



Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

Tesis de Licenciatura en Astronomía
**ANÁLISIS DE LA VERSIÓN 2011 DEL
MODELO DE TRANSFORMACIÓN DE ALTURAS DE
LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES**

María Cecilia Valenti

Director: Raúl A. Perdomo

LA PLATA, ARGENTINA
2012

*Dedico este trabajo a
a Martita y Pino, por su gran esfuerzo y el aguante siempre,
a la Gordis, por ese amor incondicional que sólo nosotras entendemos,
a Ayita y a Igna, por enseñarme todo lo demás.*

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a todos los que han hecho posible que se concretara este trabajo. Empezando por mi director, Raúl, con quien fue un placer trabajar, no sólo para robarle algo de su conocimiento y experiencia, sino por su amabilidad, buena predisposición y excelente carácter en todo momento, desde que se comprometió como profesor consejero hasta la actualidad.

Agradezco al jurado, en particular por responder al apuro; sobre todo a Claudia, que es una persona que me acompañó a lo largo de toda esta etapa final de la carrera, siendo de esos docentes que me llevo para toda la vida, aún sin haberla tenido en ninguna materia. Tenerlo a Diego de jurado fue una muy grata sorpresa, dado que con él compartí tanto el ámbito del grupo, como mi trabajo en extensión, y siempre ha sido para mí un ejemplo en muchos aspectos. A Sixto, otro de esos profesores de la vida, de quien aprendí muchísimo sobretodo afuera del aula. A él, a Ignacio, a Luis Guarracino, a Marcelo Miller, a Mauro Mariani y a todos los miembros de la comisión de enseñanza, así como a la gestión, por la buena predisposición y el esfuerzo en el último momento.

A los que estuvieron del otro lado, sufriendo y luchando conmigo con paciencia en el soporte técnico informático: Fede Bareilles, Juan Calderón, Romi G., Mauricio G. y Pablo S. muchas gracias!!

Aprovecho esta oportunidad, para agradecer a toda la gente que hizo posible, no sólo que llegara a esta instancia sino que además fuera placentero el camino.

A mis amigas más cercanas, Aye, Lau, Ceci y Maqui, compañaras de estudio, trabajo, y aventuras varias.

A todes les INTIanes, en especial a aquellos con les cuales logramos una profunda amistad: Igna, Fede García, Pauli, Rocío, Nelly, Pula, Octi, Ale, Maxi, Tiara, Eze, Fran, Mari y a todes les jóvenes que se fueron sumando después. Es indescriptible el orgullo y la gratitud que siento de ser parte de un grupo con valores tan humanos y con tantas ganas desinteresadas de trabajar.

A todas las personas de extensión, de ahora y de los comienzos de donde también me llevo las hermosas amistades de Fede Pisoni, Ariel, Yami, Juan, Andrés, Luis, Nico, Iván, Vero, Santi, Fede Campu, Flor, César; y a cinco personas de quienes aprendí un montón: Roberto, Luciano, Ivon, Eduardo y Alejandra.

A los no docentes que me aguantaron todos estos años: Víctor, que me esperaba con mates en los turnos tempranos de la mañana, las Marías, Cristina y Javi que recibían mis avisos de llegadas tarde; a Pedro, el Moncho, Adrián y Axel, que me esperaba en las nocturnas para sacarme del bosque. A García y a Hugo, que me retaban y me

0. Agradecimientos

mandaban a estudiar. Fueron muchas horas compartidas, así que muchas gracias por hacerlas tan amenas.

A los chicos con quienes comparto el apoyo escolar en 'el mate', fundamentalmente a mis amigos, Lu, Nacho Bruvera, el gordo y Eze. También a Bren, a Nico, a Lau y a Vicky. Otro espacio que me enorgullece por el esfuerzo desinteresado.

A aquellos profesores que me dedicaron 'horas extras' como Ale Paola, Fito, Ogui, Gabriel Bilmes y la gente de la cátedra de libre, que ha sido de mis cátedras favoritas.

A aquellos que me enseñaron y me tuvieron paciencia en el consejo y en las comisiones, es especial a Juani, a Marcelo y a Stella, con quienes compartí muchos debates y de quienes siempre aprendo mucho.

Fuera del ámbito de la facultad, estuvieron siempre mis amistades de toda la vida.

Mis amigas de Moreno: Pau, la Perris, Pinu, las Cachas, Yuly y Carlita. Y mis tres grandes amigos Diego, Ramiro, Juan y Sergio. Gracias, por bancar esas amistades en las que pasa el tiempo entre encuentro y encuentro, y aún así, siempre estuvieron cerca.

A los amigos de Romi que heredé por transitividad, en especial, Wendy, Fefa, Pedrín, Jere y Charles.

Agradezco por esas amistades que no se eligen pero con las que fui una afortunada: el resto de mi familia, en especial a mis primas hermosas, sobre todo a las que me regalaron los sobrinos Uri y Mateo. A mi tía y madrina Lore, que siempre admiré y con la que siempre cuento. A dos grandes mujeres que ya no están, pero que cada día aprendo a conocer y valorar mucho más, su lucha, y sus enseñanzas. Hoy quiero agradecerles a ellas, tal vez mezcla de nostalgia, y feminismo que reivindica a esas segundas madres, las grandes mujeres de mi familia: mi Abuela Zule y mi Nonna Gloria. A Delia, la persona que hizo que hoy recuerde mi infancia como una de las mejores etapas, llena de juegos y de cariño.

A mis padres y a mi hermana, para quienes nunca voy a encontrar las palabras que puedan transmitir lo que realmente siento ... creo que no existen, pero por suerte creo que no las necesito.

Y finalmente, me siento en el deber y no por eso deja de darme un enorme placer, agradecer a la Facultad de Cs. Astronómicas y Geofísicas, a la Universidad Nacional de La Plata, y fundamentalmente a todos aquellos que hoy desde distintos lugares, defienden y hacen posible una educación superior, pública, gratuita y de calidad.

Resumen

En esta tesis se presenta una descripción de la nueva densificación de la *red geodésica de la provincia de Buenos Aires* realizada en el año 2010, y enmarcada dentro de un convenio entre el Consejo Profesional de Agrimensura (CPA), la Dirección de Geodesia, Ministerio de Infraestructura, Vivienda y Servicios Públicos de la Provincia de Buenos Aires (DG-MI) y el Grupo de Geodesia Espacial y Astrometría (GGEA) de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAGLP) de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP).

Se analizan unos pocos puntos discordantes en los datos obtenidos en la campaña del año 2010, y se realizan correcciones mediante nuevas observaciones realizadas en el año 2011. Finalmente y de manera más extensa y detallada, se enfoca la discusión en el *modelo de transformación de alturas* que resulta a partir de esta nueva red y su comparación con el Modelo Gravitacional Global (MGG), EGM2008¹

A modo de reseña, en el primer capítulo se hace una descripción cronológica del desarrollo del sistema altimétrico nacional y la red geodésica de la provincia de Buenos Aires; y se repasan ciertas definiciones y conceptos fundamentales que se utilizarán a lo largo de todo el trabajo.

En el segundo capítulo se describe el modelo de transformación de alturas existente, previo a la campaña del 2010 y su vinculación con el MGG EGM2008.

El nuevo modelo de transformación de alturas que resulta a partir de la densificación en 2010, se describe en detalle en el capítulo 3, así como también, se puntualiza sobre los puntos discordantes y las nuevas observaciones que debieron realizarse a fin de obtener valores corregidos en los puntos en conflicto.

Finalmente el capítulo 4 contiene el análisis que permite la validación del nuevo modelo de transformación de alturas y su comparación con el MGG EGM2008.

Por último, en el capítulo 5 se plasman las conclusiones.

¹Earth Gravitational Model o Modelo de Gravedad de la Tierra (Pavlis et al 2008)

Índice general

Agradecimientos	III
Resumen	V
1. Sistemas de alturas de la provincia de Buenos Aires.	1
1.1. Introducción	1
1.2. El Sistema Altimétrico Nacional	2
1.3. Introducción al sistema geodésico nacional	4
1.4. Adopción de POSGAR07	6
1.5. La red geodésica de la provincia de Buenos Aires GEOBA	6
1.6. Definiciones y conceptos fundamentales vinculados al geoide y la determinación de alturas	7
1.6.1. El geiode	7
1.6.2. Las superficies de nivel, el vector de la gravedad y la altura ortométrica	8
1.6.3. Las diferencias de altura y la nivelación	10
1.7. Irrelevancia de las correcciones ortométricas para este trabajo	11
1.7.1. El elipsoide	12
1.8. Relación entre alturas	13
2. Modelo de transformación.	15
2.1. Introducción.	15
2.2. El modelo anterior de transformación de alturas	15
2.3. Modelo de transformación de alturas FCAG02	16
2.4. Los Modelos Geopotenciales Globales	17
2.5. Comparaciones	18
3. Densificación de GEOBA02	21
3.1. Introducción	21
3.2. Descripción y estudio de la densificación de puntos realizada en el año 2010 en cooperación con la Dirección de Geodesia y el Consejo Profesional de Agrimensura	22
3.3. Metodología y procesamiento de la campaña 2010	22
3.4. Nuevas mediciones adicionales que incluyen trabajo de campo y procesamiento de la información que se incorpora	24

ÍNDICE GENERAL

4. Evaluación del Modelo Anterior y discusión del Modelo Actual, tda- GEOBA	27
4.1. Introducción	27
4.2. El nuevo modelo de transformación de alturas	27
4.3. El nuevo modelo N y su comparación con el modelo global EGM2008 .	28
4.4. Nuevos puntos evaluados en el modelo anterior	28
4.5. Testeo del modelo actual	30
5. Conclusiones	33
5.1. Conclusiones	33
5.2. Perspectivas y Recomendaciones	33

Índice de Figuras

1.1. Coordenadas Geodésicas	5
1.2. El Geoide	9
1.3. Técnica de Nivelación	10
1.4. Superficies Equipotenciales	10
1.5. Referencia de altura.	13
2.1. Histograma de evaluación del modelo FCAG98 respecto de los puntos de la densificación 2002	17
2.2. Modelo de Transformación de alturas FCAG02 comparado con el EGM08	19
3.1. Nuevos puntos	23
3.2. Puntos Discordantes	25
4.1. Comparación con el Modelo Gravitacional EGM2008. Curvas cada 0.05 metros [m]	29
4.2. Histograma para las diferencias del modelo 2002 y los valores medidos para N	30
4.3. Histograma para las diferencias del modelo 2011 y los valores medidos para N	31
4.4. Histograma para las diferencias del modelo 2011 y los valores del Modelo Global Negm08	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Índice de Tablas

1.1. Líneas de nivelación	12
3.1. Datos para un día de la campaña 2010	24
3.2. Mediciones 2011	26
3.3. Comparación de los valores de las alturas 2010 vs 2011	26

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 1

Sistemas de alturas de la provincia de Buenos Aires.

1.1. Introducción

Es importante tener siempre presente que el concepto de altura está directamente vinculado a una clara definición de la superficie que se elige de referencia; y es la dirección perpendicular a esa referencia, la dirección a lo largo de la cual se mide la altura. Los conceptos teóricos definen a la *altura ortométrica* (H) como la altura de un punto en la superficie topográfica, medida respecto del geoide, y a la *altura elipsoidal* (h) medida respecto del elipsoide de referencia. El desafío desde el punto de vista práctico, consiste en materializar¹ esas superficies de referencia, y aprovechar la relación que las vincula, para obtener información de manera indirecta. Así, una buena red geodésica, medida sobre puntos altimétricos, nos facilita un modelo de transformación de alturas, para obtener alturas sobre el nivel medio del mar² (SNMM), con mediciones satelitales y técnicas numéricas de interpolación de datos.

