cúbicos y H es el espesor de la placa plana horizontal en metros. Si consideramos que la densidad estándar para la corteza ρ es de 2.67 g/cm^3 , entonces la corrección de Bouguer resulta:

$$\delta g_B = 2\pi G \rho H = 0.1119H, \quad (8)$$

donde H se expresa en metros y δg_B en miligales. Las anomalías gravimétricas de aire libre reflejan la topografía, mientras que las anomalías de Bouguer eliminan su efecto y reflejan la estructura interna de la corteza.

EL MODELO GEOPOTENCIAL EGM 2008

El modelo geopotencial EGM2008 (Pavlis, N., 2008) ha sido liberado por la NGA (National Geospatial-Intelligence Agency). Este modelo combina datos de la misión espacial GRACE más datos de altimetría satelital sobre los océanos y gravimetría de la superficie terrestre.

GRACE es un proyecto común entre la NASA de EUA y el DLR de Alemania, y ha sido desarrollado sobre la experiencia de la misión CHAMP del GFZ. Consta de dos satélites espaciales idénticos (GRACE 1 y GRACE 2) que siguen la misma órbita polar de 500 km sobre la Tierra, están separados una distancia entre 150 a 300 km (ajustable mediante maniobras) y transmiten en la banda K (18-27 GHz). El primer objetivo de la misión es proporcionar mediciones del campo gravitacional terrestre y en consecuencia estimaciones de modelos globales de alta resolución y precisión.

Este modelo se utilizó a los fines de la evaluación ya que desde su aparición (2008) ha sido analizado y evaluado en todo el mundo, resultando el modelo global de mayor precisión y resolución disponible hasta el presente.

EL MODELO GEOPOTENCIAL EIGEN 6C4

El modelo EIGEN 6C4 (European Improved Gravity model of the Earth by New techniques), (Förste, et al., 2014) es un modelo del campo gravitacional terrestre combinado hasta el grado 2190, en término de armónicos esféricos. La versión EIGEN-6, es el primer modelo de campo de gravedad global combinado que contiene la serie de datos completa de GOCE.

La misión gravimétrica GOCE (2009/2013) desarrollada por la Agencia Espacial Europea (ESA) es la primera misión satelital gravimétrica que contiene instrumentos capaces de monitorear variaciones



del campo gravitacional por gradiometría. Entre los objetivos de la misión se estableció la determinación de las anomalías del campo gravitatorio terrestre con una precisión de 10^{-5}m/s^2 . La solución de EIGEN-6C4 se obtuvo a partir de una combinación de datos de GOCE, LAGEOS, y GRACE, e incrementada con los datos de gravedad en superficie DTU10 que completan hasta el grado y el orden 1440 (correspondiente a la resolución espacial 14 km). Los coeficientes armónicos esféricos de las longitudes de onda más cortas se obtuvieron de un bloque de ecuación normal diagonal de sólo los datos terrestres. La nueva versión EIGEN 6C4 (2014) se ha completado con el grado 2190 (correspondiente a aproximadamente 9 km de resolución espacial en superficie).

ZONA DE ESTUDIO Y DATOS UTILIZADOS

La zona de trabajo abarca la provincia de Santiago del Estero, comprendida entre los paralelos de -25,5° y -30° de latitud Sur, y entre los meridianos de -61,5° y -65° de longitud Oeste.

En el presente trabajo se utilizaron anomalías gravimétricas de aire libre y Bouguer de los modelos EGM2008 y EIGEN- 6C4 en una grilla de puntos cada 10 minutos de arco para todo el territorio de la provincia. Para la zona de estudio seleccionada resultó un total de 7300 puntos ordenados en una matriz de 100 filas por 73 columnas. Estos valores fueron calculados para el grado y orden máximo de cada modelo.

