

LA REFERENCIA VERTICAL



ENRIQUE D'ONOFRIO (SHN, UBA)
MONICA FIORE (SHN)
FEDERICO MAYER (SHN, UNLP)
RAUL PERDOMO (UNLP-CONICET)
RUBEN RAMOS (IGM)

IGM - Instituto Geográfico Militar
SHN - Servicio de Hidrografía Naval
UBA - Universidad de Buenos Aires
UNLP - Universidad Nacional de La Plata

ABSTRACT

This chapter is devoted to the study of the different heights commonly used, the reference surfaces, origins and relations between them.

An analysis of the time series of the main tide gauges in use in Argentina is presented to define the mean sea level in these days. One of them, the Mar del Plata tide gauge, was used in the past to materialise the mean sea level employed as the origin of the Argentine levelling network.

Then, the state and development of the IGM levelling network is described and the main results of a recent campaign to relate this network with the tide gauges previously studied, is presented.

Finally the problem from the point of view of the GPS users is discussed, and a methodology to relate heights from the levelling network with the ellipsoidal heights obtained with GPS, is suggested.

RESUMEN

Este capítulo está dedicado al problema de los distintos tipos de cotas de uso habitual, las superficies de referencia altimétrica, sus orígenes y la relación que las vincula.

Se presenta un análisis de las series temporales de los principales mareógrafos en uso a lo largo del litoral marítimo para definir el nivel medio del mar actual. Uno de ellos, el mareógrafo de Mar del Plata, permitió materializar oportunamente el nivel medio del mar y constituyó el origen de la red de nivelación argentina.

A continuación se describe el estado de la red de nivelación desarrollada por el IGM, y los resultados de un reciente trabajo de vinculación directa de esta red a los mareógrafos previamente estudiados.

Finalmente se discute el problema desde la perspectiva del potencial de GPS como instrumento de nivelación y se presenta una metodología para vincular las cotas de la red de nivelación con las alturas elipsoidales que se obtienen con GPS.

1. INTRODUCCION

Pese a que la tecnología satelitaria permite determinar la posición de puntos en tres coordenadas rectangulares (x, y, z) en un sistema geocéntrico, la costumbre impuso el uso de valores latitud (φ), longitud (λ), altura (h), usando para tal fin un elipsoide centrado en el mismo origen.

Esa modalidad surgió de la concepción clásica de determinar, por un lado, las coordenadas horizontales (φ, λ) a partir de observaciones astronómicas y extenderlas o densificarlas mediante redes (triangulación, etc.), en cambio la coordenada vertical surge a partir de determinaciones del nivel medio del mar transferida mediante nivelaciones.

No hay dudas sobre las ventajas del sistema geocéntrico elipsoidal en cuanto al aspecto horizontal, su adopción va eliminando incongruencias de varios cientos de metros que solían presentarse entre sistemas de referencia contiguos. Puede admitirse que esa problemática quedó resuelta a través del posicionamiento satelitario, especialmente GPS relativo. No ocurre lo mismo con respecto a la coordenada vertical y el fin del siglo XX presenta el desafío de afinar conceptos y técnicas para resolver ese problema, si bien es cierto que las incongruencias entre sistemas altimétricos clásicos pocas veces superaron un metro.

Aun durante la vigencia de la geodesia clásica, bidimensional para las posiciones φ, λ y monodimensional para las alturas o cotas, había que diferenciar entre cotas ortométricas, dinámicas y brutas. Las primeras (ortométricas) son, formalmente, la distancia medida a lo largo de la vertical (levemente curva) entre el punto considerado y la superficie equipotencial de referencia (geoide). Las segundas (dinámicas) son una expresión, en metros de la diferencia de potencial del punto, con respecto a la citada superficie de referencia:

$$(W_0 - W)/g_c$$

siendo g_c una gravedad convencional para todo el sistema, usualmente la gravedad normal a 45° de latitud.

Obviamente, para obtener esos valores (ortométricos o dinámicos), es necesario contar con determinaciones de gravedad; esa necesidad llevó a efectuar mediciones gravimétricas a lo largo de las líneas de nivelación de alta precisión.

Dentro del interior de los polígonos formados por esas líneas (perímetros entre 300 km y 500 km) la influencia de la falta de paralelismo entre superficies equipotenciales, que genera esos requerimientos, no tiene influencia práctica y todo leve efecto que pudiese surgir se puede tratar en forma estadística dentro de los errores accidentales de medición.

Al "geoide" o superficie de nivel de referencia, se lo definía como una equipotencial (perpendicular a la vertical en todos sus puntos) coinci-

dente con el nivel medio del mar, más adelante se va a actualizar este concepto en función de los requerimientos actuales.

Las cotas brutas son las que se obtienen por suma algebraica de desniveles primarios $\Delta H = \Sigma$ lecturas atrás - Σ lecturas adelante, en una nivelación geométrica, a partir del nivel medio de la estación mareográfica tomada como fundamental.

Las diferencias, que permiten calcular sucesivamente el potencial con respecto al geoide, se pueden obtener como

$$\Delta W_{ij} = - [(g_i + g_j) / 2] \cdot \Delta H_{ij}$$

y las cotas ortométricas se pueden obtener como:

$$H = (W_0 - W) / g_m$$

Donde g_m es la gravedad media entre el punto y la superficie de referencia sobre la vertical. Para lo cual se requiere la adopción de una ley de variación de la gravedad con la altura.

Nótese que, tanto en las diferencias de potencial $W_0 - W$ como en los ΔW a partir de ΔH , se ha tomado la precaución de considerar con signo cambiado el incremento de potencial con el de altura, ello se debe a que el mismo disminuye con la elevación.

No es objeto de este capítulo entrar en detalles profundos sobre el potencial del campo de gravedad terrestre, sin embargo es necesario aclarar que la diferencia de potencial entre dos puntos es el trabajo que debe efectuarse para transportar una masa unitaria entre los mismos. Por otra parte, el citado campo está generado por la atracción newtoniana de las masas que constituyen la Tierra y el efecto rotacional al que están sometidos los puntos considerados. Si las masas estuviesen distribuidas en capas de densidad homogéneas entre esferas concéntricas y no hubiese rotación, las superficies equipotenciales serían paralelas. Al presentarse irregularidades con respecto a esa abstracción, surgen convergencias (falta de paralelismo) y las líneas de fuerza del campo, que constituyen la vertical, al ser normales a dichas superficies de nivel, son ligeramente curvas a fin de absorber las citadas convergencias. Hay algunas causas de leve variación permanente, entre las cuales merecen citarse la atracción lunisolar, los movimientos de masas de agua y la circulación atmosférica.

Los puntos sobre una superficie de nivel (equipotencial) tienen la misma cota dinámica y pueden tener distinta cota ortométrica, sin embargo, un líquido no perturbado debe mantenerse en equilibrio entre los mismos.

En cambio, entre dos puntos con la misma cota ortométrica (H) podría ocurrir que un líquido tienda a moverse entre los mismos, buscando su equilibrio. Esta situación induce a que deban producirse listas de

cotas dinámicas y ortométricas, las primeras para usuarios vinculados a la hidráulica y las segundas para especulaciones geométricas sobre el modelado del geoide. Ello no quita que las necesidades hayan generado también listas con cotas brutas, dejando ese perfeccionamiento para una etapa posterior. En algunas oportunidades se han llegado a producir cotas ortométricas y dinámicas mediante la introducción de valores teóricos de la gravedad, éstas deberían descartarse frente a las necesidades científicas actuales, ya que pueden inducir a confusiones.

Volviendo a la altura sobre el elipsoide h , mencionada al principio, la misma se mide sobre la perpendicular a esa superficie geométrica y difiere de la altura ortométrica H en el valor N (altura del geoide sobre el elipsoide), de manera que

$$h = N + H$$

En esta simple relación se está despreciando la curvatura y la desviación de la vertical, cuyo efectos son ínfimos para el problema planteado.

En las alturas h se acentúa la independencia con respecto al comportamiento de un líquido que fue expuesto con respecto a H y se hace imprescindible la necesidad de contar con los valores de N . Puede decirse que, si bien para fines hidráulicos deberían usarse cotas dinámicas, los valores ortométricos y aun los brutos constituyen una aceptable aproximación, en cambio las alturas sobre el elipsoide deben ser necesariamente corregidas, hasta para necesidades prácticas elementales.