Veremos a continuación, que nuestro sistema altimétrico nacional, se basa en la determinación de cotas o alturas ortométricas (H) materializadas en pilares altimétricos, producto de importantes campañas de nivelación. Las mismas, tienen su origen en el nivel medio del mar obtenido en el mareógrafo de Mar del Plata en 1924. Mientras que las alturas elipsoidicas, se obtienen con mediciones satelitales (hasta el momento utilizando el sistema GPS³), que luego se procesan en el marco de referencia correspondiente, materializando la componente vertical del sistema de referencia terrestre.

A lo largo de todo el territorio nacional y en particular en la provincia de Buenos Aires; fueron varios los reelevamientos geodésicos satelitales que permitieron no sólo

¹Si bien no profundizaremos en las deficiones, hay que destacar la diferencia entre un sistema de referencia y un marco de referencia. En pocas líneas, el sistema es el concepto teórico, la idea, la forma en la que definimos las referencias, mientras que el marco de referencia son los monumentos ‘tangibles’, cuyas coordenadas ya hemos medido y podemos usar de referencia

²Hasta aquí, hablar de cotas o alturas ortométricas y alturas sobre el nivel medio del mar resulta indistinto, más adelante se introducen las definiciones precisas y las diferencias

³Sistema de Posicionamiento Global

1. Sistemas de alturas de la provincia de Buenos Aires.

consolidar redes del sistema de referencia, sino también, evaluar y validar modelos de transformación de alturas.

De modo que dedicamos este capítulo a breves descripciones cronológicas del desarrollo, tanto de la red altimétrica nacional, la red geodésica nacional y la red geodésica de la provincia de Buenos Aires.

A su vez, se incluyen conceptos teóricos fundamentales que son necesarios para la comprensión de este trabajo.

1.2. El Sistema Altimétrico Nacional

Los primeros trabajos de nivelación en nuestro país datan de fines del siglo XIX y fueron realizados bajo la dirección del Ministerio de Obras Públicas, con el objeto de poder estudiar la hidrografía de los grandes ríos mesopotámicos. Ya en el año 1909 se contaba con 3800 km de línea nivelada y cerca de 430 referencias distribuidas en las provincias de Buenos Aires, Santa Fé, Entre Ríos y Corrientes, a lo largo de las trayectorias de los principales ferrocarriles. Estos datos y muchas de las cifras que se mencionan a continuación se transcribieron de un trabajo del ingeniero Bustos. [1]

Sin embargo, el primer momento crucial ocurre en el año 1924, cuando se determina el nivel medio del mar, materializado por el mareógrafo del puerto de Mar del Plata. A partir de entonces y hasta la actualidad, toda la altimetría de la cartografía del entonces IGM⁴ se refiere a dicho cero (cero IGN).

El siguiente hito histórico en la referencia vertical, fue la promulgación de la Ley de la Carta, el 3 de octubre de 1941. Con ella se constituyó el marco legal que fundamentó la obra del IGN, respecto a los trabajos geodésicos que se ejecutaron con regularidad para ofrecer apoyo a los levantamientos topográficos en todo el territorio nacional. (D' Onofrio, 1999) [2]

Hacia el año 1947 se vió la necesidad de vincular la referencia del mareógrafo de Mar del Plata, con un punto altimétrico fijo, y más estable. De modo que se trabajó con nivelación de alta precisión, para conectar el origen del mareógrafo a un punto en la ciudad de Tandil; ya que informes realizados por la Dirección General de Minas y Geología, la Dirección General de Yacimientos Petrolíferos Fiscales y la Dirección del Servicio Meteorológico Nacional, coincidían en señalar a las Sierras de Tandil, constituidas por un bloque homogéneo y rígido de basamento cristalino, como el sitio más favorable para el emplazamiento del punto. Así, en el año 1949, el PARN, Punto Altimétrico de Referencia Normal, ubicado a 200 Km de la línea de costas en el Parque Independencia de la ciudad, quedó vinculado al mareógrafo de Mar del Plata mediante una línea de nivelación de alta precisión de 180 km de longitud a lo largo de la Ruta Nacional 226, con 75 puntos fijos, cada 2 o 3 km entre ellos. Esta línea de nivelación culmina en un punto nodal especial ubicado en la plaza Luro de la ciudad de Mar del Plata (1950) asentado en la tosca.

⁴Instituto Geográfico Militar, actual Instituto Geográfico Nacional (IGN)

El PARN continúa, aún hoy, como el punto de arranque de las líneas de nivelación nacionales y a partir de ahí se extiende el marco de referencia altimétrico hacia todo el territorio a través de nivelaciones de alta precisión.

Las líneas de nivelación se dividen en tres: *alta precisión, precisión y topográficas*. La primera compensación de líneas de nivelación se realizó entre 1969 y 1971 en los EE.UU. Se usó compensación por mínimos cuadrados y se compensaron 54.000 km correspondientes a líneas de alta precisión y precisión. Por no contar con suficiente cantidad de valores de gravedad se aplicó corrección ortométrica (ver 1.7) con gravedad teórica, previéndose su perfeccionamiento a futuro. Con posterioridad, el IGN, realizó programas de compensación en lenguaje FORTRAN que permiten compensar hasta 200 nodales.

En la actualidad las líneas de nivelación de alta precisión constituyen una *red altimétrica* que divide al territorio de la República Argentina en polígonos cerrados o mallas y polígonos periféricos sobre el litoral marítimo y los límites internacionales. Estas líneas arrancan y cierran en nodales que son *puntos fijos* (PF) altimétricos de 1^{ra} categoría; se cuenta con 225 nodales para el territorio nacional, generalmente ubicados en las plazas de los pueblos o ciudades y que permiten controlar el cierre altimétrico de las mismas. Los PF que componen las líneas se sitúan cada 3 o 4 km, y la cantidad estimada de puntos, fue completada por el IGN en el año 2001 y es del orden de 16320 para todo el país.

La *red altimétrica nacional* consta de 87.529 km de nivelación de alta precisión y precisión, más 72.802 km de nivelación topográfica y 3250 km de nivelación auxiliar para apoyo fotogramétrico.

El total de puntos altimétricos monumentados, con valor de cota conocida alcanza hoy los 32000, de los cuales, el 50 % pertenece a puntos de la *red de nivelación de alta precisión* y el resto se divide en: un 24 % son *puntos de líneas de precisión* y el 26 % restante son puntos de *líneas topográficas*. La condición de cierre impuesta por el IGN para las líneas es de $3\text{mm} \times \sqrt{L(\text{km})}$ ⁵. A su vez, toda la Red de nivelación consta de desniveles que no sobrepasan los 200m.

En el año 1996, se realizó un importante trabajo que vinculó las redes de nivelación de alta precisión y gravimetría con los mareógrafos de Mar del Plata, Puerto Belgrano, Puerto Madryn, Comodoro Rivadavia y Puerto Deseado. Y más tarde se vincularon los mareógrafos de Río Gallegos y Ushuaia, aunque quedó pendiente el cruce del Estrecho de Magallanes. Detalles sobre esta tarea y sus resultados, se pueden encontrar en el ya citado trabajo de D'Onofrio; desde donde, también se ha recabado gran parte de la información mencionada.

Ya situándonos en el presente, la evolución del *sistema de referencia vertical* en Argentina, se enmarca dentro del proyecto SIRVEMAS⁶. El mismo se desarrolla en cooperación con el Deutsches Geodatisches Forschungsinstitut (DGFI) y bajo las recomendaciones del grupo III de SIRGAS⁷, se propone: sentar las bases para la materialización de un sistema nacional de alturas, determinar la desviación entre el nivel medio del

⁵Es decir que se tendrá un error de 3mm multiplicado por la raíz cuadrada de la longitud de la línea

⁶Sistema de Referencia Vertical en Argentina

⁷Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas

mar y el geoide en varios mareógrafos y monitorear las variaciones de la superficie del mar mediante la combinación de diferentes técnicas como los registros mareográficos, las alturas determinadas con GPS y la altimetría satelital. A tal fin, se decidió la instalación de dos estaciones GPS permanentes, Bahía Blanca y Rawson, que actualmente se encuentran en pleno funcionamiento, y la instalación de dos estaciones adicionales, Mar del Plata y Puerto Deseado. Al mismo tiempo fue necesaria la realización de campañas de mediciones GPS periódicas, ocupando los sitios de emplazamiento de aquellos mareógrafos que contaran con series de tiempo suficientemente largas (decena de años) en sus registros: Mar del Plata, Pto. Belgrano y Pto. Madryn.[3]

En particular, en este trabajo, se utilizaron puntos de nivelación altimétrica de los tres tipos que se mencionaron, de alta precisión, de precisión y topográficos, ya que las zonas que se densificaron no siempre contaban con puntos de alta precisión.

1.3. Introducción al sistema geodésico nacional

Para empezar a hablar de la red geodésica de la provincia de Buenos Aires, primero vamos a explicar brevemente a qué nos referimos con red geodésica, cuál es la diferencia con la red altimétrica y cómo se vinculan, dado que esta vinculación es el eje fundamental de la idea de modelo de transformación de alturas.

Cuando describimos la red altimétrica nacional, nos referíamos a la determinación de una coordenada en particular; la altura sobre el geoide, este último, materializado con el nivel medio del mar, y nada hemos mencionado respecto a las posiciones, o coordenadas horizontales (latitud y longitud) de aquellos pilares altimétricos en los que se medía la altura.

Esto resulta así porque la determinación de las coordenadas astronómicas, latitud y longitud, es independiente de la determinación de las alturas ortométricas o cotas y viceversa. En este marco, la forma de la Tierra está asociada a un aspecto físico: el potencial gravitatorio, teorizado en el concepto del geoide. Las alturas se miden respecto a él y las coordenadas astronómicas carecen de significado geométrico, quedando referidas a la vertical (o dirección de la línea de la plomada) de cada sitio.

Por otro lado, cuando hablamos de sistemas geodésicos, se opta por una representación geométrica o matemática para describir la forma de la Tierra. Se define un elipsoide de revolución de referencia, caracterizado por los parámetros: semieje mayor (a) y excentricidad (e) o achatamiento (f) para asemejarlo a las características propias de nuestro planeta y respecto de él se determinan las coordenadas latitud y longitud geodésica, y la altura elipsoidal, h , de puntos en la superficie terrestre. Ver figura 1.1

Dentro de los sistemas geodésicos, se hace una división entre los locales; que son aquellos que utilizan como origen un punto **datum**, donde geoide y elipsoide son tangentes; y los sistemas globales, cuyos parámetros se definen con una terna directa rectangular (x,y,z) con origen en el geocentro.

En nuestro país, el marco geodésico más antiguo data de 1969 y se denomina Campo Inchauspe 69. El mismo tiene su datum en el punto que lleva su nombre y está referido al elipsoide internacional de Hayford 1924. Cuenta con 18000 puntos y una precisión del

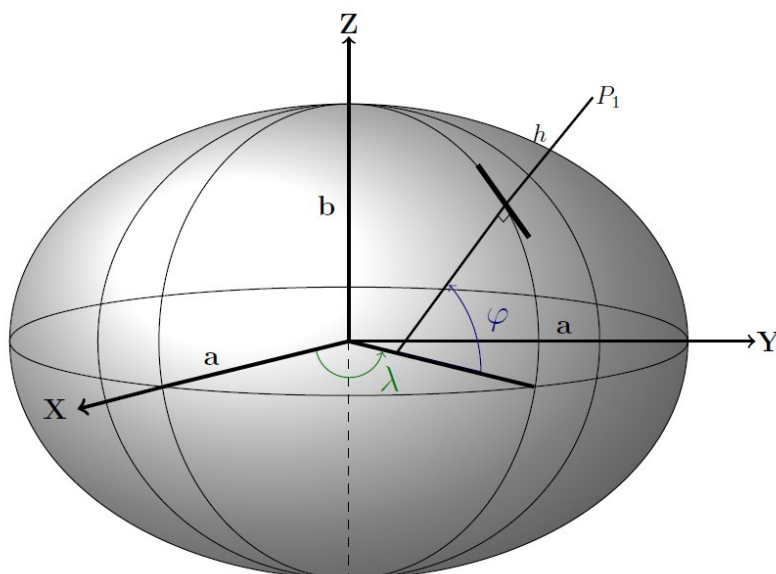


Figura 1.1. Latitud, Longitud y Altura Geodésicas -
 (http://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5172207)

orden de 1:300000. Es decir, una precisión relativa de 3 a 10 ppm (partes por millón). O sea, 3 m cada 1000 km.

