GEOACTA 31, 101-108, 2006 **ISSN 0326-7237**
©2006 Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas

MODELO DE GEOIDE EN EL NOROESTE DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

María Eugenia Gomez[1], Raúl Aníbal Perdomo[1,2] y Daniel Del Cogliano[1,2]

[1] Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas-UNLP; " CONICET
[2] megomez@carina.fcaglp.unlp.edu.ar;perdomo@presi.unlp.edu.ar; daniel@fcaglp.unlp.edu.ar

RESUMEN

Durante el año 2005 se ha realizado una re-densificación en el noroeste de la provincia de Buenos Aires, incorporando 22 puntos nuevos con cota IGM conocida sobre los que se han efectuado mediciones con GPS. Cada uno de ellos se midió con respecto a dos puntos de control pertenecientes a la red GEOBA'98, encontrándose durante el procesamiento de los respectivos vectores, una región bien definida en el extremo noroeste con discrepancias de entre 5 y 10 cm en altura elipsoidica para algunos puntos de la región. Esto último obligó a ajustar, además de las coordenadas de los puntos nuevos, las alturas de las estaciones de control Carlos Tejedor (CTEJ), Ameghino (AMEG) y Gral. Villegas (VILL) ya que los puntos que presentaban tales discrepancias estaban vinculados con las estaciones nombradas. Con este ajuste se resolvieron satisfactoriamente las diferencias señaladas.
Una vez realizada la compensación, haciendo uso de la altura GPS y la cota sobre el nivel medio del mar se obtuvieron las ondulaciones geoidales observadas (N). Esto mismo se calculó para 29 puntos más pertenecientes a densificaciones anteriores (dentro del mismo marco) que se incorporaron a fin de tener mayor información en esta zona.
Al análisis se agregaron en esta instancia, tres modelos geopotenciales globales. Se concluyó que el modelo que mejor representa al geoide observado es el modelo EIGEN-CG01c (Reigber *et al.*, 2004). Del análisis se desprende también que existe una región en la que se evidencia la falta de resolución de dichos modelos para dar cuenta de las variaciones de corta longitud de onda. Con la información obtenida, se procedió a la elaboración de un nuevo modelo de transformación de alturas para la región del noroeste
Palabras claves: GPS, geoide local, modelos geopotenciales globales, NO Buenos Aires

ABSTRACT

During 2005 a new densification of the geodetic network in the northwest of Buenos Aires province has been realized. 22 new points with known orthometric height have been added and measured using GPS. Each of them was related to two control points belonging to Geoba98. While processing GPS vectors, we found discrepancies of 5-10 cm between ellipsoidal heights in a well defined region related to Carlos Tejedor, Ameghino and General Villegas. This unexpected result obliged us to make a compensation not only for the new points but for the ellipsoidal heights of those three control stations which solved our problem satisfactorily.
Once we could establish precise geodetic coordinates, we proceed to compute geoid undulations (N) for the new points and also for 29 old points belonging to a previous densifications in the same reference frame.
At this time we added to the discussion three global geopotential models and we realized that EIGEN-CG01c (Reigber *et al.*, 2004) is the one that best fit observations. From this analysis we found the existence of a region not well solved by any of the models evidencing the low resolution of all of them. With that information, we built a new height transformation model which could be applied to the northwest of Buenos Aires province.
Keywords: GPS, local geoid, global geopotential model, NW Buenos Aires.

Recibido: 14 de agosto 2006
Aceptado: 18 de diciembre 2006

INTRODUCCION

El presente trabajo está orientado a obtener un modelo local de geoide en el noroeste de la provincia de Buenos Aires. Como aplicación práctica este modelo permitiría convertir alturas elipsoidales en alturas sobre el nivel medio del mar teniendo al posicionamiento con GPS como herramienta para la nivelación en una región con graves problemas de inundaciones.

Esta actividad se encuadra en el mejoramiento del sistema de referencia terrestre, especialmente en su componente vertical y en lo que sigue se intentará:

1. Establecer una red de puntos con coordenadas geodésicas muy precisas en la región estudiada.
2. Analizar en la región de trabajo el modelo de transformación de alturas existente FCAG98 (Perdomo y Del Cogliano, 1999).
3. Mejorar el modelo existente incorporando los nuevos puntos al modelo original.
4. Estudiar la validez de modelos globales, especialmente el EIGEN-CG01c y EIGEN-CG03c. También serán considerados el EGM96 y el modelo local de transformación de alturas, FCAG98.