Resulta claro que, si se dispone de un modelo (de geoide) a partir del cual se pueden calcular valores de N para cualquier sitio, la expresión anterior permite transformar alturas elipsoidales (h), obtenidas con GPS, en alturas sobre el nivel medio del mar haciendo simplemente $H = h - N$. Este tema será tratado con más detalle al final de este capítulo.

Independientemente, para establecer una referencia altimétrica rigurosa, es necesario efectuar redes de nivelación, con la inclusión de mediciones gravimétricas sobre líneas fundamentales y contar con estaciones mareográficas con amplio período de observación.

La modelación del geoide, que brinda el valor N , se puede lograr mediante:

- a) Uso de modelos generales del potencial terrestre.
- b) Perfiles astrogeodésicos.
- c) Altimetría Satelitaria Radar del nivel medio del mar.
- d) Tratamiento de anomalías gravimétricas.
- e) Mediciones GPS sobre puntos de nivelación.

Los aspectos a y e serán especialmente tratados en este capítulo, como

así también los avances logrados en la red de nivelación y su vinculación con la red mareográfica, en el ámbito nacional.

Durante el presente siglo se pasó de la geodesia clásica bidimensional para las posiciones horizontales y monodimensional para las verticales a una concepción tridimensional, anticipada por Hotine – Marussi e Hirvonen en la década de 1960 y consolidada por el posicionamiento satelitario después. Durante la década de 1980 se comenzó a hablar de la geodesia de 4 dimensiones, ya que las posiciones de las estaciones varían con el tiempo y así se llegó a la consolidación del ITRF (International Terrestrial Reference Frame = Marco Terrestre de Referencia Internacional). Queda aún por definir si la referencia vertical a adoptar, que debiera ser invariable con el tiempo, va a estar basada en un sistema geocéntrico vigilado, como el ITRF o si va a consistir en el geoide para una época.

Esta sutileza de geoide para una época se debe a que el potencial varía, fundamentalmente por ciertos cambios en el núcleo terrestre y por otra parte hay cambios globales del nivel del mar que no obedecen a los ciclos de atracción lunisolar (hundimiento de bloque de hielo, deshielo, fluctuaciones en ciclo hidrológico, etc.).

Dentro de esta introducción, tal vez sea oportuno citar la definición de GEOIDE que se considera actualmente dentro de los grupos especializados de la Asociación Internacional de Geodesia:

Superficie de nivel del campo de gravedad terrestre, ajustada al nivel medio del mar determinado por series de 18.67 años de observación y corregidas por los mejores modelos de circulación, de influencia meteorológica y de tectónica de placas.

Con respecto a la tectónica de placas, aunque todavía no se ha logrado en la Argentina, es conveniente aclarar que una buena estación mareográfica debe estar asistida por una estación GPS permanente vinculada al ITRF y si fuera posible con servicios temporarios de interferometría de base muy larga (VLBI) o de equipos de distanciometría ("ranging") LASER a SATELITES (SLR). De esa manera es posible independizar la vigilancia del nivel del mar con respecto a los movimientos corticales que afectan a las referencias físicas de la estación.

La tecnología GPS, por otra parte, tiene la posibilidad de permitir la observación del nivel del mar en puntos alejados de la costa, mediante equipos montados en boyas y asistidos por estaciones de referencia en tierra, este medio tampoco será tratado en detalle, por falta de experiencia local.

En lo que sigue de este capítulo, se describirá la red de alta precisión de la nivelación general del País, su vinculación con la red mareográfica y sus resultados parciales. En la última parte se presentarán las experiencias efectuadas mediante mediciones GPS sobre líneas de nivelación y finalmente se obtendrán algunas conclusiones sobre el estado de la referencia

vertical argentina y los lineamientos a seguir para su perfeccionamiento. El proyecto, mediante el cual se lleva a cabo este objetivo de mejorar la referencia vertical, se denomina GEAR (GEOide ARGentino); por el momento están actuando el *Instituto Geográfico Militar*, el *Servicio de Hidrografía Naval* y las *Universidades Nacionales de La Plata y Rosario*, pero está abierta la participación a toda institución que esté dispuesta a contribuir. Paralelamente se están haciendo esfuerzos en la modelación a partir de anomalías gravimétricas, que se tratan en otro capítulo.

2. LA NIVELACION GENERAL ARGENTINA DE ALTA PRECISION

2.1. Constitución de la Red de Nivelación de Alta Precisión

Las Líneas de Nivelación de Alta Precisión constituyen una Red Altimétrica que divide al territorio de la República Argentina en polígonos cerrados o mallas, nombrados con números arábigos y en polígonos periféricos sobre el litoral marítimo o límites internacionales designados con números romanos.

Las Líneas de Nivelación de Alta Precisión arrancan y cierran en Nodales, que son Puntos Fijos (P.F.) Altimétricos de 1ra. Categoría, generalmente ubicados en las plazas de los pueblos o ciudades y que permiten controlar el cierre altimétrico de las mismas.

La Red de Nivelación de Alta Precisión está constituida por Puntos Fijos Altimétricos de segunda categoría. La citada Red se desarrolla a lo largo de caminos nacionales y provinciales. De allí el trazado irregular de los polígonos.

Distancias entre Puntos Fijos Altimétricos

Hasta 1981 se construyó un P.F. cada 3 km. Luego, con el objeto de situarlos en detalles del camino (cruces de caminos, intersección de alambrado con camino, etc), la distancia varió de 6 a 9 km.

Ubicación de los Puntos Fijos Altimétricos

Están ubicados a no más de 30 m del alambrado, en el interior del campo. Si no hay alambrado, se ubican a partir del eje del camino, a unos 50 m del mismo.

Etapas

Se distinguen dos etapas :

a) *Construcción*

Los Puntos Fijos Altimétricos están materializados por un pilar de Hormigón Armado. Los lugares de emplazamiento deben ofrecer una mayor probabilidad de conservación y se prefieren siempre que sea posible la cercanía de estancias, puestos, etc. Los pilares deben fundarse en terrenos muy sólidos y estables.

b) *Medición*

La medición de la Línea de Nivelación de Alta Precisión se inicia aproximadamente de seis meses a un año luego de haber sido construida, para permitir que el hormigón armado se consolide y se asiente.

Podemos distinguir dos períodos en la medición de la Red de Nivelación de Alta Precisión :

• *Anterior a la Ley de la Carta (1941)*

La primera Ley de la Carta fue promulgada el 3 de octubre de 1941 y constituye el fundamento legal de la obra del IGM, que ejecutó con regularidad trabajos geodésicos fundamentales, para proporcionar los apoyos a los levantamientos topográficos en todo el Territorio Nacional.

Con anterioridad a la promulgación de la citada Ley, se habían medido Líneas de Nivelación de Alta Precisión en las provincias de Buenos Aires, Entre Ríos, Santa Fe y Córdoba.

• *Posterior a la Ley de la Carta*

En esta etapa, se comenzó nuevamente la construcción y medición de la Red de Nivelación de Alta Precisión. Se vincularon puntos de la Red anterior. Algunas líneas de la anterior Red integran la nueva.

Las dos nivelaciones (anterior y posterior a la Ley) están referidas al nivel medio del mar determinado por el Mareógrafo de Mar del Plata en 1923.

Hasta el 31 de diciembre de 1997 se midieron aproximadamente 86.000 km de Líneas de Nivelación de Alta Precisión. Para fines de 1998, se encontrarán medidos aproximadamente 87.000 km y está previsto terminar la red el año 2000.

Instrumental

La Nivelación de Alta Precisión se realiza usando nivel de vidrio plano paralelo y dos miras de Invar de doble graduación.

Método de medición

Las líneas se nivelan en ida y vuelta por el mismo operador e instrumento. La longitud media de las visuales es de 45 m, no debiendo exceder nunca los 60 m. Se admite en las distancias una diferencia no mayor del 3% del largo de la visual. Cuando no se encuentre terreno firme donde estacionar el nivel o que haya que atravesar un río o laguna, se puede operar con distancias desiguales; salvado el obstáculo se debe seguir con el procedimiento normal.