Para la evaluación de los modelo con datos terrestres se utilizaron 775 puntos con gravedad medida correspondientes a los Puntos Fijos Altimétricos (PFA) de la red de nivelación de alta precisión del Instituto Geográfico Nacional (IGN) ubicados en la provincia de Santiago del Estero.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la evaluación se compararon las anomalías gravimétricas de aire libre y Bouguer provenientes de los modelos EGM 2008 y EIGEN-6C4 con las correspondientes a los PFA. Para ello se determinaron las diferencias entre las anomalías gravimétricas calculadas a partir de datos IGN y las homónimas obtenidas de los GGM.

Las anomalías gravimétricas de aire libre y Bouguer en los PFA se determinaron mediante las ecuaciones (4) y (8) respectivamente. El resumen estadístico de los valores obtenidos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.- Resumen estadístico de la anomalía gravimétricas de aire libre y Bouguer calculadas en puntos IGN

Anomalías Gravimétricas	$\Delta g_{AAL-IGN}$	Δg_{B-IGN}
Máximo [mGal]	72,02	27,03
Mínimo [mGal]	-142,71	-151,95
Promedio [mGal]	7,02	-16,49
Desv. estándar[mGal]	$\pm 19,01$	$\pm 18,85$

Para la evaluación de las anomalías de los modelos se calcularon los residuos mediante las ecuaciones (9) y (10):

$$\Delta g_{AAL-Res} = \Delta g_{AAL-IGN} - \Delta g_{AAL-GGM} \quad (9)$$

Donde $\Delta g_{AAL-Res}$ es la diferencia o residuo de la anomalía gravimétrica de aire libre, $\Delta g_{AAL-IGN}$ es la anomalía gravimétrica de aire libre calculada en los puntos IGN y $\Delta g_{AAL-MGG}$ es la anomalía gravimétrica de aire libre de los modelos EGM2008 y EIGEN 6C4, respectivamente.

Asimismo se determinaron los residuos de las anomalías gravimétricas de Bouguer:

$$\Delta g_{B-Res} = \Delta g_{B-IGN} - \Delta g_{B-MGG} \quad (10)$$

Donde Δg_{B-Res} es la diferencia o residuo de la anomalía gravimétrica de Bouguer, Δg_{B-IGN} es la anomalía gravimétrica de Bouguer en los puntos IGN y Δg_{B-MGG} es la anomalía gravimétrica de Bouguer de los modelos EGM2008 y EIGEN 6C4, respectivamente. El resumen estadístico de los residuos se muestra en la Tabla 2.

Los resultados muestran un buen ajuste general de ambos modelos con una desviación estándar en el orden de los $\pm 4,5$ mGal, teniendo un mejor ajuste el modelo EGM2008.

Del mismo modo se evaluaron las diferencias entre las anomalías de Bouguer, siendo la desviación estándar del orden de los 3,9 mGal, con mejor ajuste el modelo EGM2008.

Tabla 2.- Resumen estadístico de la anomalía gravimétricas residuales evaluadas en puntos IGN

Residuos	$\Delta g_{AAL-Res}$ EGM2008	$\Delta g_{AAL-Res}$ EIGEN6C4	Δg_{B-Res} EGM2008	Δg_{B-Res} EIGEN6C4
Máximo [mGal]	17,79	16,41	10,85	12,18
Mínimo [mGal]	-32,04	-33,91	-27,65	-29,13
Promedio [mGal]	-0,87	-0,86	-0,62	-0,62
Desv. estándar[mGal]	$\pm 4,51$	$\pm 4,57$	$\pm 3,87$	$\pm 6,95$

A fin de analizar la variación espacial de las anomalías gravimétricas se realizó un trazado de isoanómalas gravimétricas de aire libre y Bouguer de ambos modelos sobre un mapa topográfico de la provincia (Figuras 3 y 4).