Con la tecnología satelital, y el aprovechamiento del GPS, en 1997 se reemplaza el sistema clásico de Campo Inchauspe 69 por uno global tridimensional, el sistema POSGAR94⁸

POSGAR94 es producto de dos campañas GPS que se llevaron a cabo durante los años 1993 y 1994 por el IGN en cooperación con la UNAVCO⁹. Se posicionaron 127 puntos, incluyendo la mayoría de las intersecciones de cadenas del sistema Inchauspe y varios marógrafos a lo largo de las costas del Atlántico Sur. A partir de entonces se definía como el marco de referencia oficial, basado en el sistema de referencia geocéntrico WGS 84¹⁰ (1989), establecido por la Disposición 13/97 del Instituto Geográfico Nacional, dentro de sus atribuciones como autoridad geodésica y cartográfica del país (Ley 22963 - Ley de la Carta y Decisión Administrativa 520/96). El mismo se ajusta a ITRF92¹¹ con una exactitud decimétrica y errores relativos de 1ppm. POSGAR94 es común a CAI69 en 50 puntos, 19 de los cuales materializan a WGS84.

En paralelo, para el año 1995, ya estaba en marcha el proyecto SIRGAS¹², que en Argentina materializa al ITRS¹³ con exactitud centimétrica a través de 10 puntos. Se plantea, entonces, ajustar la red nacional POSGAR94 al marco SIRGAS95, es decir, hacer un reprocesamiento, siguiendo las recomendaciones del Grupo de Trabajo II de

⁸POSiciones Geodésicas Argentinas

⁹University Navstar Consortium

¹⁰World Geodetic System

¹¹International Terrestrial Reference Frame, Marco Internacional de Referencia Terrestre

¹²Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas, que adopta ese nombre más tarde con la incorporación de más países, pero que en principio aludía a Sistema de Referencia Geocéntrico para América del Sur

¹³International Terrestrial Reference System, Sistema Internacional de Referencia Terrestre

1. Sistemas de alturas de la provincia de Buenos Aires.

SIRGAS. Fue así como, con una importante colaboración entre la FCAGLP¹⁴ y el DGFI se trabajó en la producción de lo que se transformaría luego en POSGAR98 (Moirano, 2000)[4]. POSGAR98 constituye la densificación argentina del marco SIRGAS95-ITRF94 y materializa al ITRS con una exactitud de pocos centímetros. La red cuenta con 136 puntos a lo largo de todo el país, 111 de los cuales pertenecen también a POSGAR94 y 11 que pertenecen a SIRGAS y se utilizaron como puntos de control.

La solidez del POSGAR98, generó significativas diferencias con POSGAR94, que se dejan entrever a partir de los parámetros de transformación que se requieren entre un marco y otro. A saber, los errores medios se mantienen menores a 10 cm para las componentes horizontales, pero alcanzan los 40 cm para la altura. Más detalles sobre estas descripciones y comparaciones entre POSGAR94 Y POSGAR98, se encuentran en el trabajo *Improvements in the Ellipsoidal Heights of the Argentine Reference Frame* [5]. Cabe resaltar el hecho de que POSGAR94 muestra así una gran deficiencia respecto de la altura elipsoidal, ya que esta información será utilizada más adelante, mientras que las alturas de POSGAR98 están en común acuerdo con SIRGAS dentro de los 4 cm. Aún así, POSGAR98 nunca fue oficialmente adoptado.

1.4. Adopción de POSGAR07

En mayo de 2009, el IGN adopta como nuevo marco de referencia geodésico nacional a POSGAR07, en reemplazo de POSGAR94, basado en ITRF05, (época 2006.63) y compatible con SIRGAS. El mismo utiliza como red de orden cero al conjunto de estaciones permanentes GNSS (Global Navigation Satellite System) de la Red RAMSAC¹⁵. POSGAR07 fue medido sobre los puntos de la red POSGAR94, pero incorpora 50 nuevos puntos para mejorar la geometría espacial y optimizar los resultados del ajuste. Si a esos datos se integran las demás redes que se suman al nuevo marco, hablamos de un total de 436 puntos¹⁶. En particular, tanto el CPA, como la DG-MI y la FCAGLP cooperaron con la vinculación del marco GEOBA al nuevo marco oficial.

1.5. La red geodésica de la provincia de Buenos Aires GEOBA

En 1998 mediante un convenio entre la FCAGLP y la Dirección de Geodesia, del entonces, MOSP¹⁷ se midieron con GPS 200 pilares del sistema altimétrico nacional del IGN, o sea, con cota conocida. Conformando así la primera *red geodésica de la provincia de Buenos Aires* en lo que resultó GEOBA98. Estos puntos están distribuidos sobre todo el territorio provincial con distancias típicas de 50 km; y dentro de los mismos, 120 comprenden pilares dobles separados por 3 km.

¹⁴Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata

¹⁵Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo

¹⁶Extraído de la página del IGN: <http://www.ign.gob.ar/AreaProfesional/posgar07>

¹⁷Ministerio de Obras y Servicios Públicos

1.6. DEFINICIONES Y CONCEPTOS FUNDAMENTALES VINCULADOS AL GEOIDE Y LA DETERMINACIÓN DE ALTURAS

En 2001-2002 se densifica la red. Se agregan las determinaciones de 102 puntos vinculados a POSGAR94, pero con una salvedad a fin de no absorber el error en altura que POSGAR94 trae acarreado. Esto se logra a partir de compensar el procesamiento en el marco ITRF96, materializado en la región por 3 puntos SAGA:¹⁸ LPGS (La Plata), SITI(Tandil) y SIVE(Sierra de la Ventana) y luego desplazando las coordenadas ITRF96 de manera de hacer coincidir las coordenadas del punto IGM0 con las coordenadas propias del punto en POSGAR94. De modo que la red GPS de la provincia de Buenos Aires coincide con POSGAR94 en un único punto y no está deformada en ningún sentido, es decir, GEOBA02 queda vinculada a POSGAR94 pero no presenta el problema de la altura. Cada una de estas estaciones se procesó contra la estación de control más cercana, entendiéndose por estaciones de control a aquellas pertenecientes a GEOBA98, obteniéndose errores medios entre 1 y 2 cm para las componentes horizontales, y 2 a 3 cm en altura.

En Perdomo et. al, 2001[6] se muestran los resultados de un posterior recálculo de la Red en el marco POSGAR98 y se concluye que la red puede ser calculada en este marco, siguiendo las recomendaciones de SIRGAS, sin sufrir distorsiones ni deformaciones significativas.

Desde el 2002 hasta la actualidad, se realizaron diferentes tareas de densificación y en su mayoría vinculadas al modelo de transformación de alturas. Entre ellas cabe mencionar el trabajo de licenciatura de María Eugenia Gómez[7], que incorpora mediciones GPS sobre 36 puntos del noroeste de la provincia; de los cuales: 14 ya pertenecían a la red GEOBA98, y 22 puntos se agregan a fin de efectuar su estudio. Estos nuevos puntos forman parte de GEOBA02 y fueron considerados entre los que se utilizaron durante la campaña de 2010 para este nuevo modelo de transformación de alturas que se presenta en nuestro trabajo.

1.6. Definiciones y conceptos fundamentales vinculados al geoide y la determinación de alturas

Hasta acá hemos mencionado términos como geoide, o elipsoide de referencia, y hemos hablado del concepto de altura desde un punto de vista muy descriptivo. Pasemos a mencionar algunas definiciones precisas que ofrecen el contexto teórico para entender las ideas vinculadas a la altura.

1.6.1. El geiode

Si pensamos en un cuerpo sobre la superficie de la Tierra, una de las fuerzas a las que se ve sometido, es la producida por el campo de gravedad. Entendemos por campo de gravedad, a la resultante de considerar: la fuerza de atracción gravitacional propia de nuestro planeta, y la fuerza centrífuga debido a la rotación terrestre.

¹⁸Actividades Geodinámicas Sud Americanas - Proyecto GFZ Potsdam que involucra redes de alta precisión en Argentina

1. Sistemas de alturas de la provincia de Buenos Aires.

Ambas fuerzas pueden derivarse de potenciales, y hablamos entonces del potencial de gravedad W , como aquel que se compone del potencial gravitacional V , más el potencial centrífugo Φ .

$$W = V + \Phi \quad (1.1)$$

A partir de esta definición de potencial, resulta el concepto de *superficies equipotenciales*, que son aquellas superficies donde $W = cte$.

El **geoide** no es otra cosa, que una de esas superficies, que hemos optado elegir para representar la forma de la Tierra desde un aspecto físico y como referencia de origen para las alturas ortométricas (H). Para tomar una decisión sobre cuál elegir de todas las superficies equipotenciales posibles, recurrimos a los océanos; ya que más del 70 % de la superficie de nuestro planeta la conforman los océanos y el agua es libre de moverse para ajustarse a la fuerza que el potencial de gravedad le ejerce; podemos pensar al nivel medio del mar como una primera aproximación a una materialización de una superficie equipotencial. No obstante, los océanos no se encuentran en equilibrio debido a las corrientes oceánicas, u otros efectos cuasi-estacionarios, es por ello que la definición de geoide no es tan sencilla. A su vez, se suman efectos de deformación permanente ocasionada por el Sol y la Luna.

En conclusión, entendemos al geoide como: la superficie equipotencial que mejor se ajusta al nivel medio del mar en una cierta época (Mather 1978, Rapp 1995). Y agregamos luego, la consideración de tres tipos de geoide posibles, a saber [7]:

- Geoide Libre de mareas (non-tidal o Tide Free), cuando los efectos directos e indirectos del Sol y la Luna fueron removidos.
- Geoide Medio (Mean), que incluye el efecto directo de atracción y el efecto indirecto de deformación.
- Geoide Cero (Zero), que elimina el efecto de atracción pero retiene el de deformación.

1.6.2. Las superficies de nivel, el vector de la gravedad y la altura ortométrica

[12]

El gradiente del potencial W , para el punto (x,y,z) :

$$\text{grad}W = \left(\frac{\partial W}{\partial x}, \frac{\partial W}{\partial y}, \frac{\partial W}{\partial z} \right)$$

es lo que definimos como vector de la gravedad \bar{g} y encierra la fuerza total (gravitacional y centrífuga) que actúa sobre una unidad de masa, ubicada en el punto. Su dirección siempre será la de la *línea de la plomada* o *vertical*.

1.6. DEFINICIONES Y CONCEPTOS FUNDAMENTALES VINCULADOS AL GEOIDE Y LA DETERMINACIÓN DE ALTURAS

Derivando el potencial en un punto de coordenadas (x,y,z) , resulta:

$$dW = \left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)dx + \left(\frac{\partial W}{\partial y}\right)dy + \left(\frac{\partial W}{\partial z}\right)dz = \bar{g}.d\bar{x}$$

Por lo tanto, si nos movemos sobre una misma superficie, es decir, $d\bar{x}$ es un vector sobre una misma equipotencial, entonces \bar{g} resultará siempre perpendicular a las superficies, pues:

$$dW = 0 = \bar{g}.d\bar{x}$$

Luego, las líneas que intersectan las superficies equipotenciales son curvas y \bar{g} es tangente a esas curvas en cada punto.