Se debe nivelar en horas en que la imagen de la mira aparezca nítida y tranquila. Se admite para la constante de la mira, una tolerancia de 0,3 mm. Con el objeto de eliminar parte de los errores provenientes de la posición del instrumento, se debe colocar el trípode del nivel en cada estación, con una orientación que difiera 180° de la que tenía en la anterior. Se utilizan parasoles y registrar la temperatura ambiente para corregir la dilatación de las miras, contrastadas en el servicio meteorológico.

Tolerancia

La discordancia en ida y vuelta debe ser menor de $3 \text{ mm} \times \sqrt{L \text{ (km)}}$

Cálculo

La 1ra. compensación de líneas de nivelación se realizó desde 1969 a 1971 en los EE.UU. (USA). Se usó compensación por mínimos cuadrados (método de variación de cotas) y se compensaron 54.000 km correspondientes a líneas de nivelación de alta precisión y precisión (representa más del 60 % del total compensado).

Por no contarse con suficiente cantidad de valores de gravedad se aplicó corrección ortométrica con gravedad teórica previéndose su perfeccionamiento posterior

Con posterioridad, el IGM realizó programas de compensación en lenguaje FORTRAN que permiten compensar hasta 200 nodales.

Actualmente se miden 4 ó 5 polígonos de Nivelación de Alta Precisión y se ajusta provisoriamente ese conjunto con el programa citado.

EE.UU.	(1969 a 1971)	54.000 km
IGM	(1971 a 1997) Provisorio	32.000 km

Vinculación de mareógrafos

En el año 1996, se vincularon a las Redes de Nivelación de Alta Precisión y Gravimetría, los mareógrafos de Mar del Plata, Puerto Belgrano, Puerto Madryn, Comodoro Rivadavia y Puerto Deseado. Posteriormente se vin-

cularon los mareógrafos de Río Gallegos y Ushuaia, aunque todavía está pendiente el cruce del Estrecho de Magallanes.

2.2. El Punto Altimétrico de Referencia Normal (PARN)

Entre los años 1947/1948, se vio la necesidad de erigir un punto altimétrico de referencia normal. Los antecedentes referentes a la elección del lugar estuvieron previstos en la proyectada reglamentación de la Ley N° 12.696. Originariamente se había contemplado su ejecución para el año 1948, pero tratándose de una obra técnica tan trascendental para la nivelación general del país, se resolvió diferir su realización hasta obtener informes de autoridades técnicas nacionales y especializadas, respecto al lugar más conveniente para emplazar ese punto de referencia. Se recabaron informes a la Dirección General de Minas y Geología, a la Dirección General de Yacimientos Petrolíferos Fiscales y a la Dirección del Servicio Meteorológico Nacional. Los informes obtenidos de estas reparticiones nacionales entre los meses de diciembre de 1947 y octubre de 1948, concordaron 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 altimétrico de referencia normal (desde el punto de vista sísmico - geológico).

En julio de 1949 partió para la ciudad de Tandil una Comisión Especial compuesta por el Jefe de la División Geodesia del I.G.M., de un Ingeniero Asesor, del Jefe de la Sección Nivelación, y del Director del Museo Argentino de Ciencias Naturales, como geólogo informante, con el objeto de precisar el lugar en el cual se establecería el punto. Se eligió el Parque Independencia de la ciudad de Tandil pues presentaba las siguientes ventajas: 1) mayor número de salidas para los tramos de nivelación de contralor; 2) punto alejado de las canteras de explotación; 3) zona urbanizada adecuada para la construcción proyectada; 4) vigilancia permanente; 5) manto cristalino sobre el cual debía asentarse el pilar, situado probablemente, entre los 6 y 10 m de profundidad.

La referida Comisión reconoció, también, la línea de nivelación de alta precisión de aproximadamente 180 km de longitud, a lo largo de la Ruta Nacional 226, que debía unir el P.A.R.N. con el mareógrafo de Mar del Plata. En esta ciudad la Comisión reconoció la ubicación de un punto altimétrico especial, que tendría categoría de nodal.

Otra Comisión especial, denominada "Comisión G30", en el plan de trabajos respectivo, llegó a Tandil el 23 de octubre de 1949 con la misión de construir el P.A.R.N. y 8 puntos fijos auxiliares alrededor del mismo, a distancias entre 500 y 1.000 metros del punto central.

En el mes de noviembre se iniciaron las perforaciones con el objeto de determinar la ubicación definitiva del pilar. Se efectuaron 17 perfora-

ciones llegando algunas de ellas a una profundidad de 13,5 m sin que en ninguna de ellas se llegase al basamento rocoso.

Aprobado el lugar elegido para el fundamento del pilar se inició la excavación llegándose a una profundidad aproximada de 16 m. La excavación se inició con una sección de 1,5 por 1,5 m. que se fue agrandando por causa de los desmoronamientos. Al llegar a los 16,2 m se encontró una capa de piedra homogénea la cual se perforó hasta 1 m de profundidad sin dar con otra capa, por lo tanto, se resolvió asentar el pilar sobre aquella. Dada la considerable longitud del pilar a construir se decidió hacerlo con una armadura de hierro. Esta estuvo compuesta de 20 varillas verticales de 16 mm de diámetro, formando un cuadrado de 1,30 m por lado y de 16 varillas de 14 mm de diámetro colocadas a distancia de 26 cm.

La base de la armadura, en forma de pirámide truncada, fue construida de modo similar.

El punto altimétrico de referencia normal tiene una chapa principal de eje vertical en el centro y cuatro chapas de ejes horizontales, una de cada costado, además, se empotraron dos chapas altimétricas de eje horizontal en la portada de entrada al Parque Independencia.

Además de estos testigos, se construyeron 4 mojones subterráneos en las inmediaciones del pilar central, y 8 puntos fijos de contralor ubicados a distancias entre 500 y 1.000 m alrededor de éste. Estos 8 puntos fijos tuvieron las características de los puntos nodales ordinarios.

Con el objeto de relacionar el P.A.R.N. con el mareógrafo de Mar del Plata, se construyó una línea de puntos fijos para la nivelación de alta precisión. Esta línea de unión la constituyeron 75 puntos fijos de segunda categoría, distantes aproximadamente 2 a 3 km entre sí. Una parte de la línea, desde Tandil hasta Napaleofú, está integrada por los puntos fijos n° 1 a 18, de la línea construida entre los años 1947/48. La otra parte de la línea de vínculo, desde Napaleofú hasta Mar del Plata, la constituyeron los puntos fijos n° 1 a 57 de la línea construida en 1950. Esta línea termina en un punto nodal especial ubicado en la plaza Luro de la ciudad de Mar del Plata (año 1950) asentado en la tosca.

En esa ciudad existió además, desde 1947 el punto nodal altimétrico n° 71, ubicado en la plaza Rocha, pero que parecía no poseer las condiciones de estabilidad que ofrece el anterior. El punto nodal de vínculo en la Plaza Luro se construyó del tipo común, pero dándole más amplitud, pues tuvo las dimensiones horizontales de 1,20 x 1,20 m. y una profundidad de 3 m.

2.3. La Red Gravimétrica Nacional

Misión y Objetivos

La misión es determinar valores de la aceleración de la gravedad

sobre puntos de la superficie física del suelo. El objetivo fundamental es el de efectuar la corrección de las altitudes determinadas en puntos fijos de nivelación para obtener las altitudes ortométricas y dinámicas.

Asimismo, el conocimiento de los valores de la aceleración de la gravedad tiene por finalidad:

- Contribuir a los estudios para el mejor conocimiento de la forma de la tierra (determinación de la ondulación del geode).
- Determinar las anomalías que reflejan la distribución interior de las masas, las fallas y estructuras geológicas y dar los indicios de las zonas donde puede intensificarse la prospección geofísica para la posterior extracción de materias primas esenciales.
- Contribuir al estudio de la profundidad de compensación isostática.

Red de I Orden BA.CA.R.A.

La Red Gravimétrica Nacional está compuesta por una Red de I Orden denominada BA.CA.R.A. (Base de calibración de la República Argentina). Dicha Red tiene su antecedente en un Anteproyecto de Red Gravimétrica Nacional presentado por el Instituto Geográfico Militar en un informe presentado a la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas en el año 1964.

En los meses de junio a octubre del año 1968, Yacimientos Petrolíferos Fiscales, el Servicio de Hidrografía Naval, el Instituto Geográfico Militar y el Instituto de Geodesia de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires (FIUBA), con la colaboración del Servicio Geodésico Interamericano IAGS, llevaron a cabo la denominada Operación BACARA.