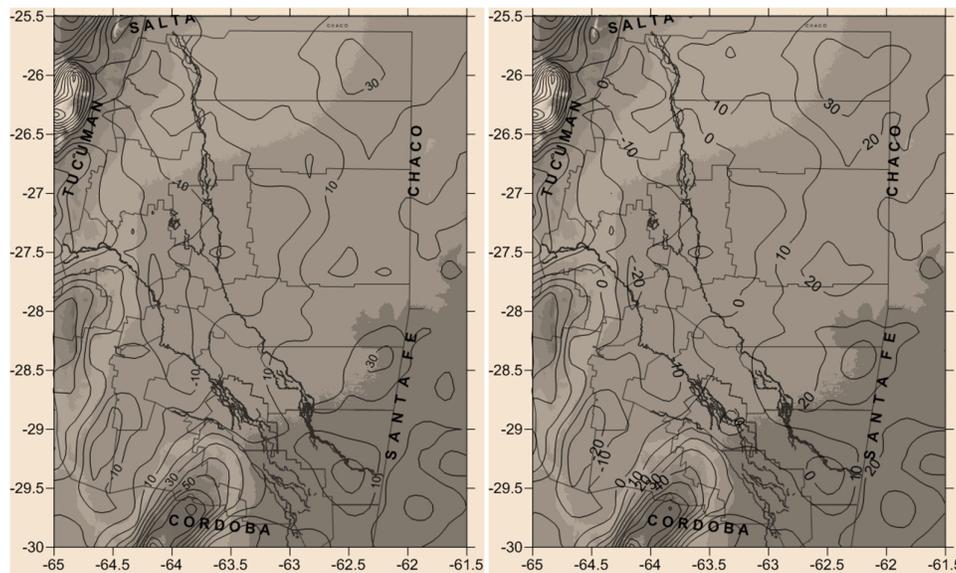


Figura 3. Isoleñas de anomalías gravimétricas de aire libre para Santiago del Estero. Izquierda: modelo EGM2008. Derecha: Modelo EIGEN 6C4

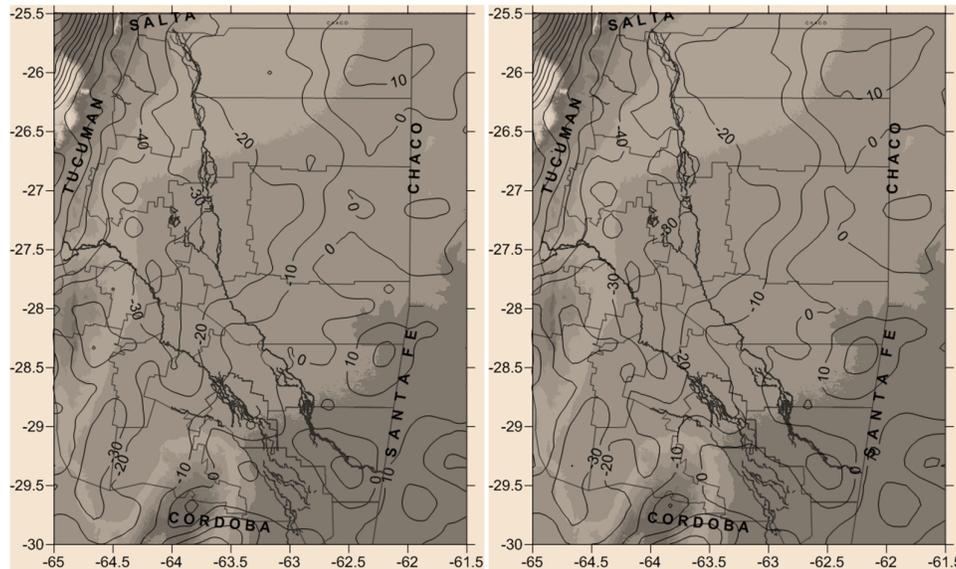


Figura 4. Isolíneas de anomalías gravimétricas de Bouguer para Santiago del Estero. Izquierda: modelo EGM2008. Derecha: modelo EIGEN 6C4.

El comportamiento de las isoanómalas es similar para ambos modelos, aunque el análisis estadístico de los residuos muestra un mejor ajuste del modelo EGM2008.