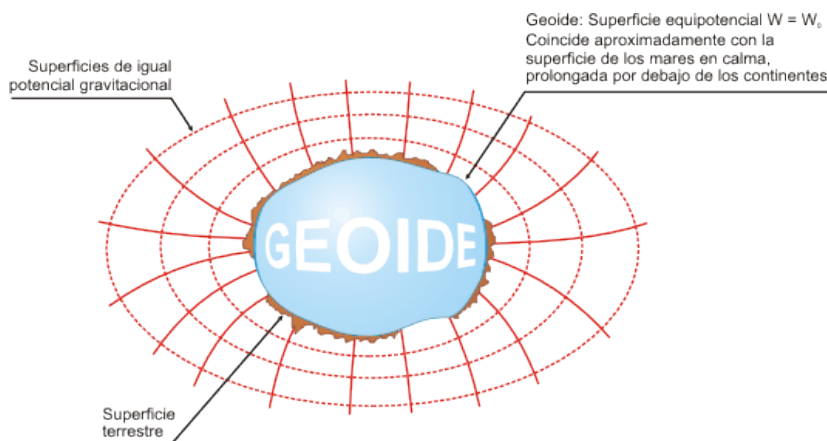


Figura 1.2. El Geoide y sus superficies equipotenciales

19

Bajo estas premisas, la altura de un punto sobre el nivel del mar, conocida como **Altura Ortométrica H** se mide a lo largo de la línea de la plomada a partir del Geoide. Considerando un $d\bar{x}$ en dirección creciente con las alturas, es decir, $d\bar{x} = d\bar{H}$. Dirección opuesta a la que asignamos a \bar{g} , de modo que nos queda:

$$dW = \bar{g}.d\bar{x} = \bar{g}.d\bar{H} = g.dH \cos(\bar{g}.d\bar{H}) = -gdH$$

Lo fundamental de esta ecuación que nos relaciona la altura con la diferencia de potencial, es que en ella queda plasmado el vínculo entre conceptos geométricos (H) y dinámicos (W).

Existe también otro planteo que nos conduce a la definición de Altura Ortométrica a partir del concepto de Número Geopotencial (C): Donde $C = W_0 - W$ y resulta $C = \frac{H}{\bar{g}}$ que para este caso \bar{g} es la gravedad media a lo largo de la línea de plomada, y se define como: $\bar{g} = \left(\frac{1}{H}\right) \int_0^H g dH$.

No profundizaremos en estas ideas, cuyo desarrollo se encuentra detallado en el libro de Heiskanen [12].

1.6.3. Las diferencias de altura y la nivelación

Cuando mencionábamos redes o líneas de nivelación medidas a partir del mareógrafo de Mar del Plata, nos referíamos a la determinación de diferencias de alturas entre puntos. Para ello, dados dos puntos, se sitúan varillas verticales graduadas en cada punto y un instrumento de nivelación en el medio.

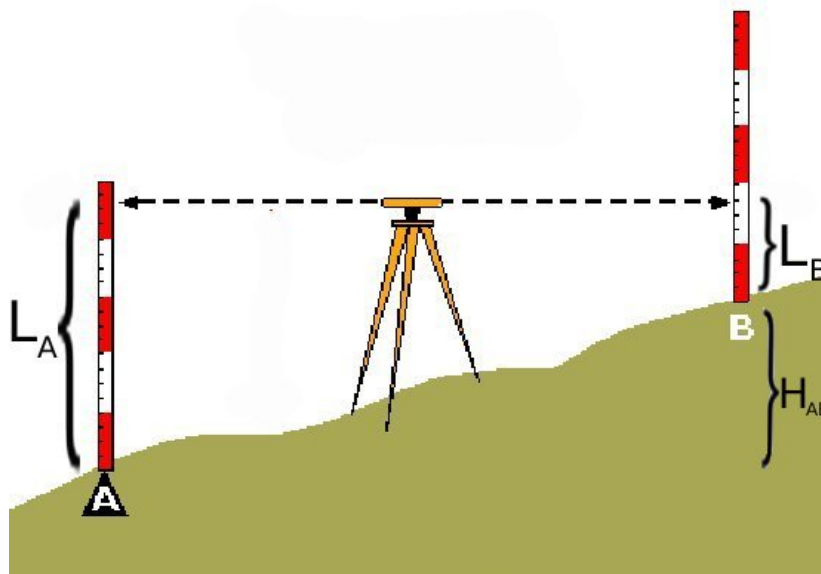


Figura 1.3. Técnica de Nivelación²⁰

Donde, $H_{AB} = L_A - L_B$ representa la diferencia de alturas ortométricas relativa entre los puntos A y B.

Ahora, el hecho de que las superficies equipotenciales o superficies de nivel no sean paralelas (ver figura 1.4) conlleva a que las mediciones de desniveles de altura Δn no coincidan con las diferencias entre los valores de las alturas ortométricas $H_A - H_B$ entre un punto A y un punto B. Dicho de otro modo, para puntos A y B alejados, si se quiere medir una línea de nivelación, se aplica varias veces la técnica de medición basada en miras y niveles en puntos intermedios desde A hasta llegar a B. Pero, la suma de los desniveles obtenidos, Δn , no coincide con la diferencia de alturas ortométricas H_B determinada a lo largo de la línea de la vertical en el punto B.

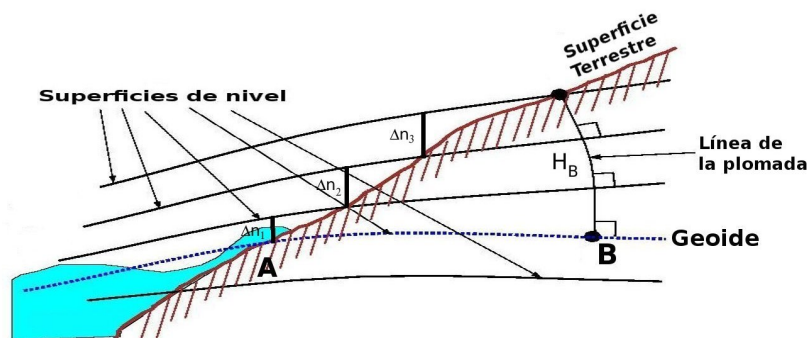


Figura 1.4. Las Superficies Equipotenciales²¹

1.7. IRRELEVANCIA DE LAS CORRECCIONES ORTOMÉTRICAS PARA ESTE TRABAJO

Si en cada estación, tenemos medidas de la gravedad, g . Entonces:

$$\delta W = g \delta n$$

y para todo el camino entre A y B, la expresión sería:

$$W_A - W_B = - \int_A^B g \, dn$$

Como W no es una función que depende del camino,

$$\oint W = 0$$

A diferencia de

$$\oint dn \neq 0$$

De modo que debemos conocer el valor de g además de los desniveles para lograr una acumulación que no dependa de la trayectoria.

Con estas conclusiones queda claro que para establecer una referencia altimétrica rigurosa es necesario efectuar redes de nivelación, con la inclusión de mediciones de gravedad sobre líneas fundamentales y contar con estaciones mareográficas con amplios periodos de observación.

1.7. Irrelevancia de las correcciones ortométricas para este trabajo

Si bien, y de acuerdo a lo expuesto en el ítem anterior, la transformación del dato Δn a ΔH nos demanda conocer el valor de la gravedad, tanto en puntos de la superficie como en el interior; uno no cuenta con esta información. Se utiliza, entonces, la *Corrección ortométrica*, CO_{AB} que se suma a la diferencia de nivel medida, a fin de convertirla en una diferencia de alturas ortométricas, bajo una suposición sobre la densidad de las capas por debajo de la superficie.[12]

Para dos puntos A y B.

$$\Delta H_{AB} = \Delta n_{AB} + CO_{AB} \quad (1.2)$$

$$CO_{AB} = \sum_A^B \frac{g - \gamma_0}{\gamma_0} \delta n + \frac{\bar{g}_A - \gamma_0}{\gamma_0} H_A - \frac{\bar{g}_B - \gamma_0}{\gamma_0} H_B$$

Donde:

- g es el dato de gravedad en cada punto
- g_A es el dato de gravedad en el punto inicial

1. Sistemas de alturas de la provincia de Buenos Aires.

- g_B es el dato de gravedad en el punto final
- γ_0 es la gravedad normal a 45° grados de latitud.

A partir del planteo anterior, vemos que en la situación práctica en la que se hicieron las mediciones se introduce un error al considerar las cotas de la red altimétrica como alturas ortométricas, ya que las mismas provienen de mediciones de nivelación pero sin correcciones de gravedad.

Dado que no se tienen datos de gravedad para todos los puntos de las observaciones de la campaña que se analiza a continuación, y que, a su vez, los puntos que se miden no pertenecen a líneas de nivelación, no puede calcularse en ellos la corrección ortométrica. Es decir, nosotros vamos a considerar los valores de los pilares altimétricos como alturas ortométricas aunque éstas no lo son exactamente.

Este margen resulta aceptable si tenemos presente, por ejemplo que al calcular las correcciones ortométricas para 2 líneas de nivelación que atraviesan distintas regiones a lo largo de la provincia de Buenos Aires, vemos que el error que se comete resulta, en ambos casos, menor a 1 cm (Ver tabla 1.1)

Denominación	ΔH	CO_{ab} [cm]
N45	-160.244	0.6542
N36	-1.669	0.02320
N130	-8.101	0.01608

Tabla 1.1. Valores de la corrección ortométrica para 3 líneas de nivelación de la provincia de Bs. As.

Del análisis de los datos se desprende que las diferencias de nivel son siempre en descenso, y conociendo que la topografía no presenta irregularidades a lo largo de la trayectoria, se descarta que tan pequeño valor sea debido a compensaciones oscilatorias, de modo que podemos aceptarlo como un límite extremo para las mediciones realizadas dentro de la provincia.

1.7.1. El elipsoide

Otra manera de pensar o representar la forma de la Tierra, es desde un punto de vista más matemático o geométrico. Para ello se considera un elipsoide de revolución con un potencial gravitatorio asociado, que resulta matemáticamente accesible para calcular.

El elipsoide queda determinado por su semieje mayor (a), la excentricidad (e) o el achatamiento (f), y luego se agrega el dato de la masa total (M) y la velocidad angular de rotación (ω) para poder definirlo de forma única para representar el potencial normal de gravedad.

Para un punto cualquiera por encima del elipsoide, la **Altura Elipsoidal** h será aquella medida desde el punto al elipsoide, a lo largo de la línea perpendicular al mismo,

que pase por dicho punto. La altura elipsódica cuenta con la facilidad de que puede determinarse con técnicas de sistemas de navegación satelital en cualquier punto de nuestro planeta.

1.8. Relación entre alturas

Una vez vistas las definiciones más formales, y con todo lo mencionado hasta este punto, veamos la relación más importante que va a utilizarse a lo largo lo que sigue. La vinculación que resulta entre las alturas es la siguiente

$$h = H + N \quad (1.3)$$

Donde N , representa la altura elipsódica del Geoide, y la conocemos como la *Ondulación*.

A esta expresion vamos a referirnos una y otra vez, y es lo que entendemos por **Modelo de Transformación de Alturas**.

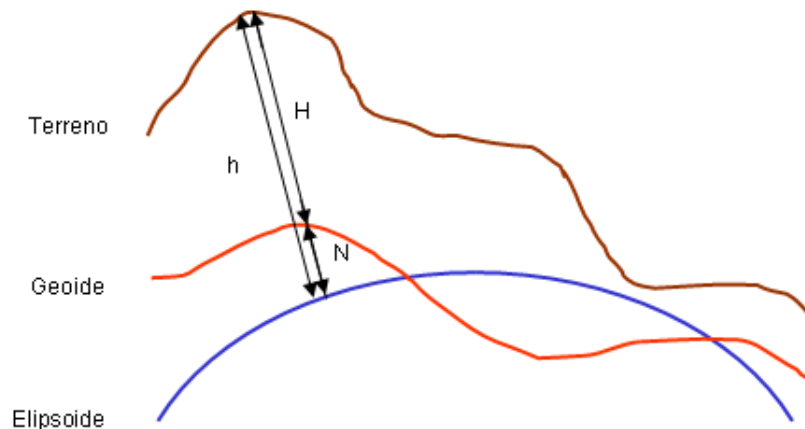


Figura 1.5. Altura elipsódica, ortométrica²² y ondulación del geoide.

Es decir que, con un modelo de geoide que nos provea el valor de N correspondiente a un sitio de coordenadas conocidas; alcanza con sólo determinar mediante técnicas satelitales la altura h , para obtener el dato de la cota.