Se determinaron 86 valores de g en el país, 21 en Bolivia, 3 en Uruguay y 2 en Paraguay (26 en total). Vale decir que el número total de puntos (P.G.) medidos en la Operación BACARA es de 112.

Se utilizaron cuatro gravímetros Lacoste & Romberg facilitados por el IAGS (dos al IGM y dos al SHN) y un gravímetro Worden del Instituto de Geodesia (FIUBA). Se utilizaron aviones Beechcraft C45 pertenecientes a la Aviación Naval.

Se volaron 35.000 km en 140 hs de vuelo y la campaña duró 56 días.

Se adoptó el criterio de ubicar los P.G. en aeródromos utilizables por aviones comerciales o en puntos cercanos sobre caminos pavimentados o próximos a ellos.

La calibración de los instrumentos se realizó recorriendo la Base de Calibración Argentina para gravímetros estáticos del Instituto de Geodesia de la Facultad de Ingeniería de Buenos Aires (son 12 estaciones : Ushuaia, Río Gallegos, San Julián, Comodoro Rivadavia, Trelew, Carmen de Pata-

gonos, Bahía Blanca, Buenos Aires, Córdoba, Santiago del Estero, San Miguel de Tucumán, Salta y Orán).

En las mediciones participaron un técnico del SHN., uno del IGM y en la primera parte de la tarea un técnico del IAGS.

La Red BACARA fue compensada 2 veces, una por el IGM y la otra por el SHN juntamente con el Instituto de Geodesia de la FIUBA.

Ambas compensaciones fueron realizadas prácticamente luego de la medición y sus resultados fueron publicados en el Informe Nacional a la XV Asamblea General de la UGGI en Moscú en el año 1971.

Ambas compensaciones no tuvieron en cuenta los mismos puntos (se desecharon algunos en virtud del valor del desvío hallado).

La Red BACARA se encuentra referenciada en el Sistema de Gravedad de Potsdam. La precisión de la Red BACARA es de +/- 0,05 mgal.

Red IGSN71

La Red IGSN71 (*Red Estándar de Gravedad Internacional*) fue adoptada en la XV Asamblea General de la UGGI en Moscú en el año 1971 como patrón de referencia internacional para todas las mediciones de gravedad relativa.

Se compone de 1854 estaciones obtenidas de una compensación por mínimos cuadrados de mediciones absolutas y relativas. Los desvíos estándar son menores de +/- 0,1 mgal.

Esta Red reemplaza al *Sistema de Gravedad Potsdam* cuyo datum fuera adoptado en la Reunión de la AIG en Londres en 1909 y que a su vez reemplazaba al *Sistema de Gravedad Viena* adoptado en la Reunión de la AIG en París en 1900.

La precisión del Sistema Potsdam fue estimada en +/- 3 mgal y corregía al Sistema Viena en - 16 mgal.

Mediciones de gravedad absoluta como la realizada por el Ing. Baglietto en 1960 indicaban un error de +12 a +16 mgal en el valor absoluto de Potsdam. El Comité Internacional de Pesas y Medidas adoptó en 1967 una corrección de - 14 mgal al valor de gravedad en Potsdam para usos metrológicos.

El valor IGSN71 para POTSDAM es de 981 260,19 +/- 0,02 mgal.

Once puntos de la Red BACARA tienen valor en el Sistema de Referencia Gravimétrico IGSN71.

Punto Fundamental de Referencia (Buenos Aires "A")

Es el Punto Gravimétrico cuyo valor de la gravedad sirve de referencia a la Red de Puntos Gravimétricos del Instituto Geográfico Militar y pertenece a la Red Internacional de Estandarización de la Gravedad 1971.

Se encuentra ubicado en las instalaciones Sarg My Ingeniero José Antonio Alvarez de Condarco del I.G.M., en Villa Maipú, partido de San Martín, provincia de Buenos Aires.

Proyecto de medición absoluta de la gravedad

En el año 1988 se lleva a cabo *la primera parte del Proyecto de Medición Absoluta de la Gravedad* con el gravímetro interferométrico JILAG - 3, del Instituto de Geodesia de la Universidad de Hannover. Este proyecto contó con el auspicio del mencionado Instituto cuyo director era el Dr. Wolfgang Torge, del Instituto de Geodesia de la Universidad de Buenos Aires cuyo director es el Ing. Angel Cerrato y del Instituto Geográfico Militar. Es así que se mide, en forma absoluta, la gravedad en la *Estación Fundamental Buenos Aires A*, en *Tandil* y en *Salta*. Como prueba de la bondad de las mediciones realizadas, diremos que el valor de la medición absoluta de la gravedad en la Estación Fundamental Buenos Aires A difiere del dado por la Red IGSN71 en sólo 0,04 mgal.

En el año 1991 se realiza *la segunda parte del Proyecto de Medición Absoluta de la Gravedad*, esta vez en una estación próxima a la Est. Fund. Buenos Aires A (debido a un problema de napas freáticas que afecta a esa zona del Partido de San Martín no se pudo hacer estación en ese punto), en *San Juan* y en la Univ. Nac. de la Patagonia en *Comodoro Rivadavia*.

En el año 1994 y a pedido del Instituto de Geodesia de la FIUBA, el IGM vincula la Estación absoluta Comodoro Rivadavia con la Red BACA-RA.

Red de II Orden

Está constituida por el conjunto de puntos gravimétricos que coinciden con los puntos fijos de la Red de Nivelación de Alta Precisión que cubre el territorio nacional y se apoya en la Red Gravimétrica de I Orden BA.CA.R.A.

Al 31 de diciembre de 1998, se habrá completado la medición de la Red Gravimétrica de II Orden, totalizando 15.905 puntos.

Método de medición

Se aplica el método de "ida y vuelta" que consiste en efectuar las mediciones de cada punto de un tramo de la línea de nivelación dos veces, una en ida y la otra en vuelta. La medición completa (ida y vuelta) de un tramo, debe realizarse dentro de las veinticuatro horas de iniciadas las observaciones. En cada punto se registran tres lecturas del gravímetro y las discrepancias entre las lecturas registradas deben ser inferiores a 0,01 mgal.

3. LA RED MAREOGRAFICA Y SU RELACION ALTIMETRICA

El propósito de este punto es dar a conocer el estado actual de la red mareográfica argentina, la relación altimétrica del nivel medio del mar con el Cero del IGM y brindar elementos teóricos que permitan una mejor comprensión de este tema.

3.1. Generalidades sobre el fenómeno de la marea.

Este fenómeno no sólo se manifiesta sobre la hidrósfera sino también sobre la atmósfera y la corteza terrestre. Si bien la marea terrestre no es considerada en el cálculo de los niveles medios, debe tenerse en cuenta cuando se utilizan alturas de marea referidas a puntos fijos en tierra, para ciertos trabajos donde se requiera máxima precisión.

Recién en la segunda mitad del siglo XVII, Newton (1642 - 1727) formuló una teoría para estudiar el comportamiento de las fuerzas generadoras de marea que constituyó la base para estudios posteriores. En la actualidad a estas investigaciones se las conoce como teoría de equilibrio o teoría estática de la marea, en ella se da como responsable de las fuerzas generadoras de marea a las atracciones gravitatorias de la Luna y el Sol.

Laplace (1749 - 1827) fue el primero en introducir en 1774 la hidrodinámica en la teoría de las mareas. Puso énfasis en la relación de los períodos celestes del sistema Tierra - Luna - Sol con los movimientos del agua, a quien adjudicó dichos períodos. Estos pensamientos posibilitaron la introducción del concepto de ondas componentes de marea.

En 1867 Lord Kelvin utilizó el método de análisis armónico para determinar las amplitudes y fases de las ondas componentes de marea que responden a periodicidades del sistema Tierra - Luna - Sol.

Con posterioridad otros estudiosos como Darwin, Harries, Doodson, entre otros, continuaron con el estudio de este fenómeno. En la actualidad investigadores como Godin, Cartwright, Pugh y muchos otros han permitido la modelación numérica y predicción del fenómeno con elevada precisión.

Se entiende por marea a la oscilación periódica del nivel del mar que resulta de la atracción gravitacional de la Luna y el Sol que actúan sobre la Tierra en rotación. Este movimiento vertical es acompañado por uno horizontal provocado por las mismas causas y que se denomina corriente de marea.