DENSIFICACION DE LA RED GEODESICA

Antecedentes

La densificación consistió en mediciones GPS sobre 36 puntos del noroeste de la provincia de Buenos Aires de los cuales se conoce su cota sobre el nivel medio del mar. De ellos, 22 son nuevos. Los restantes, previamente medidos entre 1998 y 2002, constituyeron el marco de referencia para el posicionamiento de los nuevos. Se apoyó en trabajos anteriores de densificación que tuvieron lugar entre 1998 y 2002. En 1998 se realizó la primera medición sobre 200 puntos de nivelación de los que se conocía también la cota sobre el nivel medio del mar. Estos conforman la red GEOBA'98. Posteriormente, entre 2000 y 2001 se agregaron 102 puntos más (GEOBA02), vinculando toda la red medida a la red nacional POSGAR'94.

Si bien el marco de referencia de GEOBA'98 es POSGAR'94, GEOBA no posee los mismos problemas en altura que esta última (Perdomo *et al.*, 2001).

Con los puntos GEOBA'98 se construyó un modelo de transformación de alturas, FCAG98 (Perdomo y Del Cogliano, 1999), que permite interpolar N para cualquier lugar de la provincia. La densificación GEOBA02 permitió testear este modelo en todo el territorio arrojando como resultado que en el 84 % de los casos los errores no superan los 15 cm.

El presente trabajo se basa en una malla medianamente equiespaciada, siendo la distancia entre puntos de 30 km. Cada uno de los puntos nuevos fue medido al menos dos veces, siendo la duración de cada sesión de 3 a 6 horas. Cada observación se realizó contra la estación de control más cercana.

El Procesamiento

El procesamiento se llevó a cabo con el software GPSurvey 2.35. Se han procesado un total de 51 vectores. Gráficamente el resultado del procesamiento podrá apreciarse en la Figura 1.

Se ha efectuado también un cierre total de la red haciendo un recorrido por los vectores que marcan los bordes para estudiar la consistencia de los mismos. La distancia total del recorrido es de 908 km y el error total es de 0.03 ppm. Los errores encontrados en los cierres son típicamente de 0 a 1 cm. Aunque se advierten valores más altos que justifican la necesidad de una compensación. En principio, de acuerdo con la metodología original no era evidente la necesidad de realizar un ajuste.

Cada punto nuevo fue medido desde dos estaciones GEOBA'98 y se esperaba como consecuencia que las diferencias de altura en