En este punto es fundamental aclarar que todo esto vale, siempre y cuando se esté trabajando dentro del mismo marco. Es decir, **N y h deben estar referidos al mismo marco de referencia.**

1. Sistemas de alturas de la provincia de Buenos Aires.

Capítulo 2

Modelo de transformación de alturas de la provincia de Buenos Aires y relación con los Modelos Gravitacionales Globales.

2.1. Introducción.

Retomando la idea de *modelo de transformación de alturas* que vimos en el capítulo anterior, y que se resumía en la expresión $H = h - N$, describimos el modelo previo a este trabajo, que permitía la determinación de la ondulación del geoide (N) para la provincia de Buenos Aires, y lo denominaremos FCAG02.

Luego mostramos las ventajas respecto a su predecesor, el modelo FCAG98¹ y las diferencias que se encuentran entre los valores de N determinados por FCAG02 y los que se obtienen del MGG EGM2008 (Pavlis et al, 2008).

En este tipo de análisis se deja entrever, que cada nueva densificación geodésica, sobre puntos de nivelación, facilita una evaluación del modelo anterior, ofrece un nuevo modelo de transformación y permite una comparación con los modelos globales en sus versiones más actualizadas.

2.2. El modelo anterior de transformación de alturas

El problema de determinar la ondulación del geoide se puede abordar de varias maneras:

- Con modelos globales del campo de gravedad terrestre o modelos geopotenciales.

¹Modelo elaborado en la FCAGLP por L. Mendoza y R. Perdomo

2. Modelo de transformación.

- Mediante perfiles astrogeodésicos.
- Con Altimetría Satelital Radar del nivel medio del mar.
- Mediante el tratamiento de anomalías de gravedad.
- Con mediciones GNSS (Sistemas Globales de Navegación Satelital) sobre puntos de nivelación.

El modelo que vamos a describir, se basa en la última de ellas, aprovechando el marco de referencia geodésico desarrollado con mediciones GPS en puntos de nivelación de la provincia de Buenos Aires, que vimos en el capítulo anterior.

2.3. Modelo de transformación de alturas FCAG02

FCAG02, se consolidó en el año 2002, con la densificación ya mencionada de la red GEOBA de aquel entonces (GEOBA98). Como todos los puntos de esta nueva red, GEOBA02 son pilares de cota (H) conocida y referencia geodésica medida, se obtuvo en aquellos puntos el valor para la ondulación de geoide.

El modelo consiste entonces, en métodos de interpolación numérica que permiten obtener los valores de N para cualquier otro punto de coordenadas geodésicas conocidas, por ejemplo, determinadas con GPS. Todo dentro del mismo marco de referencia.

En este sentido, un exhaustivo estudio de la validación del modelo en el marco POSGAR98, se encuentra en el trabajo de Perdomo y Del Cogliano [6]

La técnica de interpolación utilizada para este modelo fue la de Kriging, aunque otros trabajos, como la ya nombrada tesis de Eugenia Gómez [7] y uno referido a la precisión del geoide bonaerense [9] mencionan que la técnica de mínima curvatura, muestra resultados similares, con alguna salvedad para los puntos de borde.

Para la evaluación del modelo previo, FCAG98[8] se calcularon los valores de N, de los 102 nuevos puntos de la densificación de 2002 a partir de la interpolación de la grilla conformada con los datos de la red sin densificar. Luego se compararon esos valores, con los que se obtuvieron con las mediciones de la campaña GPS.

El resultado más importante fue que el 67% de los puntos presentaba diferencias menores a 10 cm, en concordancia con las estimaciones que se tenían para el modelo FCAG98. Y el 84% menores a 15cm. Ver histograma 2.1

Un análisis importante de la discusión que se plantea en el Informe Final (Perdomo 2002) [8], detalla sobre los 16 puntos con diferencias iguales o superiores a 15 cm y menciona que:

- 2 se encuentran en una región desprovista de datos de la red de 1998.
- 5 se encuentran en zonas de sierra, donde el gradiente del geoide es muy fuerte.
- 8 son puntos de borde, donde naturalmente las técnicas de interpolación disminuyen su calidad.

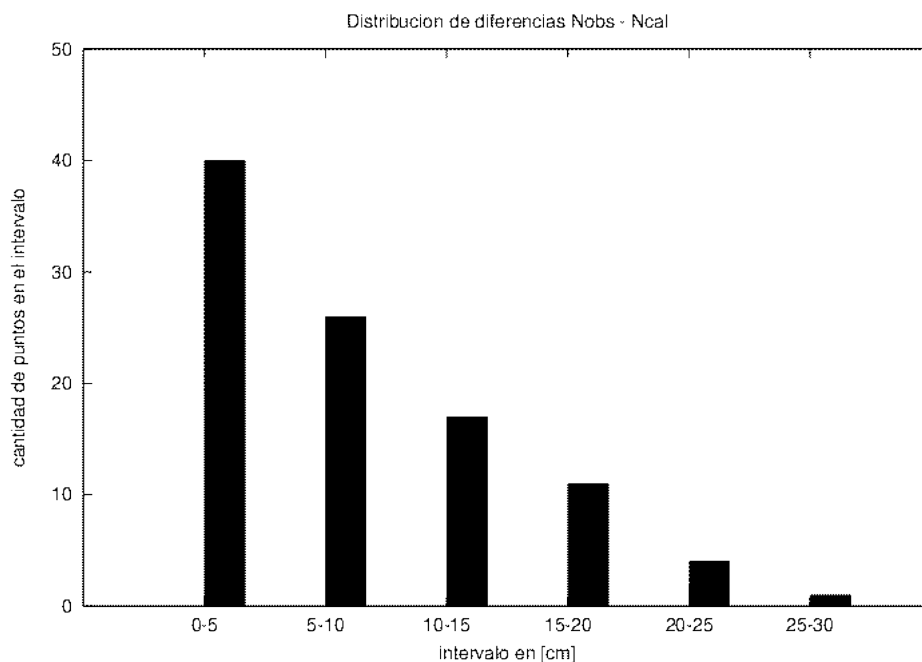


Figura 2.1. Cálculo de las diferencias de N para los puntos de la densificación en 2002, interpolando con una grilla en GEOBA98

- 1 presenta este valor en una zona inesperada, ya que el modelo FCAG98 debiera garantizar un error menor.

Así, los 7 primeros son completamente lógicos y mejoran con la densificación, mientras que los 8 siguientes, indican que resulta importante densificar zonas de borde.

La comparación análoga, entre el modelo 2002, y el nuevo modelo a partir de la densificación 2010, se presenta en el capítulo 4 y es el eje de este trabajo de tesis.

Es fundamental destacar que, para la construcción del modelo 2002, la elección de los puntos que densifican la red no siguió otro criterio que el de lograr, una red relativamente uniforme con distancias típicas entre puntos del orden de los 30km. Esta información será crucial para el posterior análisis de comparación con el nuevo modelo 2011 que se propone.

2.4. Los Modelos Geopotenciales Globales

Los Modelos Geopotenciales Globales nos permiten determinar el geode en forma global, es decir para todo el planeta. Reúnen toda la información que se encuentra hoy a disposición, gracias a las distintas técnicas de medición. Como ser: observaciones gravimétricas, GPS, DORIS², SLR³, altimetría satelital y las más modernas técnicas

²Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite

³Satellite Laser Ranging

2. Modelo de transformación.

satelitales de medición gravimétrica y control de la circulación de los océanos, como por ejemplo GRACE⁴ y GOCE⁵.

Modelizan el potencial terrestre con una función analítica, en su desarrollo de armónicos esféricos y considerando toda la información reunida con técnicas satelitales, datos de gravedad, altimetría satelital y ajustes numéricos, se determinan los coeficientes de manera observacional.

El EGM2008

Las siglas EGM responden a Earth Gravitational Model o Modelo de Gravedad de la Tierra. En particular el número 2008, hace referencia al modelo más actualizado, y aceptado por la comunidad científica (K. Pavlis, 2008).

En resumen, como se señala en la presentación de Pavlis [10] el modelo combina datos de gravedad de GRACE, es decir satelital, con información de una base de datos de anomalías de gravedad medidas en tierra, con resolución de 5' x 5'. A su vez, el modelo utiliza un desarrollo en series para la expresión de la ondulación, hasta grado 2160, con algunos términos adicionales que alcanzan el grado 2190.

Tanto los coeficientes del modelo como los productos vinculados, pueden obtenerse de la página <http://earth-info.nima.mil/GandG/>. De allí, obtuvimos el software para calcular los valores de la ondulación que ofrece este modelo, N_{egm08} para nuestra región, a saber: `hsynth_WGS84.exe`

En lo que continúa de esta presentación, es recurrente la comparación entre valores regionales para N , obtenidos con el *modelo de transformación de alturas* a partir de mediciones GPS, y los valores que resultan del cálculo que ofrece este modelo Global en la región a través del software mencionado.

Trabajos análogos, realizados en Australia, presentados en la publicación de Pavlis, ver [10] dan valores para las desviaciones estándar del orden 10 cm.

2.5. Comparaciones

Resulta interesante comparar los resultados que se obtienen con nuestros modelos regionales, que van mejorándose a partir de densificaciones, en relación a los que se obtienen con los modelos globales, que también van actualizándose en paralelo y mejorando sus resoluciones. Así, podemos mencionar de acuerdo al informe técnico (Perdomo, 2010) [11] que, los valores que se obtienen para N en el MGG EGM96, en comparación con los que resultan del N calculado en cada uno de los puntos del marco GEOBA02, muestran una diferencia promedio que ronda los 70 cm, con una desviación estándar de 15 cm.

Mientras que para el nuevo modelo gravitacional global EGM2008, las diferencias promedio con las N calculadas en GEOBA02 (ahora ya procesado en POSGAR07), se

⁴Gravity Recovery And Climate Experiment

⁵ESA's Gravity field and setadystate Ocean Circulation Explorer

reducen drásticamente, alcanzando un valor promedio de 20 cm para la diferencia, y sólo 8 cm en la desviación estándar. Ver figura 2.2

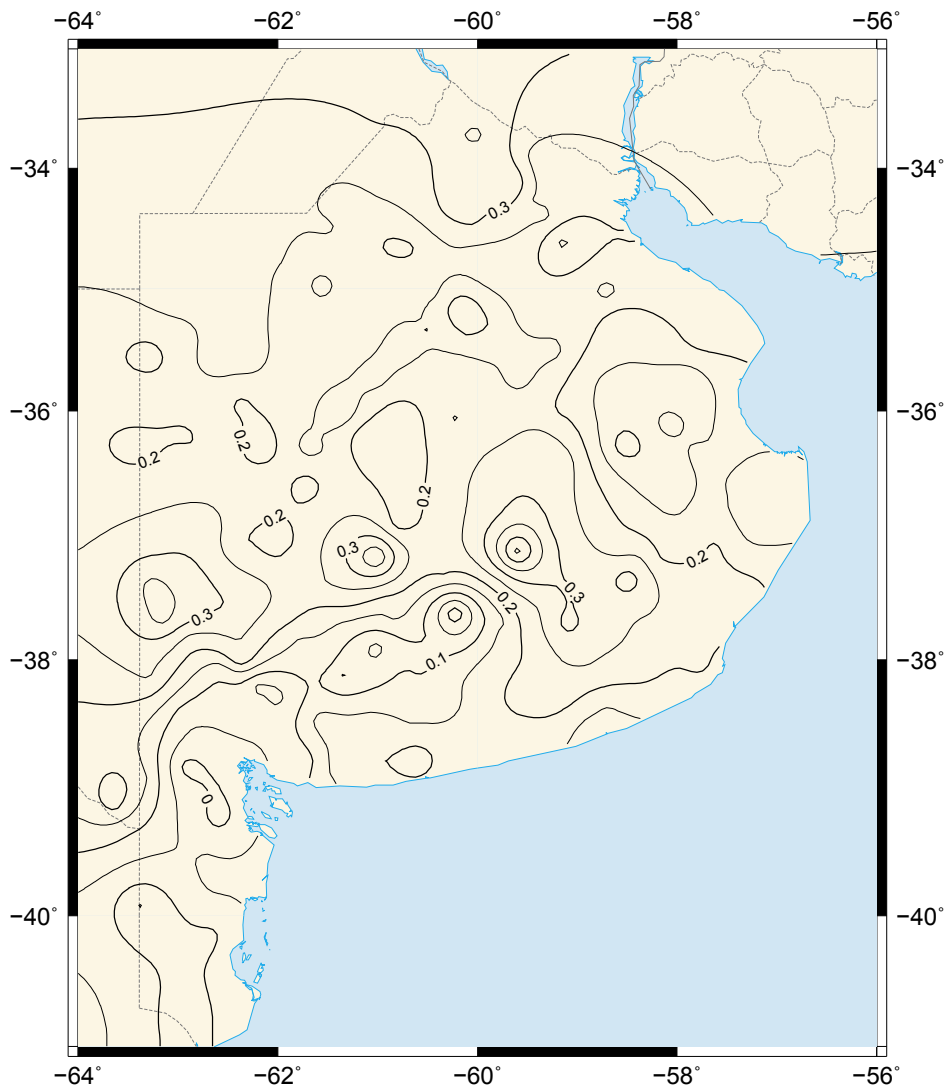


Figura 2.2. Comparación del modelo anterior de TDA FCAG02 con el EGM2008 en [m]

En el capítulo 4, ampliaremos esta comparación, con el nuevo modelo de transformación de alturas tdaGEOBA, 2011.