Un análisis confiable del nivel del mar tiene que basarse en una larga serie de mediciones que no tengan otros errores más que los propios del método de medición. Cualquier medición instantánea del nivel del mar, excluidos los errores y las diferencias de los métodos de medición empleados, puede suponerse como la suma de tres términos. Ellos son el nivel medio del mar, la marea y la onda de tormenta.

Se define como onda de tormenta a las sobreelevaciones y depresiones del nivel del agua superpuestas a la marea astronómica que se deben fundamentalmente al esfuerzo tangencial del viento sobre la superficie libre del agua.

El nivel medio del mar se define como la media aritmética de alturas horarias de marea (o alturas equiespaciadas con un intervalo menor) durante un período de tiempo adecuado que permite eliminar el aporte de la marea. Luego, para calcular el nivel medio, es necesario disponer de largas series de mediciones de marea.

3.2. Medición de marea

Las primeras mediciones de marea se realizaban con reglas que se disponían sobre la playa y se vinculaban altimétricamente, mediante una nivelación geométrica, a puntos fijos en tierra.

Con la aparición de los primeros mareógrafos a flotador se pudo disponer de mediciones continuas y prolongadas en el tiempo, donde la precisión alcanzada es de ± 1 cm en altura y ± 1 minuto en tiempo.

Existen en la actualidad otros sistemas para medir marea que se basan en distintos principios físicos. Están muy difundidos los que miden presión en un punto fijo bajo la superficie del agua. La presión ejercida en dicho punto estará dada por la suma del peso de la columna de agua existente más la presión atmosférica.

En los últimos años se ha desarrollado un nuevo sistema de medición del nivel del mar. Estos mareógrafos denominados de nueva generación (Next Generation Water Level Measurement System) poseen un sensor acústico que funciona como una ecosonda invertida para medir el nivel del agua. Envía una señal de alta frecuencia por un tubo de aproximadamente 1.2 cm de diámetro (tubo de sondeo) que está instalado dentro de otro tubo de 15 cm de diámetro (tubo protector). Estos equipos miden el tiempo que tarda la señal en pasar por un punto "punto de calibración", tocar la superficie del agua y volver. Conociendo este tiempo y el valor de la velocidad del sonido en el aire puede calcularse el espacio recorrido.

Una fuente de error para este sensor está asociada con el gradiente de temperatura a lo largo del tubo de sondeo ya que el valor de la velocidad del sonido se modifica por variaciones en la temperatura. Para disminuir este error se instalan dos sensores de temperatura dentro del tubo protector, uno sobre el tubo de calibración y otro en el tubo de sondeo.

La memoria del equipo almacena hasta 40 días, dependiendo del número de sensores que tenga instalado. Estos mareógrafos están capacitados para trabajar hasta con 11 sensores diferentes que pueden medir por ejemplo temperatura del agua, velocidad y dirección del viento, ráfagas, etc.

También es posible medir el nivel del mar mediante la utilización de satélites altimétricos. Con la aparición de este tipo de instrumental se han podido obtener observaciones globales de marea de casi todos los océanos del mundo, que hasta hace unos años eran reemplazadas por la aplicación de modelos de mareas hidrodinámicos como ser el de Schwiderski (1980 a, b).

Como el satélite orbita la Tierra muchas veces en el día, genera una gran cantidad de datos cuya interpretación es compleja, debe prestarse particular atención a la determinación de la órbita y la forma exacta de la superficie del mar (Robinson, 1985). Es posible combinar datos de distintos satélites altimétricos como por ejemplo GEOSAT para 1985 - 89 y TOPEX / POSEIDON 1992 - 96 pero debe realizarse con mucho cuidado debido a que existen diferencias sistemáticas entre las alturas medidas por distintos satélites.

3.3. Medición absoluta de marea

Cada estación mareográfica requiere que su cero de medición esté vinculado altimétricamente a puntos fijos en tierra (generalmente se utilizan 5) para poder replantear los distintos niveles alcanzados por el agua. En un principio esta vinculación se efectuaba solamente mediante una nivelación geodésica de precisión.

Con el avance de la geodesia se desarrollaron nuevas técnicas de posicionamiento las que pueden ser aplicadas a los puntos fijos mencionados anteriormente. Además se desarrollaron metodologías que permiten evaluar los movimientos propios de la corteza terrestre y eliminarlos de los niveles de marea, brindando así una medición absoluta, como fue expuesto en 1. (Introducción).

Si se agrega al GPS, VLBI, SLR y LLR un gravímetro absoluto también podrán ser estudiadas las mareas terrestres.

3.4. Transmisión de datos

El método de transmisión de datos depende del tiempo de requerimiento de la información (en tiempo real o diferido) y de la distancia existente entre la estación mareográfica y el lugar de recepción (desde unos pocos metros hasta miles de kilómetros).

La transmisión de los datos puede efectuarse interrogando al sistema en forma satelital, en forma telefónica (con una computadora personal y un modem), en la misma estación con una computadora personal y teleméricamente por enlace radial. En todos los equipos modernos se almacena la información correspondiente al último período (aproximadamente 30 días) en una memoria sólida.

3.5. Red mareográfica argentina

El Servicio de Hidrografía Naval (SHN) comenzó a medir marea con estaciones permanentes en 1944 en Puerto Madryn. Sin embargo existen mediciones en unos pocos lugares desde principio de siglo realizadas por la Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables. En algunos casos donde existían nivelaciones geométricas que vinculaban los ceros de los mareógrafos de ambas instituciones se pudieron armar largas series como para el Puerto de Buenos Aires donde se disponen alturas horarias desde 1905 hasta el presente.

Toda la información proveniente de la red mareográfica es procesada en forma mensual, obteniéndose alturas horarias, pleamares, bajamares, amplitudes y niveles medios.

En el tema que nos ocupa la información de interés es el nivel medio del mar. Merece mencionarse la participación del SHN en el programa GLOSS (Global Sea Level Observing System), que es un sistema internacional iniciado en el año 1985 para establecer un banco de datos de niveles medios estandarizados de alta calidad, para ser utilizado por la comunidad científica.

En la actualidad el SHN opera con 11 estaciones, cuya ubicación geográfica y tipo de registrador se brinda en la Tabla 1.

ESTACION	LATITUD	LONGITUD	EQUIPO
Palermo	34° 34'S	58° 24'W	Flotador
Torre Oyarvide	35° 06'S	57° 08'W	Flotador
San Clemente del Tuyú	36° 21'S	56° 43'W	Flotador
Mar del Plata (Club)*	38° 00'S	57° 33'W	Flotador/acústico
Puerto Quequén	38° 35'S	58° 42'W	Flotador
Puerto Belgrano	38° 53'S	62° 06'W	Flotador
Puerto Madryn*	42° 46'S	65° 02'W	Flotador
Puerto Deseado*	47° 45'S	65° 55'W	Flotador
Punta Quilla	50° 07'S	68° 25'W	Acústico
Ushuaia*	54° 49'S	68° 13'W	Flotador/acústico
Base Esperanza*	63° 23'S	56° 59'W	Acústico

* Estaciones que participan del programa GLOSS.

TABLA 1.: Ubicación de las estaciones mareográficas y tipo de registrador que poseen.

3.6. Niveles medios que aproximan al geode en el litoral atlántico argentino

El nivel medio puede considerarse como una función del tiempo, pues se han comprobado cambios al estudiar series largas de mediciones.

Estos cambios del orden de los 10 a 20 cm por centuria son pequeños comparados con las variaciones diarias del nivel del mar.

El nivel medio del mar es una buena primera aproximación al geoides, aunque existen efectos oceanográficos tales como la variación en la densidad del agua, patrones de circulación oceánica permanente y efectos atmosféricos, los cuales producen diferencias que en el peor de los casos pueden exceder el metro pero que generalmente son menores (Pugh, 1987). El incremento del dióxido de carbono y otros gases en la atmósfera producen un incremento en la temperatura global que se conoce como efecto invernadero. Barth and Titus, 1984, identificaron a este efecto como uno de los causantes del ascenso global del nivel del mar.

Por otro lado los registros geológicos muestran que en distintas partes del mundo han ocurrido enormes movimientos verticales relativos tierra - mar. Por ejemplo desde la última glaciación, 10.000 años atrás, en algunos lugares el nivel medio se ha incrementado más de 40 m respecto a la tierra.