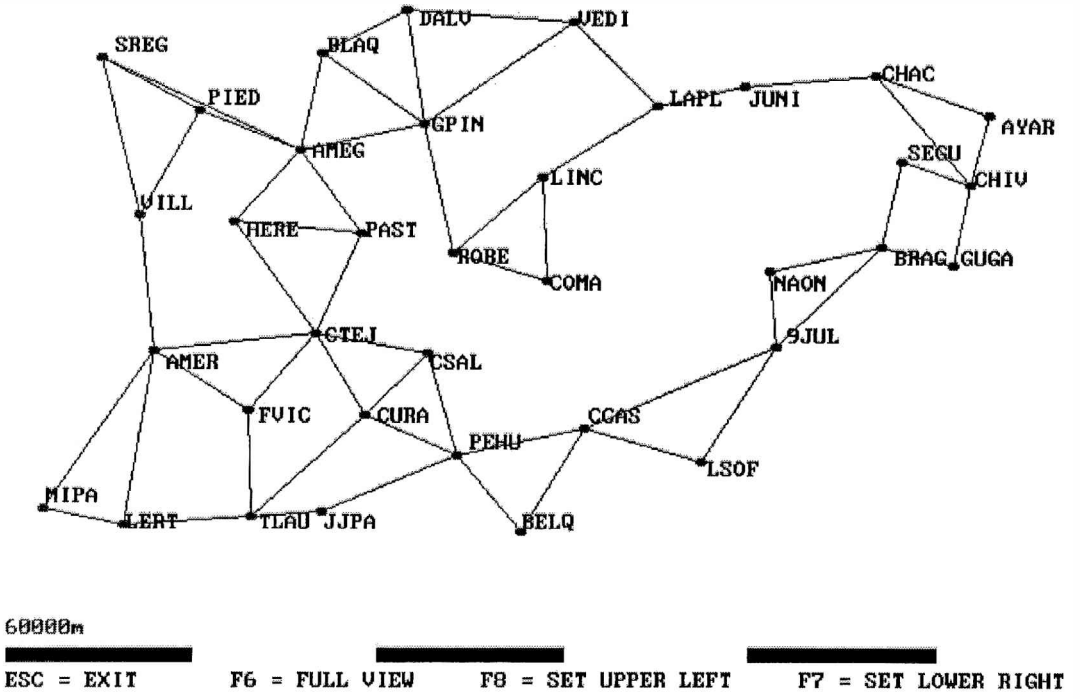

Figura 1. Red resultante

el punto no superaran los 3 cm. Sin embargo, durante el procesamiento de los vectores se hallaron diferencias de hasta 10 cm cuando se compararon vectores que provienen de estaciones Robert (ROBE), Trenque Lauquen (TLAU) y Pehuajó (PEHU) con los que tienen su origen en estaciones como Ameghino (AMEG), Carlos Tejedor (CTEJ) y Gral. Villegas (VILL). Un ejemplo de esto es la altura obtenida para Francisco de Victoria (FVIC) medida desde Trenque Lauquen y Carlos Tejedor. Esta diferencia es de 11 cm. Otro ejemplo es Gral. Pinto (GPIN); las alturas calculadas para el mismo desde Robert y Vedia (VEDI) tienen una diferencia de 8 cm con la obtenida desde Ameghino. En la misma situación se encuentran las estaciones de Curarú (CURA), Carlos Salas (CSAL) y Lértora (LERT).

Si bien este ha sido un resultado inesperado, constituye un aporte al mejoramiento de la red GEOBA'98. En esta se puede notar que la región del noroeste de la provincia, en particular la zona que concierne a Ameghino, Carlos Tejedor y Gral. Villegas, es geométricamente débil, pobremente vinculada con el resto de la red y en una zona de borde. Todos estos problemas se resuelven con una corrección aproximada de 10 cm en la altura de esos puntos. En función de este problema se diseñó una estrategia de ajuste que permita estimar objetivamente la corrección en altura de estas estaciones de control.

Ajuste

La compensación o ajuste de la red se realizó con el módulo de ajuste TRIMNET PLUS incluido en el Software GPSurvey ver 2.35. Luego de sucesivos experimentos, se optó por no fijar las estaciones de AMEG, CTEJ y VILL, arrojando esto diferencias en altura con respecto a las coordenadas originales que concordaron con el procesamiento.

Observaciones del ajuste: Las diferencias en altura señaladas en el procesamiento fueron

corroboradas en el ajuste de manera que al comparar las coordenadas finales con sus valores originales arrojaron las diferencias mostradas en Tabla 1.

EVALUACION DE LOS MODELOS GEOPOTENCIALES

Cálculo de la ondulación del geoide a partir de la nivelación

Con la altura elipsóidica de las coordenadas obtenidas mediante el ajuste realizado y la cota sobre el nivel medio del mar que se tenía de la nivelación IGM obtuvimos $N_{obs} = h - H$ la cual es una buena medida de la ondulación del geoide.

En esta nueva etapa se incorporaron 29 puntos correspondientes a la densificación GEOBA02 y estaciones pertenecientes a la red original. La incorporación de estos significa aportar toda la información útil en la región de estudio, e incorpora más puntos de frontera ampliando la zona para eliminar efectos no deseados de la interpolación de borde.

Se puede advertir que la altura de González Moreno (GMOR), uno de los puntos incorporados en esta instancia, no se corresponde con la publicada sino que ha sido modificada debido a que originalmente esta estación fue observada desde Villegas y durante este estudio sus coordenadas han sido ajustadas nuevamente.

De cada uno de estos puntos también se conoce la cota sobre el nivel medio del mar.

Tabla 1. Diferencias con las coordenadas de control. Las diferencias en la tercer columna ("h) son del orden de los 10 cm.