2. Modelo de transformación.

Capítulo 3

Densificación de GEOBA02 mediante la campaña de medición 2010 y mediciones adicionales 2011

3.1. Introducción

Los últimos avances y acuerdos ya mencionados, en relación al sistema de referencia terrestre; como la adopción del sistema POSGAR07, la incrementación del número de estaciones permanentes, y la aceptación del nuevo modelo gravitacional global EGM2008, motivaron el ajuste de ciertas redes, como la GEOBA, y el estudio de un nuevo modelo local de transformación de alturas.

En este contexto, en el año 2010, se conforma una comisión integrada por el CPA, el IGN, la UNLP y otras universidades (UNMdP¹, UNS², UNICEN³) para revisar la vinculación de mensuras al marco de referencia, sumar los datos de todas aquellas estaciones permanentes y lograr un modelo de transformación de alturas mejorado [11]. Se inicia así un proyecto de densificación selectiva, financiado por el CPA.

Resumimos a continuación las conclusiones de los datos medidos durante la campaña del año 2010, el resultado del procesamiento, y de manera similar, lo hacemos para nuevas mediciones del año 2011, que fueron necesarias para subsanar observaciones que mostraban errores fuera del valor estimado.

¹Universidad Nacional de Mar del Plata

²Universidad Nacional del Sur

³Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires

3.2. Descripción y estudio de la densificación de puntos realizada en el año 2010 en cooperación con la Dirección de Geodesia y el Consejo Profesional de Agrimensura⁴

Durante el año 2010, un grupo de profesionales del CPA, del IGN y de las Facultades de Cs. Astronómicas y Geofísicas, e Ingeniería, realizan mediciones que amplían la red con 50 puntos. Es importante mencionar, que esos puntos son estratégicamente elegidos para ocupar lugares donde no se contara con puntos previos en la red, o donde los puntos de la región, presentarían alguna falencia. Con esto estamos remarcando la idea de que la densificación no es aleatoria ni uniforme, sino que es intencionalmente selectiva. Como se ve en la figura 3.1, donde los puntos circulares en celeste señalan la densificación.

3.3. Metodología y procesamiento de la campaña 2010

Se realizaron mediciones GPS sobre pilares altimétricos, de los tres tipos que ya se mencionaron: alta precisión, precisión y topográficos.

Se trabajó con diferentes equipos de doble frecuencia: Trimble R6, 5800, 5700, 4400, 4700; Ashtech z12, y Topcon entre los que más se usaron. Con antenas: interna r6, zephyr, comp l112 wgp, topcon gr3.

Los tiempos empleados fueron de 12 hs en cada punto.

Luego se procesaron los datos con el Software TGO⁵, generando líneas de base de cada punto a las estaciones de control más cercanas; entendiendo por estaciones de control, a aquellas de la red GEOBA, procesada en POSGAR07, o estaciones permanentes que conforman la red RAMSAC; garantizando de esa manera la compatibilidad del marco de referencia para vincular las alturas.

Agregamos a modo de ejemplo una tabla 3.1 que describe tres de los resultados del procesamiento para las observaciones de uno de los días de la campaña. En las últimas dos columnas se indican los valores para el Ratio y el Reference Variance, ambos indicadores de la precisión de la solución. El Ratio resulta del análisis estadístico para las distintas soluciones que ofrece el procesamiento; es el cociente entre las varianzas de las dos mejores combinaciones de ambigüedades y marca qué tan bien resolvió ambigüedades. El Reference Variance, por otro lado, compara el error a priori, respecto del obtenido; de manera que uno pretende valores cercanos a 1.

Con el dato de la cota para cada punto más los valores de h que resultan del procesamiento, calculamos los valores para la ondulación. Comparando esos valores con los

⁴Convenio de Cooperación CPAUNLP

⁵Trimble Geomatics Office

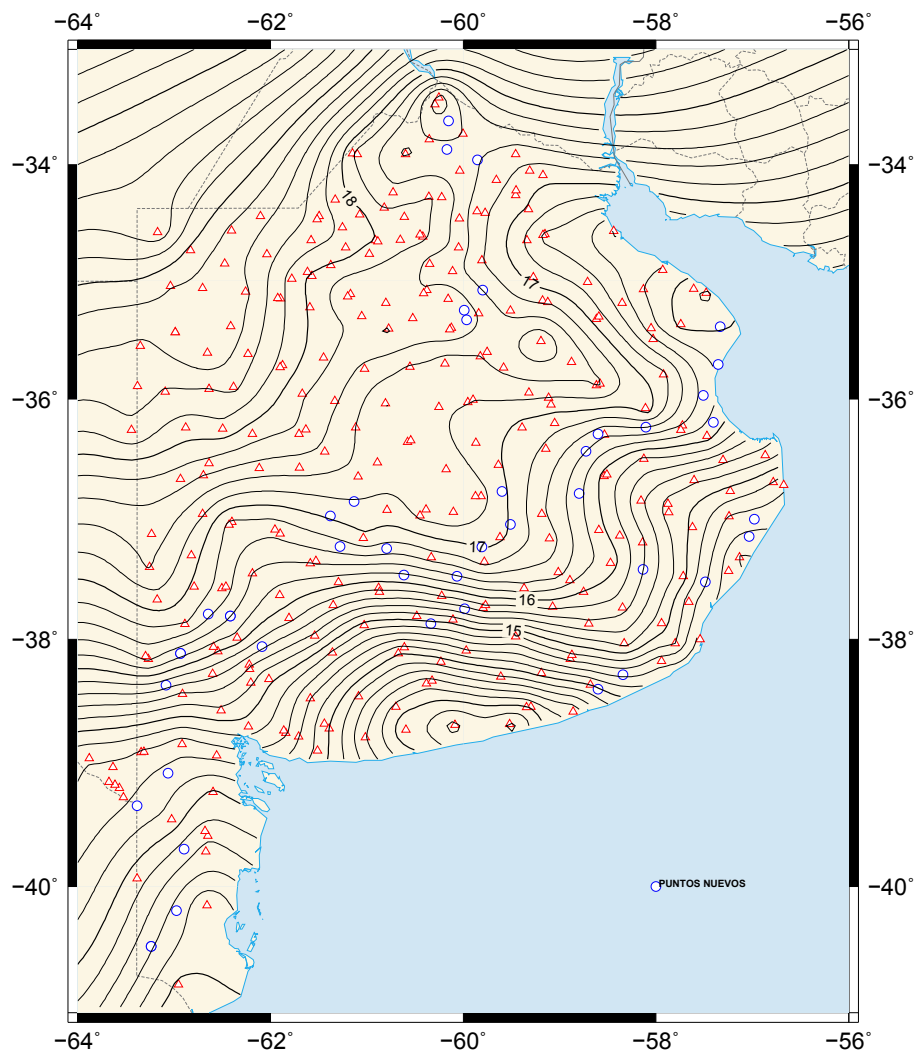


Figura 3.1. Ubicación de los nuevos puntos GPS respecto de la red anterior (GEOBA02). Los contornos señalan los valores de la ondulación en cm.

que ofrece el EGM2008 y luego interpolando la diferencia $Nobs - Negm08$, obtenemos un gráfico como el que se muestra en la figura 3.2. La decisión de interpolar la diferencia, y no los valores de la ondulación directamente, tiene que ver con una cuestión puramente numérica, debido a cómo responden los métodos de interpolación. Los valores de $Nobs$ varían mucho a lo largo de la región y presentan un amplio rango;

3. Densificación de GEOBA02

Punto	λ	ϕ	Est. de control	h[m]	Ratio	Ref. Variance
p23pac	-59.336223	-37.297460	TURI	189.13	25	1.2
			AZUL	189.13	6	1.1
p21pac	-59.599337	-36.777579	TURI	140.64	21	1.2
			AZUL	140.64	26	0.8
p22PAC			TURI	165.14	14	1.0
			AZUL	165.13	17	1.0
...

Tabla 3.1. Mediciones y procesamiento para un día de la campaña de 2010

lo que introduce errores en el métodos. En contraposición, la diferencia con el modelo global, acota todos los valores a un rango menor, mejorando el ajuste del método de interpolación.

Existen 4 puntos hacia el centro sur, en los que se presentan gradientes superiores a los esperados, ya que son puntos cercanos en regiones de topografía regular y no deberían aparecer gradientes notorios. Esta discrepancia fue motivo de realizar nuevas mediciones para esos puntos.

3.4. Nuevas mediciones adicionales que incluyen trabajo de campo y procesamiento de la información que se incorpora

Dado, entonces, que entre los puntos: p19cas y CASA, p21pac y PACO, p28rbun y RBUN, y p32roch con ROCH se encontraban gradientes superiores a los esperados, y que estos se ubicaban en regiones donde la topografía no mostraba singularidades que impidieran que el modelo se apartara más allá de los valores estimados, se tomaron nuevas mediciones. Se realizó una tarea de campo, para tomar nuevos datos en los puntos, y se reprocesó la información. El trabajo de campo consistió en mediciones simultáneas entre los puntos: p19cas-CASA, p21pac-PACO, p28rbun-RBUN y p32roch-ROCH, por un mínimo de tiempo de 2 hs 30 min, con equipos Trimble 4000 y 4700 de doble frecuencia.

La información fue luego procesada con el mismo software (TGO) y bajo los mismos criterios que los datos de la campaña anterior. Se utilizaron las estaciones permanentes de AZUL y BALCARCE, como estaciones de control.

Algunos de los resultados se plasman en la tabla: 3.2

Al analizar las diferencias respecto de la campaña 2010, vemos que existe un valor muy similar en 3 de ellas. Y comparando con las otras observaciones, notamos que para estos sitios se utilizó una antena diferente, a saber TOPCON GR3. De manera que nos resulta evidente que el error se deba a una inconsistencia con la medición de la altura de la antena; ya sea un error de medición o un problema de reconocimiento de este equipo por parte del software.