Los cambios del nivel medio del mar relativos a puntos fijos en tierra son una medida sólo de la diferencia entre los movimientos verticales del nivel del mar y los de la tierra misma.

Uno de los principales problemas de la interpretación del nivel medio del mar es la identificación de los cambios eustáticos y epirogénicos cuando sólo son medidos directamente los cambios seculares.

Para determinar un nivel medio del mar representativo del geoides las mediciones deben realizarse en períodos largos de tiempo para eliminar las alteraciones producidas por la marea.

Aquí se determinan niveles medios que representan en una primera aproximación al geoides en las localidades de Mar del Plata, Puerto Belgrano, Puerto Madryn, Comodoro Rivadavia y Puerto Deseado referidos a puntos fijos en Tierra con cotas IGM.

Estos cálculos se realizan para el mismo período de tiempo (1958 - 1976). Como existen interrupciones en algunas series de niveles medios, se completan realizando correlaciones lineales con las correspondientes a localidades cercanas con similar tipo de marea.

Debido a la constante evolución del nivel medio del mar se determinó la tendencia en aquellas localidades donde la longitud del período de observación lo permitía (Mar del Plata y Puerto Madryn). Estos valores pueden utilizarse para actualizar los niveles medios calculados para un período determinado.

Finalmente se refieren los resultados obtenidos al Cero IGM. Para ello se ha tenido en cuenta una vinculación altimétrica efectuada en el año 1996 por la mencionada institución. Las cotas están referidas al sistema adoptado por el IGM que proviene de la obtención del nivel medio del mar en Mar del Plata, utilizando un registro de corta longitud, obtenido en una época distinta de la aquí analizada.

3.6.1. Información de base

Se utilizan series de alturas horarias de las estaciones mareográficas Mar del Plata, Puerto Belgrano, Puerto Madryn, Comodoro Rivadavia y Puerto Deseado. La Tabla 2 muestra los períodos de medición disponibles. Las observaciones en todas las estaciones fueron realizadas utilizando mareógrafos de flotador (Basic Tide Gauge, UNESCO,1985).

Otra información utilizada es la vinculación altimétrica de las estaciones mareográficas realizada en octubre de 1996 por personal del IGM. También se dispone de altimetrías históricas, correspondientes a cada estación.

Estación Año	Mar del Plata	Puerto Belgrano	Puerto Madryn	Comodoro Rivadavia	Puerto Deseado
1958				(.3)	
1959				(.5)	
1960				(.1)	
1961				(.5)	
1962				(.1)	
1963				(.1)	
1964				(.5)	
1965					
1966					
1967					
1968					
1969					
1970					
1971				(.1)	(.1)
1972		(.3)		(.1)	
1973				(.2)	
1974		(.4)			(.1)
1975		(.2)		(.5)	(.3)
1976		(.2)			(.2)
1977		(.5)		(.1)	
1978					
1979		(.2)			
1980		(.2)		(.3)	
1981				(.4)	
1982			(.2)	(.2)	
1983					
1984			(.3)		
1985					
1986					
1987					
1988			(.3)		(.3)
1989					
1990					(.1)
1991			(.2)		
1992			(.2)		
1993					
1994					
1995					(.1)
1996					

TABLA 2.: Períodos de medición disponibles. (Las celdas sombreadas corresponden a mediciones sin interrupción. Las celdas en blanco corresponden a años sin registro. Los números entre paréntesis indican los meses faltantes de registro en el año).

3.6.2. Metodología

Los movimientos relativos Tierra - Luna - Sol producen largos ciclos en la marea. Por ejemplo el movimiento de los nodos de la órbita de la Luna se realiza en 18,61 años, a este ciclo lunisolar se refieren en general las variaciones de largo período de la marea, principalmente para la determinación del nivel medio del mar.

También tienen significado mareográfico los ciclos lunisulares conocidos como ciclo de Metón (19 años), repetición de las fases lunares y ciclo de Saros (18.03 años), repetición de los eclipses.

Debido a esto se decidió calcular el nivel medio del mar como la media aritmética de alturas horarias de marea para un período de 19 años. La decisión de utilizar alturas horarias se debe a que la frecuencia máxima observada en la marea (frecuencia de Nyquist) es de 0.5 ciclos/hora.

Por otro lado, para poder comparar los niveles medios obtenidos se requiere la simultaneidad del período de registro de marea en todas las estaciones. Esto se debe a las variaciones que sufre el nivel medio del mar con el tiempo.

Como puede observarse en la Tabla 2 no se dispone de series completas, condición indispensable para calcular el nivel medio. Luego de analizar distintas posibilidades, se decidió elegir como período de cálculo el comprendido entre los años 1958 - 1976.

En las estaciones Mar del Plata y Puerto Madryn, donde los registros son continuos para el período mencionado, los niveles medios se determinaron como medias aritméticas de alturas horarias.

En las localidades donde las observaciones presentan interrupciones, antes de efectuar el cálculo se completaron las series. Para ello se realizaron correlaciones lineales entre los niveles medios anuales de Mar del Plata y Puerto Madryn con los correspondientes de un puerto cercano con similar tipo de marea que necesitara completarse. Luego Puerto Belgrano fue completado con los datos de la estación mareográfica Mar del Plata y Comodoro Rivadavia y Puerto Deseado con los datos de Puerto Madryn.

Dada la falta de datos, las correlaciones no se limitaron al período de cálculo elegido (1958 - 1976), sino que se utilizó la totalidad de los registros disponibles. Se debe tener en cuenta que no solamente faltan algunos niveles medios anuales sino que existen otros calculados con años de registros incompletos.

Sabiendo que las variaciones estacionales del nivel medio producen una diferencia significativa en su cálculo si no está completo el año de mediciones (D'Onofrio et. al, 1981), se correlacionaron niveles medios anuales calculados con las mismas interrupciones en cada par de estaciones.

3.6.3. Resultados

Al efectuarse las correlaciones lineales mencionadas en el punto anterior, se prestó especial atención a los coeficientes de correlación obtenidos, pues determinan la precisión del ajuste que se está realizando. La Tabla 3. muestra estos resultados.

Correlación Lineal	Coefficiente de Correlación
Mar del Plata / Pto. Belgrano	0.90
Pto. Madryn / Comodoro Rivadavia	0.72
Puerto Madryn / Pto. Deseado	0.74

TABLA 3.: Regresiones lineales.

La Figura I muestra los niveles medios anuales correspondientes a Mar del Plata y a Puerto Belgrano una vez que estos últimos han sido completados.

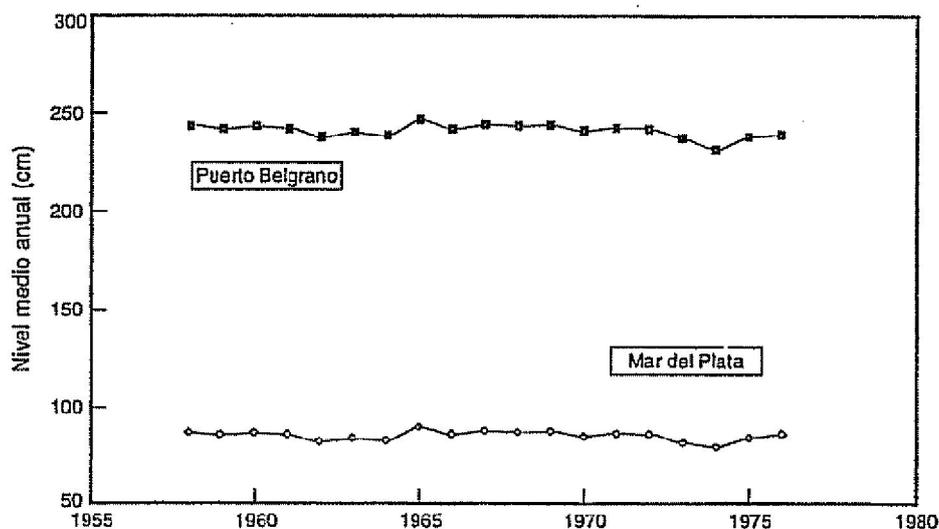


FIGURA I: Niveles medios anuales correspondientes a Mar del Plata y Puerto Belgrano.