Estación	Δ_["]	Δ_["]	Δh[m]
AMEG	0.0005	-0.0011	0.07
CTEJ	0.0000	-0.0004	0.09
VILL	-0.0006	-0.0007	0.10

Evaluación

El principal objetivo de este trabajo es obtener un modelo de geoide en el NO de la provincia de Buenos Aires. Para ello nos valdremos del análisis de tres modelos geopotenciales globales a fin de hallar aquel que mejor aproxima al geoide observado y junto con las ondulaciones observadas construir el modelo final.

Entre los modelos evaluados en la región también estará FCAG98, el cual es un modelo elaborado en la FCAG de carácter provincial. Se trata de un modelo numérico de transformación de cotas a partir de la información puntual de las diferencias h-H (N_{obs}) sobre los puntos de la red original y las diferencias N_{obs} - N_{egm96}. Este modelo permite estimar la altura ortométrica midiendo h con GPS en el marco de la red e interpolando las diferencias dentro de una grilla equiespaciada elaborada con el método de kriging.

Análisis del comportamiento de los modelos geopotenciales

En primera instancia se graficaron las ondulaciones obtenidas por los distintos modelos a partir de la creación de una grilla equiespaciada generada mediante el método de kriging y se calcularon las diferencias entre los valores de ondulación observados y aquellos predichos por los modelos propuestos en los 65 puntos resultantes. En particular se muestran en este informe los gráficos de ondulaciones observadas (Fig. 2a) y de las diferencias entre los valores observados y los diferentes modelos (Fig. 2 b, c y d).

Se puede advertir que los modelos globales ajustan bastante bien a las observaciones excepto en la región que involucra a las localidades de Naón (NAON), Bragado (BRAG), Los Toldos (LTOL), Cnel. Seguí (SEGU), Chivilcoy (CHIV). Estas diferencias con respecto a los valores observados tienen su origen en que los modelos geopotenciales

globales resuelven longitudes de onda de unos 110 km mientras que las diferencias observadas tienen lugar dentro de unos 40-50 km. Esto es, los modelos globales no pueden resolver longitudes de onda tan cortas.

El modelo EIGEN-CG01c sin embargo, es capaz de absorber el fuerte gradiente que existe por ejemplo en la zona de Santa Regina (SREG) la cual es bastante conflictiva sólo por el hecho de tratarse de un punto de frontera con la consecuente escasez de datos. En la Tabla 2 se encuentra el análisis estadístico de las diferencias .

De acuerdo con los valores estadísticos arrojados por las diferencias, el modelo que mejor aproxima los valores observados es FCAG98, lo cual es de esperar debido a que se trata de un modelo con muchos puntos en común con los. Pero si ahora nos concentramos en los modelos globales, el modelo que mejor aproxima a los N observados resulta ser el EIGEN-CG01c (desviación típica de 0.13 m contra 0.17 m del EGM96 y 0.19 m del EIGEN-CG03c). La diferencia promedio de -0.75 m. sólo pone en evidencia la diferencia de orígenes debida a que la red fue compensada en POSGAR'94. Fue necesario expresar los resultados en POSGAR'94 porque este constituye el marco de referencia nacional oficialmente adoptado y las coordenadas resultantes del ajuste serán incluidas en un trabajo de transferencia a nivel provincial.

Si tomamos el punto Campo Inchauspe y el de Arrecifes, de los cuales se conocen sus coordenadas geodésicas POSGAR'98 (Moirano *et al.*, 1998), POSGAR'94 y calculamos la diferencia , esta resulta ser de 0.583 m y 0.585 m respectivamente.

Si bien esta diferencia no es constante para toda la provincia, sí podría considerarse constante para una región relativamente pequeña como la considerada en este trabajo.