3.4. NUEVAS MEDICIONES ADICIONALES QUE INCLUYEN TRABAJO DE CAMPO Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN QUE SE INCORPORA

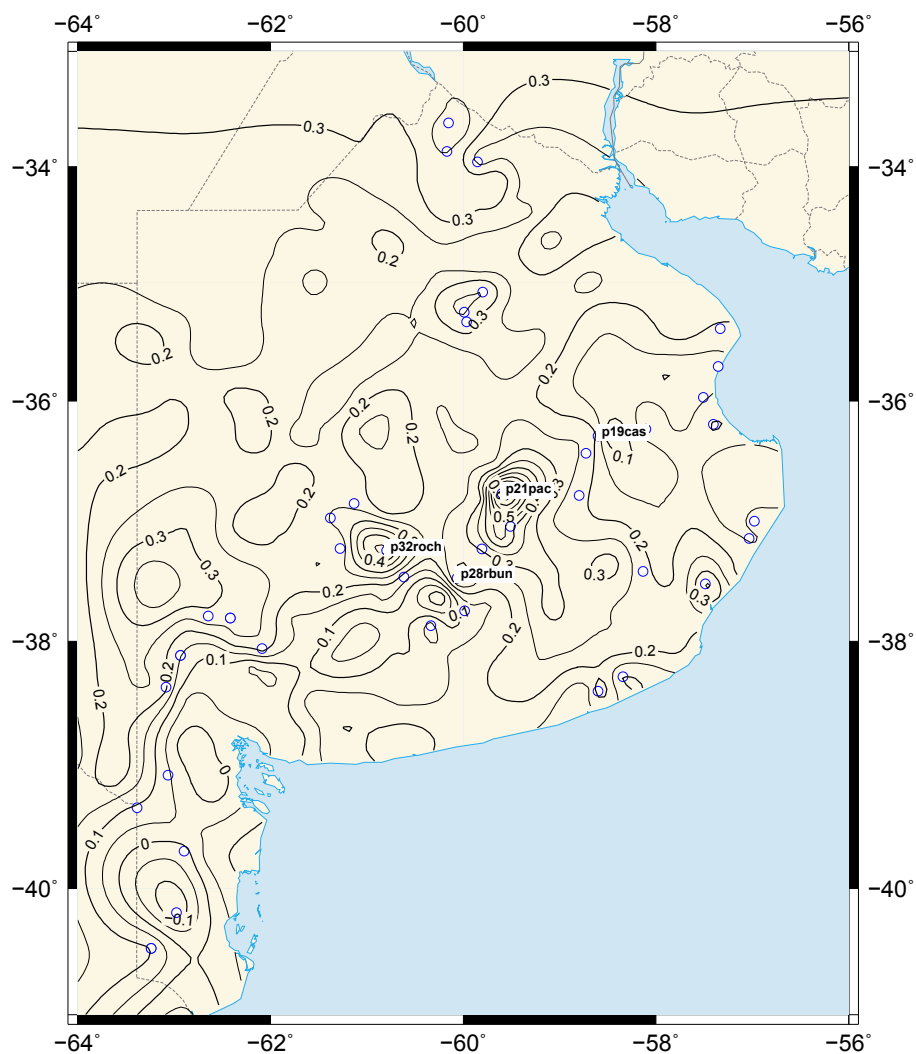


Figura 3.2. Comparación del nuevo modelo con el EGM08 y visualización de los puntos discordantes

Valores no esperados en la determinación de la medición de las coordenadas del punto ROCH, se repitieron en nuestra campaña. El punto ROCH se muestra entonces problemático y nos animamos a sospechar que el mojón ha sido desplazado de su posición original.

3. Densificación de GEOBA02

Punto	λ	ϕ	h[m]	Est. de Control	Ratio	Ref. Variance
p19cas	-58.5999896	-36.2964478	44.12	CASA	10.5	0.34
p21pac	-59.599337	-36.777579	140.36	PACO	22.8	0.43
p28rbun	-60.06354	-37.480668	251.22	RBUN	76.3	0.30
p32roch	-60.793406	-37.251146	214.48	ROCH	41.8	0.36

Tabla 3.2. Mediciones en los puntos discordantes (2011)

Punto	h_{2011} [cm]	h_{2010} [cm]	Δh
p19cas	44.12	44.21	0.09
p21pac	140.36	140.64	0.28
p28rbun	250.89	251.22	0.33
p32roch	214.48	214.80	0.32

Tabla 3.3. Comparación de las alturas entre los valores de la campaña 2010 y las mediciones 2011 para los datos discordantes

Una vez hechas estas reflexiones, lo que se hizo fue corregir los valores que se tenían para estos puntos discordantes en el año 2010, y reemplazarlos por los nuevos valores.

Capítulo 4

Evaluación del Modelo Anterior y discusión del Modelo Actual, tdaGEOBA

4.1. Introducción

Repasemos ciertas cuestiones que se realizaron hasta acá, para poder empezar a cerrar ideas y conclusiones. En primer lugar contamos con los datos de la campaña del 2010, con ella se completa una red de casi 400 puntos que, en su mayoría son puntos de la red GEOBA02 más la densificación en la zona Noroeste de la provincia (Gómez 2006) [7]. Trabajamos con esos datos, vinculando las alturas obtenidas (h) con las cotas de los mojones y a partir de ahí se desprende un nuevo modelo de transformación de alturas, mediante métodos numéricos de interpolación. Evaluamos el modelo anterior con los nuevos puntos medidos y finalmente, comparamos los valores observados, con los que ofrece el modelo global EGM08 en la región.

4.2. El nuevo modelo de transformación de alturas

Con todos los datos recabados en la campaña 2010, corregidos por las mediciones de 2011, más los otros puntos de la red, obtenemos el valor de la ondulación del geoide, que denominaremos N_{obs} . Estos valores nos van a permitir generar una grilla y a partir de ella, hacer el camino inverso y obtener cotas de altura (H), en lugares con posiciones geodésicas conocidas, como ya lo mencionábamos en el capítulo 2.

En primera instancia, cabe preguntarnos qué tan confiable será el valor de N_{obs} calculado a partir de la interpolación. Para poder arribar a alguna conclusión, estudiaremos qué tanto varía N_{obs} a lo largo de toda la provincia, y en particular, si existen regiones pequeñas con grandes variaciones. En otros términos, en aquellas zonas donde el gradiente de N_{obs} sea significativo, la interpolación va a resultar incierta. Ver figura 3.1

4. Evaluación del Modelo Anterior y discusión del Modelo Actual, tdaGEOBA

Notemos aquí dos cuestiones, una tiene que ver con la densificación selectiva, dado que no es casual que los puntos nuevos que se decidieron para la campaña coincidan con las regiones de grandes gradientes. Y la otra es que hacer esta interpolación para los valores de N , produce diferencias muy grandes.

4.3. El nuevo modelo N y su comparación con el modelo global EGM2008

Con el fin de suavizar los gradientes para la interpolación de N , se recurre al modelo global EGM2008 y se lo compara con el modelo local de transformación de acuerdo a la ecuación

$$\Delta N = N_{obs} - N_{egm08} \quad (4.1)$$

Luego se utiliza este valor de ΔN para la interpolación, llegando, finalmente, a obtener la altura ortométrica, de acuerdo a la expresión

$$H = h - N_{egm08} - \Delta N \quad (4.2)$$

De esta manera vemos cómo los gradientes se reducen (ver figura 4.1), y podemos inferir que el método de interpolación, será más preciso (ver 3.3), trabajando sobre los valores ΔN .

En los resultados nos encontramos con grandes residuos en 4 puntos problemáticos. VERO, RIO, P45PAT Y P45PATAUX. Para VERO y RIO, es coherente que esto ocurra, ya que son puntos nuevos, allí donde GEOBA02 está poco presente (en particular no consideramos los puntos de Pipina porque no tiene un dato preciso para la cota). Mientras que debemos deshacernos de P45PAT Y P45PATAUX, porque el error proviene de no lograr una buena medición de GPS, probablemente por estar ubicados en una zona con abundantes árboles, que generan muchos ciclos perdidos.

4.4. Nuevos puntos evaluados en el modelo anterior

Los resultados de evaluar los nuevos puntos con el modelo de transformación anterior, es decir conformando el grillado sin los puntos de esta última campaña, arrojan que un 76 % de los valores para N_{obs} , difieren de los que ofrece el modelo en menos de 15cm; por lo que está en acuerdo con los valores estimados para ese modelo. Ver figura 2.1 De esta manera constatamos, que el nuevo modelo numérico está en acuerdo con el modo en que se viene trabajando¹.

Ahora, notemos que en el histograma del modelo anterior figura 2.1 la forma en que decaía la cantidad de puntos para las distintas diferencias, era constante a medida que

¹En este nuevo modelo se interpola mediante la técnica de interpolación de Mínima Curvatura, mientras que los modelos anteriores se construían a partir del método de Krigin

4.4. NUEVOS PUNTOS EVALUADOS EN EL MODELO ANTERIOR

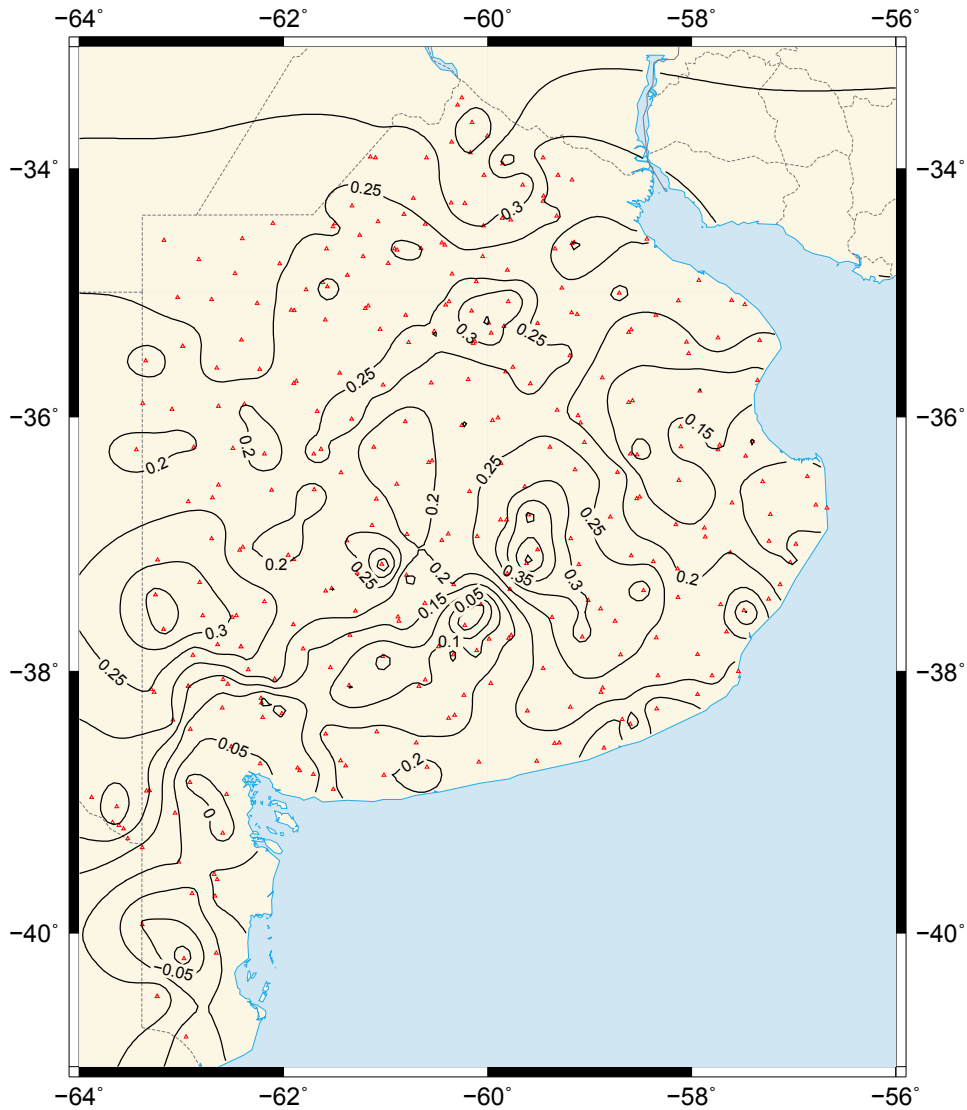


Figura 4.1. Comparación con el Modelo Gravitacional EGM2008. Curvas cada 0.05 metros [m]

aumentaban los valores, es decir, teníamos cada vez menos puntos con diferencias mayores, y ninguna superaba los 30 cm. Sin embargo, en nuestro nuevo análisis, vemos que el histograma 4.2 no se comporta igual hacia el extremo derecho; por ejemplo aumentan los puntos para diferencias entre 20 y 25 cm. Además, algunos puntos superan las