La Figura II presenta los niveles medios anuales de Puerto Madryn y las series completadas de Comodoro Rivadavia y Puerto Deseado.

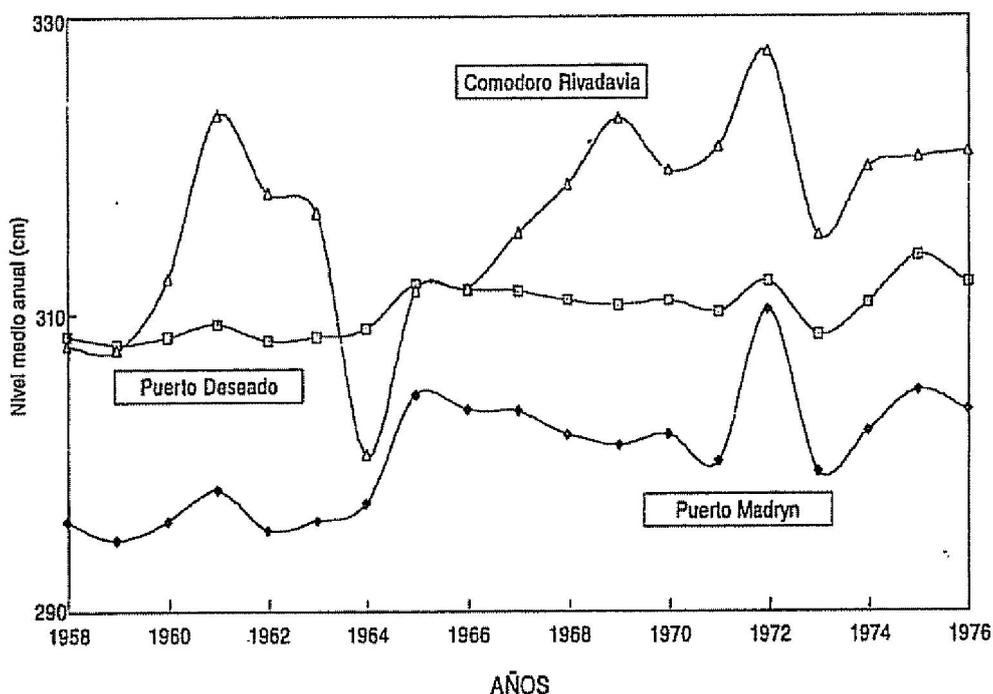


FIGURA II: Niveles medios anuales correspondientes a Puerto Madryn, Comodoro Rivadavia y Puerto Deseado.

Los niveles medios de 19 años (período 1958-1976) para las distintas localidades se presentan en la Tabla 4. Estos valores están referidos a los planos de reducción de sondajes indicados en las Tablas de Marea (1998), para cada uno de los puertos mencionados. La tercera columna de esta Tabla muestra la cota del nivel medio local referida al Cero IGM.

Estación Mareográfica	Nivel Medio (cm) (19 años)	Cota del Nivel Medio Local Referida al Cero IGM (cm)
Mar del Plata	92.7	- 2.5
Puerto Belgrano	238.4	+8.8
Puerto Madryn	302.5	+22.0
Comodoro Rivadavia	315.6	+3.4
Puerto Deseado	310.5	- 7.4

TABLA 4.: Niveles medios de 19 años y cota del nivel medio local referida al Cero IGM.

Dado que se disponía de series largas de registros para Mar del Plata y Puerto Madryn, se determinaron todos los niveles medios de 19 años posibles en forma secuencial. Con las nuevas series obtenidas se calcularon las tendencias mediante regresiones lineales que permiten actualizar los niveles de 19 años, cuando se quiere analizar otra época (Tabla 5.).

Estación Mareográfica	Pendiente	Ordenada al Origen (cm)	Coefficiente de Correlación
Mar del Plata	0.09	-101.23	0.92
Puerto Madryn	0.26	-212.15	0.93

TABLA 5.: Resultados de las correlaciones para Mar del Plata y Puerto Madryn.

4. LA ALTURA A PARTIR DEL POSICIONAMIENTO SATELITAL

En la determinación de coordenadas por medios satelitales, por ejemplo, con posicionadores GPS, las alturas que se obtienen (h) están referidas a un sistema de referencia determinado y a un elipsoide asociado y tienen un claro significado geométrico: h es la altura del punto relevado (P) respecto del elipsoide medida a lo largo de la normal al mismo (Figura III).

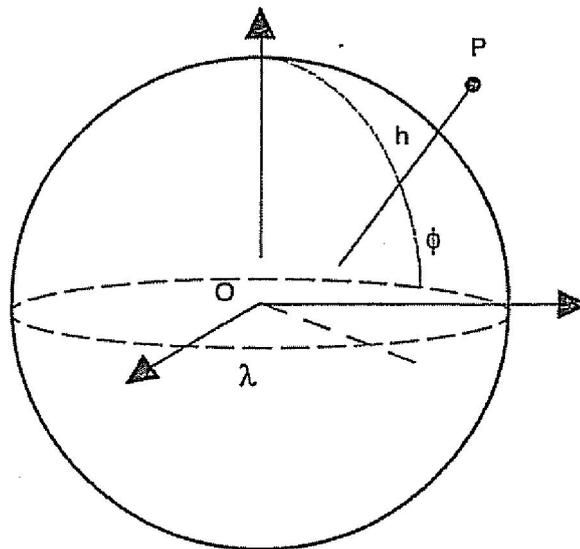


FIGURA III: Las coordenadas de un punto P pueden expresarse por medio de tres componentes cartesianas X, Y, Z , en un sistema de referencia con origen en el centro de masas de la Tierra O , o bien, con sus coordenadas geodésicas λ, ϕ, h , lo que implica adoptar un elipsoide.

Las coordenadas geocéntricas rectangulares X,Y,Z de un punto cualquiera sobre la superficie de la Tierra dependen de la orientación, el origen y la escala de dicho sistema. Las coordenadas geodésicas (o elipsóidicas) dependen además, del elipsoide adoptado.

Este es el primer elemento (básicamente de índole geométrica) a considerar cuando se expresa una altura elipsóidica obtenida con GPS:

El sistema de Referencia y Elipsoide asociado

Por ejemplo, si se parte de un punto POSGAR 94 con coordenadas geodésicas conocidas, el sistema de referencia es POSGAR 94 y los parámetros del elipsoide son los del WGS84:

$$\begin{array}{ll} \text{semieje mayor} & a = 6378137 \text{ m} \\ \text{achatamiento} & f = 1/298.25722\dots \end{array}$$

Como se expresara en la Introducción de este capítulo, se debe tener en cuenta que el elipsoide no es una superficie de nivel y que para que las alturas tengan sentido físico debe conocerse la separación geoide-elipsoide:

$$N = h - H$$

siendo N la altura de la superficie de nivel (en primera aproximación, igual a la ondulación del geoide) respecto del elipsoide de referencia.

4.1. LOS MODELOS DE GEOIDE

Los modelos de geoide permiten describir el comportamiento de una superficie de nivel (geoide) con respecto a una figura geométrica de referencia (elipsoide). Este comportamiento está gobernado por la distribución de masas dentro de la Tierra la cual genera un potencial gravífico cuya manifestación más directa es la gravedad.

Los modelos de geoide disponibles para Argentina, en general, son modelos globales, es decir que provienen de observaciones de distinto tipo (gravimétricas, modelos geopotenciales derivados de las perturbaciones observadas en las órbitas de satélites artificiales, altimetría satelital, gradiometría desde satélites) a lo largo de todo el mundo y producen una solución a escala global. Este tipo de modelos, cuya precisión ha ido en rápido aumento en los últimos años, tienen poca resolución. Esto significa que no pueden dar cuenta de las ondulaciones del geoide que se producen a escala de pocos kilómetros.

Los desarrollados en la Ohio State University denominados OSU89B y OSU91A (Rapp et al, 1991) muy utilizados en los últimos años parecen haber sido superados por el modelo EGM 96 (Lemoine et al, 1996) de la National Imagery and Mapping Agency (NIMA ex Defense Mapping Agency), el que ha sido testeado en la Prov. de Bs. As con resultados muy interesantes (Perdomo et al, 1997).

Estos modelos constituyen una buena referencia general y se pueden tomar como base para desarrollos localizados. En las Universidades de La Plata y Rosario se está trabajando en el desarrollo de un geoide regional más apropiado para el país (Font et al, 1997 y Blitzcow et al, 1997), y para determinadas regiones (Gil et al, 1997).