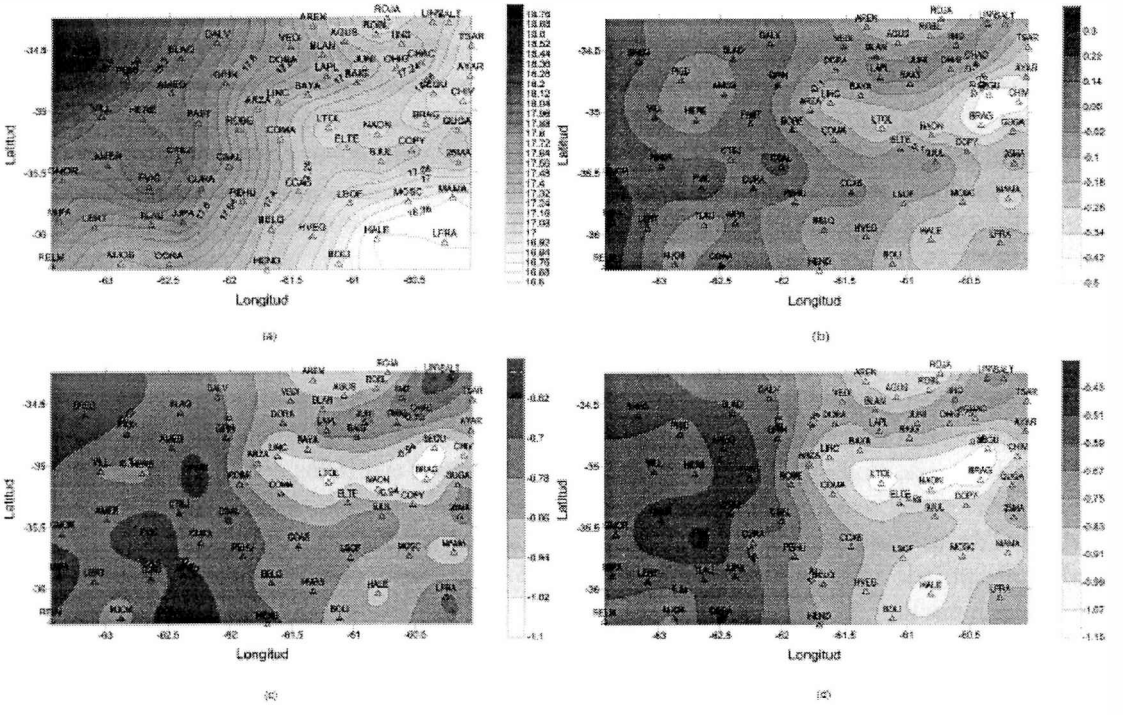

Figura 2. a)Nobs; b) Nobs-Negm96; c) Nobs-Neigen01; d)Nobs-Neigen03

Tabla 2. Análisis del comportamiento de los modelos geopotenciales y FCAGG98. Siendo μ la media aritmética y σ el desvío estándar de las diferencias R_i

Indicadores	EIGEN-CG01c	EGM96	FCAG98	EIGEN-CG03c
μ [m]	-0,75	-0,05	-0,04	-0,76
Û[m]	0,13	0,17	0,09	0,19
máx. [m]	0,22	0,36	0,3	0,37
min.[m]	-0,31	-0,44	-0,14	-0,38

Si la aplicáramos como corrección aproximada a todas las alturas elipsoidales calculadas, la diferencia promedio se vería reducida a -0.17 m (-0.75 m +0.58 m), valor que podemos considerar aceptable si tomamos en cuenta los errores de orígenes residuales provenientes de POSGAR'98, POSGAR'94, de la red de nivelación y el propio del EIGEN-CG01c.

MODELO RESULTANTE

Teniendo en cuenta el análisis estadístico y cualitativo de los modelos geopotenciales globales y de los métodos de interpolación comentados en las precedentes secciones, se han tomado las siguientes decisiones:

1. Utilizar como modelo de base el modelo geopotencial global EIGEN-CG01c de acuerdo con el análisis estadístico mostrado en Tabla 2.

2. Utilizar para mejorar el modelo existente la combinación de una grilla que permita interpolar las diferencias junto con el cálculo directo de los , de manera que la interpolación de las diferencias resulte más sencilla por la suavidad de las variaciones (Fig. 2a y 2c) y al valor interpolado se le sume directamente el valor del modelo.

Para poner en práctica el procedimiento descrito en los ítems 1 y 2, se ha utilizado el software (Mendoza, 2000) diseñado para el cómputo de las ondulaciones correspondientes a FCAG98. Se quitaron las grillas utilizadas por el mismo y se incorporaron las nuevas. La primer grilla contiene las diferencias y la segunda contiene las ondulaciones calculadas con el modelo EIGEN-CG01c para cada punto de la misma. Ambas grillas fueron construidas con el método de kriging.