Las anomalías gravimétricas de aire libre reflejan la topografía mientras que las anomalías de Bouguer eliminan su efecto y reflejan la estructura interna de la corteza. De esta manera en la Figura 3 se muestran las curvas de anomalías de aire libre cerrándose entorno a las sierras en el sur y oeste de la provincia. Asimismo las anomalías de Bouguer negativas en esos sectores sugieren las deficiencias de masa en el interior de la Tierra. Al correlacionar con la topografía manifiestan que la presencia de estructuras geológicas como Sierras, ya que al eliminarse las masas topográficas la deficiencia de masa se corresponde con raíces corticales que penetran en el manto. Este comportamiento puede ser explicado por las teorías isostáticas.

CONCLUSIONES

De este análisis, se concluye que las anomalías de Bouguer representadas en un mapa a escala regional ponen de manifiesto anomalías de masa. Al correlacionar las mismas con la topografía permiten inferir la presencia de estructuras geológicas, y servir de base para futuros análisis isostáticos.

Los modelos geopotenciales globales permiten disponer de valores del campo gravitacional terrestre de manera homogénea y continua en toda la tierra. Los modelos EGM2008 y EIGEN-6C4 brindan información del campo gravitacional terrestre hasta el orden 2190 y grado 2159, una resolución espacial de 9 km. El aporte de estos modelos es fundamental en la Geodesia y las Ciencias de la



Tierra, que van desde los efectos prácticos, como la determinación de la ondulación del geoide, hasta aplicaciones científicas, como las investigaciones de la estructura interna de la Tierra. Se prevén como tareas futuras el análisis del estado isostático a priori de estructuras geológicas identificadas en la provincia a partir del análisis de anomalías de aire libre y Bouguer.

Agradecimientos: *El presente trabajo se ha desarrollado en el marco del Proyecto de Investigación "Análisis y Aplicación de los Modelos Digitales de Elevación (MDE) y Modelos Geopotenciales Globales (MGG) para la Provincia de Santiago del Estero", financiado por el Consejo de Investigación de Ciencia y Técnica (CICYT) de la Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE).*

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barthelmes, F. (2002) GFZ. Scientific Technical Reports STR 09/02. Definition of Functionals of the Geopotential and their calculation from Spherical Harmonics Models.

Del Cogliano, Daniel. (2006). *Modelado del Geoide con GPS y Gravimetría. Caracterización de la estructura geológica de Tandil*. Tesis Doctoral. FCEIyA - UNR.

Hirt C, Gruber T and Featherstone WE (2011) Evaluation of the first GOCE static gravity field models using terrestrial gravity, vertical deflections and EGM2008 quasi geoid heights. *J Geod* 85(10): 723-740

Hofman B. and W. H. Moritz, (2005). *Physical Geodesy*, Springer Wien New York.

Förste, Christoph; Bruinsma, Sean; Abrikosov, Oleh ; Lemoine, Jean-Michel; Schaller T.; H.-J. Götze; , J. Ebbing, J.C. Marty, F. Flechtner, G. Balmino and R. Biancale (2014) *EIGEN-6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse*

Infante, Claudia (2013). *Detección de estructuras geológicas potencialmente en equilibrio isostático a partir del análisis de modelos geopotenciales y anomalías de Bouguer*. Tesis de Maestría. UNLP.

Introcaso, A. y Ruiz, F., (2005). *El uso del geoide para determinar características corticales de una cuenca sedimentaria*. Memorias del III Congreso de Geofísica. La Habana.

Introcaso, A., (2006). *Geodesia Física*. Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología. Volumen Especial 1, Rosario. URL: <http://www.fceia.unr.edu.ar/fisiografia>.

Mohr, P. J., and B. N. Taylor, 2001, The fundamental physical constant: *Physics Today*, 54, 6–16.

Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C. and Factor, J.K. (2008) An Earth Gravitational Model to degree 2160: EGM2008. Paper presented at the 2008 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, April 13-18, 2008.

Torge W., (1989). *Gravimetry*, Walter de Gruyter Berlin, New York.- 465 pág. ISBN 3-11-010702-3