4. Evaluación del Modelo Anterior y discusión del Modelo Actual, tdaGEOBA

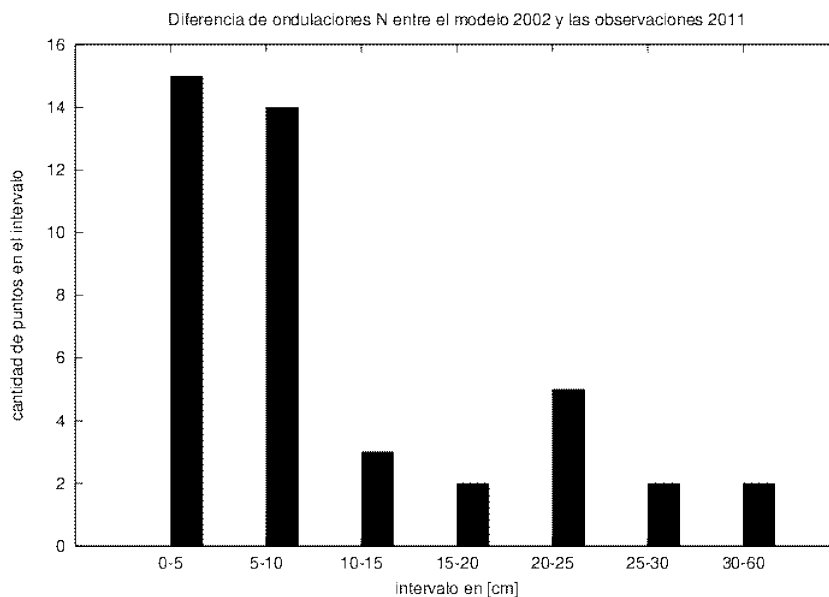


Figura 4.2. Cálculo de las diferencias de N para los nuevos puntos, interpolando con el paquete Surface del programa GMT², considerando sólo los datos de la red del 2002

diferencias de 30 cm, justamente, esto no es casual; dado que los puntos fueron elegidos para ocupar lugares allí donde el modelo anterior era débil. Por eso estas diferencias, ya que la interpolación allí no es buena. Se espera que una vez incorporada la densificación de estos nuevos puntos al modelo, esto mejore. En lo que sigue, concluiremos que así resulta.

4.5. Testeo del modelo actual

El testeo se realiza considerando la totalidad de los puntos. Y buscando, pesar, de alguna manera, los nuevos puntos. Lo que se hace es, extraerlos, uno a uno. Se construye la grilla sin ese punto, luego se calcula el valor interpolado para las coordenadas del punto, y se compara, este resultado numérico, con el obtenido con la observación. Hacemos esto para cada uno de los puntos nuevos, tanto para el valor de N_{obs} , como para la diferencia de N con el valor de ondulación que ofrece el modelo global N_{egm08} ,

Al comparar con el modelo global, los puntos que presentan mayor apartamiento son ROCH, P45pat4 y P45pataux, con un error del orden de 40cm, que resulta coherente con nuestro análisis previo para P45pat4 y P45pataux, así como para ROCH, de quien ya mencionamos la sospecha de que fue movido el mojón. Otros 9 puntos, dan diferencias entre 10 y 15 cm (CPAT, PACO, RBUN, p28rbun, p32roch, p49mchi, p44pat, lam1 y PF51)

Si miramos donde se ubican esos puntos, se nota que:

4.5. TESTEO DEL MODELO ACTUAL

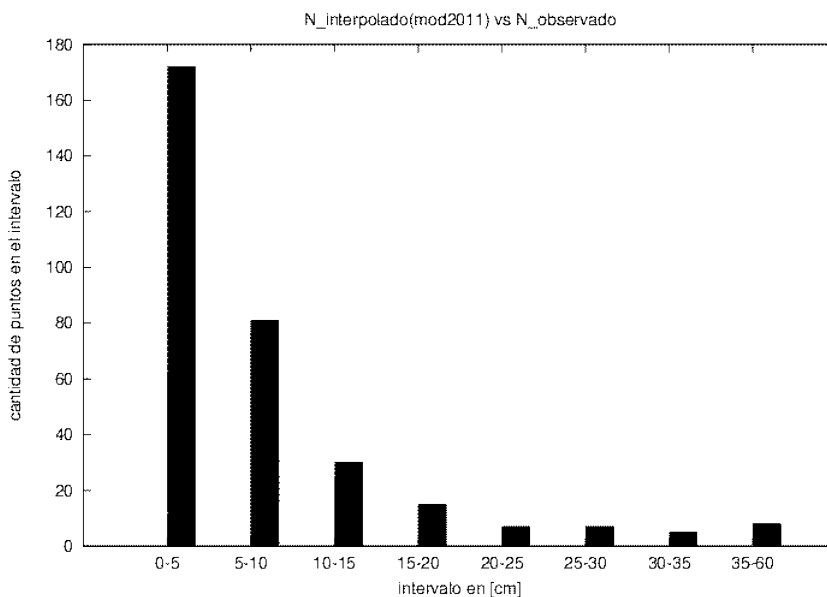


Figura 4.3. Evaluaciones de los valores de Nobs - Ninterpolado, para cada uno de los puntos nuevos, donde N se interpola con el modelo 2011

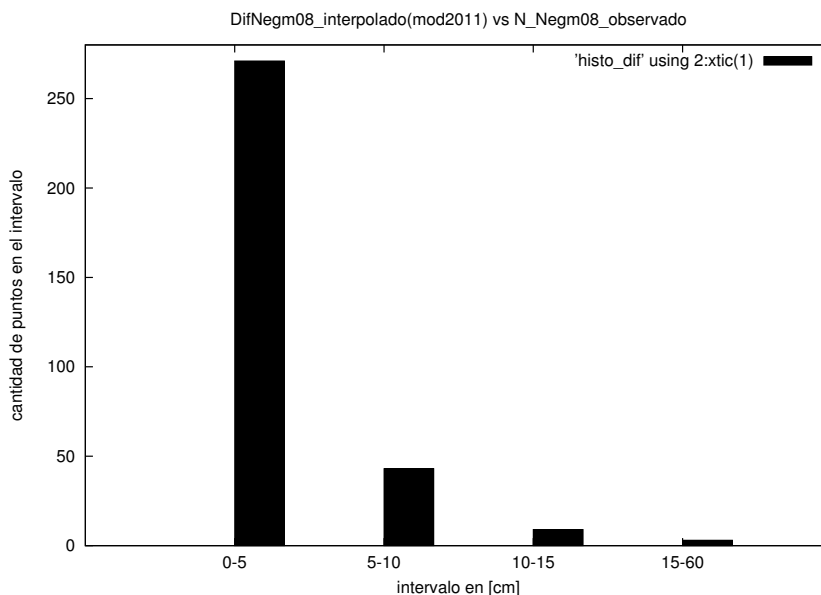


Figura 4.4. Evaluaciones de las comparaciones con el Modelo Global EGM08. Valores de $Dif_{observada2011vsEGM08} - Dif_{interpolada2011vsEGM08}$ para cada punto

- CPAT y p44pat, están en la zona más al sur de la provincia, donde por la geografía misma, resultan puntos casi alineados y no hay buena geometría. En especial, CPAT es el último punto de la red.

4. Evaluación del Modelo Anterior y discusión del Modelo Actual, tdaGEOBA

- PACO, RBUN y p28rbun, están en una región cuya estructura geológica parece mostrar alguna particularidad.
- p32roch arrastra el error de las fallas de ROCH.
- lam1 ocupa un borde poco densificado
- p49mchi y PF51 presentan sospechas sobre el equipo utilizado

Las diferencias para el resto de los puntos resultan menores a 10 cm, y en el 82 % menor a 5cm, que era lo que se pretendía.

Si bien las diferencias no parecen sustanciales con el modelo anterior, esto da indicios de una consolidación del modelo, que se acerca, de algún modo, a un límite de precisión, teniendo en cuenta la tecnología y la información disponible hasta este momento.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Conclusiones

1. El análisis y mejoramiento del modelo tdaGEOBA que ha posibilitado el agregado de los puntos de la campaña 2010 permiten estimar que es posible transformar h en H con errores de pocos centímetros.
2. Esta importante conclusión ha impulsado la puesta en línea de un software de libre acceso que es utilizado entre dos y tres veces por semana por usuarios externos al sistema científico.
3. La utilización del software exige que las coordenadas geodésicas que se utilicen como entrada estén en el marco GEOBA-POSGAR07,
4. Debe ser correctamente medidas e introducidas en el software de procesamiento GPS las alturas instrumentales de las antenas empleadas.
5. Los resultados del análisis realizado en esta tesis muestran zonas donde probablemente la calidad del modelo se degrada, ejemplo: Pablo Acosta, Rodolfo Bunge, entre Bahía Blanca y Carmen de Patagones, y zonas de borde, principalmente cerca de la costa.

5.2. Perspectivas y Recomendaciones

Resultaría muy importante densificar zonas de borde, especialmente sobre la costa, y en la región comprendida al sur de Bahía Blanca.

El agregado de información de gravedad y su eventual integración con las mediciones de GPS sobre líneas de nivelación deberían producir un modelo de geoide de alta precisión válido para toda la provincia de Buenos Aires.

5. Conclusiones

Bibliografía

- [1] Apunte de la Cátedra de Topografía II - Ing. Guillermo N. Bustos.
- [2] D'Onofrio, E.(SHN, UBA), Fiore, M. (SHN), Mayer, F. (SHN, UNLP), Perdomo, R. (UNLP-CONICET), Ramos, R. (IGM). La Referencia Vertical. Capítulo extraído del libro: Contribuciones a la Geodesia Argentina de fines del siglo XX. UNR, editora.(1999)
- [3] Natali, M. Paula (FCAGLP - CONICET), Azpilicueta, F. Javier (FCAGLP - UNLP) - Sistema de Referencia Vertical en Argentina (SIRVEMAS)
- [4] Moirano, J. (2000) Tesis Doctoral. Materialización de Sistema de Referencia internacional en Argentina mediante observaciones GPS.
- [5] Brunini, C. and Moirano, J. (FCAGLP -UNLP), H. Drewes and K. Kaniuth. Improvements in the Ellipsoidal Heights of the Argentine Reference Frame. Vertical Reference Systems - International Association of Geodesy Symposia - Vol. 124 (2001)
- [6] R. Perdomo, D. Del Cogliano, N. Di Croche, K. Neuman. Advances in the calculation of a height transformation model in Buenos Aires. Vertical Reference Systems - International Association of Geodesy Symposia - Vol. 124 (2001)
- [7] Ma. Eugenia Gómez (2006) Modelo de Geoide en el Noroeste de la provincia de Buenos Aires. Tesis de Licenciatura.
- [8] Perdomo, R. (FCAGLP - CONICET) Densificación de la Red Geodésica de la Provincia de Buenos Aires. Informe Final.
- [9] Perdomo, R., Amorín, O. Ricardo., Mendoza, P. O. Luciano. Discusión de la Precisión del Geoide Bonaerense.
- [10] Pavlis, N., Holmes, S. A., Kenyon, S. C. y Factor, J. K. (2008) An Earth Gravitational Model to degree 2160: EGM2008. Viena, Austria. European Geosciences Union General Assembly.
- [11] R. Perdomo, D. Del Cogliano, L. Mendoza, M. E. Gomez y D. Bagú (2011) Informe Técnico para Usuarios de tdaGEOBA. Departamento de Astrometría, FCAGLP. La Plata.
- [12] Heiskanen W., Moritz H., 1976. Physical Geodesy. Freeman and Company. San Francisco y Londres.