Una vez ingresado el punto para el que se quiere determinar la ondulación del geoide con el modelo propuesto, el programa realiza una interpolación bilineal en cada grilla; de la grilla de las diferencias se obtiene una estimación del y luego le suma la estimación del interpolada de la segunda grilla. Esta suma da una estimación de la ondulación para el punto introducido.

CONCLUSIONES

En el transcurso del presente trabajo, se ha densificado con mediciones GPS una zona de la red geodésica de la provincia de Buenos Aires con escasez de datos y con esto mejorado la componente vertical del marco de referencia terrestre provincial.

Para hacer aquello efectivo se han realizado las siguientes actividades:

1. Tres campañas de medición con GPS cubriendo una superficie total de aproximadamente 100000 km" y dos campañas de reconocimiento.
2. Procesamiento de las observaciones y ajuste de las coordenadas. Como se ha comentado en el capítulo correspondiente, la compensación no era una actividad prevista, sino que se efectuó de acuerdo al análisis de los resultados arrojados por el procesamiento de las líneas de base, el cual puso de manifiesto la necesidad de ajustar coordenadas.
3. Evaluación de tres modelos geopotenciales (EGM96, EIGEN-CG01c y EIGEN-CG03c) y un modelo de ondulación del geoide regional (FCAG98) lo que permitió concluir que el modelo geopotencial que mejor aproxima las observaciones es el EIGEN-CG01c, presen-

tando una diferencia promedio de -75 cm para relacionada según se explicara previamente, con una diferencia de orígenes entre los sistemas considerados.

Este trabajo es una de las primeras evaluaciones en una región argentina, del comportamiento de los nuevos modelos obtenidos con las misiones CHAMP y GRACE (Reigber et al., 2004 y 2005)

4. Construcción de un modelo de transformación de alturas para la región estudiada utilizando las observaciones y resultados propios en combinación con el EIGEN-CG01c, y adaptación de un software existente para la transferencia de este resultado a los municipios del noroeste bonaerense.

5. En cuanto a la evaluación del modelo FCAG98, la matriz siguiente muestra el principal logro de este trabajo. Se han calculado las diferencias (en cm) entre el modelo FCAG98 y el desarrollado aquí en una serie de puntos equiespaciados unos 100 km (1°) que cubren toda la región del NO de la provincia de Buenos Aires: las columnas representan el cambio en longitud mientras que las filas representan la variación en latitud siendo el tamaño total de 2°x3° (desde -36.26 a -34.3 en latitud y desde -63.2 a -60.2 en longitud) y los elementos de la matriz son las diferencias entre un modelo y otro en centímetros.

$$Dif = \begin{pmatrix} +14 & +17 & 0 & +12 \\ +17 & +7 & +4 & +3 \\ +5 & +7 & +5 & -4 \end{pmatrix}$$

Se puede observar que las diferencias son significativas en el extremo noroeste justificando las hipótesis planteadas en las motivaciones de este trabajo. En el resto de la región, en general son de unos pocos centímetros, como cabía esperar.

Este trabajo pone de manifiesto la existencia de una región con variaciones de corta longitud de onda en el eje Chivilcoy-Bragado-Los Toldos que justificarían una densificación localizada para definir mejor las características y límites de la zona en cuestión Resulta evidente que los modelos globales no resuelven estos problemas de manera satisfactoria.

El fuerte gradiente observado en las ondulaciones en el extremo NO (proximidades de Santa Regina), confirmado por los modelos geopotenciales globales, justificaría la medición de al menos dos puntos más al norte y otros dos más al oeste de SREG.

Una investigación combinada con mediciones gravimétricas e información geológica permitiría avanzar en la comprensión del origen del comportamiento observado.

REFERENCIAS

Beutler G., H. Bock, R. Dach, P. Fridez, W. Gurtner, U. Hugentobler, D. Ineichen, J. Johnson, M. Meindl, L. Mervant, M. Rothacher, S. Schaer, T. Springer and R. Weber, 2001. Manual Bernese GPS Software ver. 4.2, Astronomical Institute of Berna.

Brunini C., R. Perdomo, A. Brunini, J. C. Usandivaras, J.L. Hormaechea,R. Pinciroli, D. Del Cogliano y F. Mayer, GPS Seminario'98. Fac. de Cs. Astronómicas y Geofísicas, UNLP.

Drewes H., L. Sanchez. Seminario de Sistemas de Referencia en Geodesia.

Förste C., F. Flechtner, R. Schmidt, U. Meyer, R. Stubenvoll, F. Barthelmes, R. König, K.H. Neumayer, M. Rothacher, C. Reigber, R. Biancale, S. Bruinsma, J.-M. Lemoine and J.C. Raimondo, 2005. A high resolution global gravity field model combining CHAMP and GRACE mission and altimetry/gravimetry surface gravity data.

GFZ, Julio 2004. Joint CHAMP/GRACE Science Meeting.

Hecimovic Z., June 2005. Spectral behavior of global gravitational models considering EUVN network, Symposium of the IAG Subcommission for Europe. European Reference Frame - EUREF 2004, Vienna.

Heiskanen W. and H. Moritz. 1967. Phisical Geodesy. Freeman. San Francisco y Londres.

Hofmann-Wellenhof B., H. Lichtenegger and J. Collins, 1997. GPS, Theory and Practice. 5ª Edición. Springer, Berlin-New York.

Lemoine F. G., S. C. Kenyon, J. K. Factor, R. G. Trimmer, N. K. Pavlis, D. S. Chinn, C. M. Cox, S. M. Klosko, S. B. Luthcke, M. H. Torrence, Y. M. Wang, R. G. Williamson, E. C. Pavlis, R. H. Rapp and T. R. Olson, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 20771 USA, July 1998. The Development of the joint NASA/ GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) geopotential model EGM96. Chapter 11.

L. Mendoza, 2001. Desarrollo de software para transformación de alturas. Depto. de Astrometría FCAG. Comunicación privada.

R. A. Mesén, Junio de 2001. Interpolación espacial. Escuela de Geografía. Universidad de Costa Rica.

Red geodésica de alta precisión, MIVSP-FCAGLP 1998

Densificación de la red geodésica de la provincia de Buenos Aires, MIVSP-FCAGLP 2002.

Moirano J., C. Brunini, H. Dreves y K. Kaniuth, 1999. Definición del marco de Referencia Geodésico. Argentino mediante observaciones GPS como materialización del ITRS. Contribuciones a la geodesia en la Argentina de fines del siglo XX. UNR Editora.

Natali P. y F. Azpilicueta. 2002. Sistema de Referencia Vertical en Argentina, XXI Reunión de la AAGG. Rosario.

Perdomo R., L. Mendoza y R. Amorín, 2000. Discusión de la precisión real del modelo de Geoide Bonaerense. Actas de la XX Reunión Científica de la AAGG, Mendoza.

R. Perdomo, E. D'Onofrio, M. Fiore, F. Mayer y R. Ramos. 1999. La Referencia Vertical. Contribuciones a la geodesia en la Argentina de fines del siglo XX. UNR Editora.

Perdomo R., D. Del Cogliano, N. Di Crotche and K. Neuman, 2001. Advances in the calculation of a height transformation model in Buenos Aires province. IAG, actas de la Reunión de Cartagena.

Reigber Ch., P. Schwintzer, R. Stubenvoll, R. Schmidt, F. Flechtner, U. Meyer, R. König, H. Neumayer, Ch. Förste, F. Barthelmes, S.Y. Zhu, G. Balmino, R. Biancale, J. M. Lamoine, H Meixner and J. C. Raimondo, 2004. A high resolution global gravity field model combining CHAMP and GRACE satellite mission and surface data: EIGEN-CG01c.

Seeber G. 1993. Satellite Geodesy. Walter de Gruyter, Berlin.

Smith W. H. F. and P. Wessel, 1990, Gridding with Continuous Curvature Splines in Tension, Geophysics, v. 55, n. 3, p. 293-305.

Teunissen y Kleusberg 1996.GPS for Geodesy. Springer. Germany

Torge W. 2001. Geodesy 3er. Edicion. Walter de Gruyter, Berlin, NY.