En principio, estos modelos regionales y locales están basados en mediciones gravimétricas y son controlados con los resultados de GPS. Es posible que la mejor solución pueda lograrse a partir de una integración de ambas mediciones.

4.2. METODOLOGIA GPS PARA EL MEJORAMIENTO DE UN MODELO DE GEOIDE

La medición de una red GPS sobre puntos de nivelación cuya H sea conocida permite establecer en dichos puntos las diferencias:

$$N_{obs} = h - H$$

Las diferencias prácticas de estas determinaciones con relación a las N calculadas a partir de un modelo gravimétrico son básicamente dos, la primera de ellas es una desventaja para el método satelital:

Ya que las "ondulaciones observadas con GPS" sólo se obtienen en forma discreta en aquellos puntos en los que se ha medido y deben ser interpoladas para todo otro punto con algún algoritmo matemático.

La segunda diferencia es a favor de GPS:

Si se dispone de un número apropiado de puntos medidos en la región de trabajo para que la interpolación resulte muy precisa, los errores del procedimiento son centimétricos, una precisión muy difícil de lograr con modelos gravimétricos.

Durante el mes de febrero de 1998, se midió una extensa red GPS en el norte de la Provincia de Buenos Aires sobre puntos de la red de nivelación argentina, o sobre puntos trigonométricos acotados. Para todos ellos se calculó puntualmente $N_{obs} = h - H$.

Para ejemplificar la metodología expuesta se presenta la siguiente figura (IV). Los ejes corresponden a longitud en abscisas y latitud en ordenadas (en grados y fracción). Los símbolos representan la posición de los puntos principales de la red GPS medida, en los que se puede evaluar Nobs. Este conjunto de puntos es parte de la red geodésica de la Prov. de Buenos Aires.

Los valores inclinados sobre los símbolos son los valores medidos en dichos sitios. Las curvas de nivel son el resultado de una interpolación. Es interesante comprobar que las distintas técnicas de interpolación posibles producen resultados ligeramente diferentes. Si la equidistancia entre las curvas es grande, las distintas soluciones posibles difieren más allá de lo aceptable y la interpolación entre curvas se hace dudosa.

Como puede apreciarse en este caso, la equidistancia entre líneas es de 10 cm y la variación de Este a Oeste es mayor de 1 m. En estos casos, la aplicación de distintas herramientas del software produce variaciones de varios centímetros.

Nótese que más allá de esta discusión fina, la figura muestra de manera contundente lo dicho en la explicación de los conceptos fundamentales en cuanto al distinto comportamiento de h con respecto a H en unos 200 km.

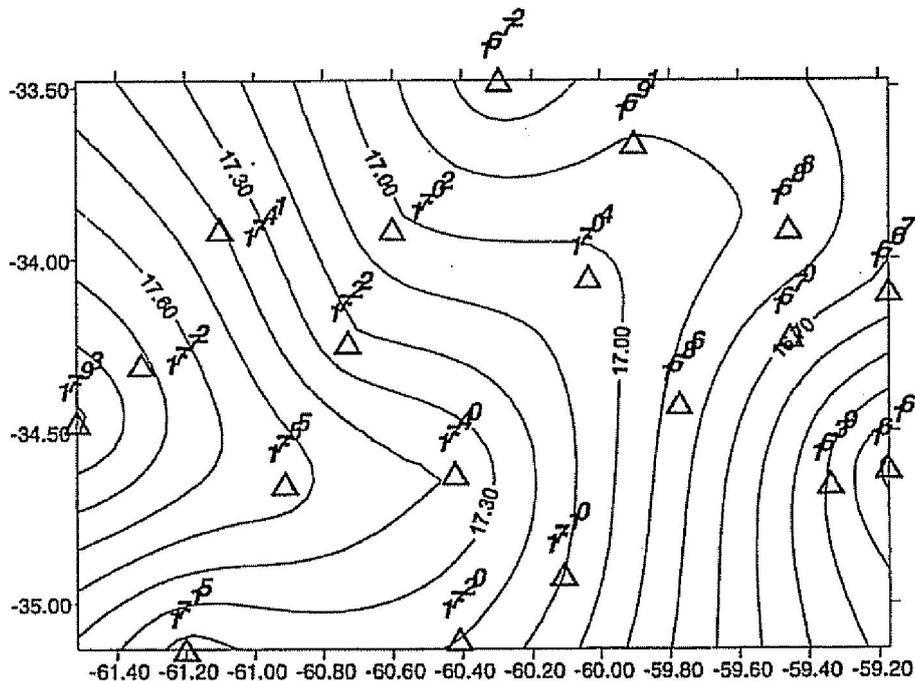


FIGURA IV: Nobs ($h-H$) para el norte de la Provincia de Buenos Aires.

4.3. LA INTEGRACION DE GPS CON LOS MODELOS GRAVIMETRICOS (un método sencillo)

Si los modelos locales, regionales o globales representan el comportamiento general (suavizado) para la zona de trabajo, la ondulación del geode calculada a partir de ellos podría interpretarse como la primera aproximación al valor de ondulación requerido. Si se denomina N_{cal} al valor obtenido de un modelo gravimétrico, y se lo compara con lo observado por medio de GPS ($N_{obs} = h - H$) se obtiene una evaluación del modelo en el área relevada.

A modo de ejemplo se presentan los resultados para la misma región obtenidos con el modelo global EGM96 (Lemoine et al, 1996). Una evaluación más detallada puede encontrarse en Perdomo et al (1998) donde también se exponen los resultados obtenidos con las modelos OSU91a (Rapp et al, 1991) y GFZ96r (Gruber et al, 1996).

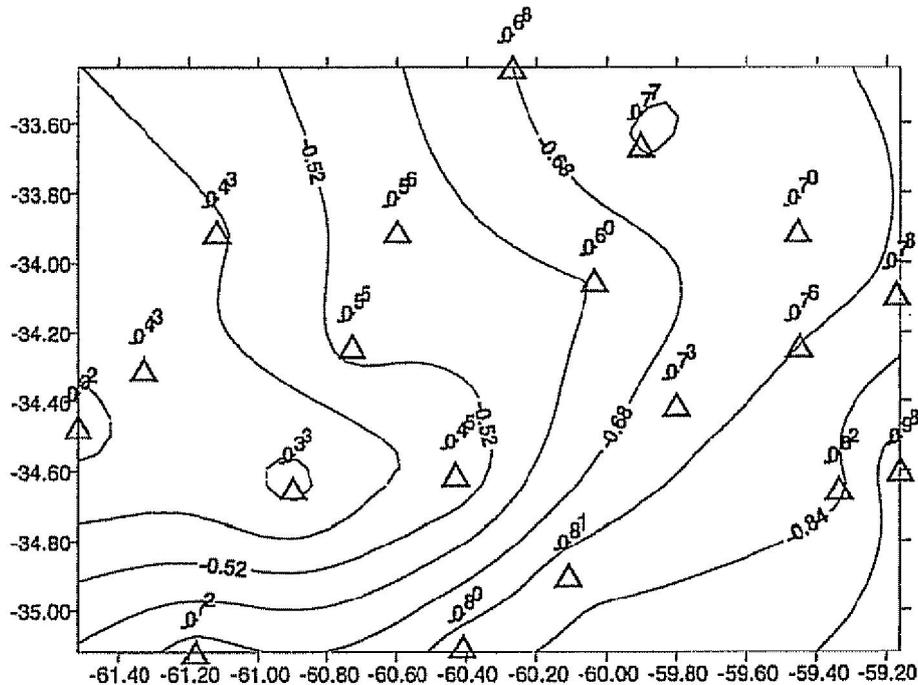


FIGURA V: $N_{obs} - N_{cal}$ para el norte de la Provincia de Buenos Aires.

Las diferencias $N_{obs} - N_{cal}$ (para el modelo EGM96) se presentan en la Figura V. Las diferencias tienen una clara evolución desde valores negativos grandes en el extremo sureste, hasta valores negativos pequeños en el oeste. La equidistancia es ahora de 5 cm y la variación total es de sólo 0,6 m. Este resultado sugiere que sería posible interpolar diferencias entre los valores observados y los del modelo con precisiones centimétricas.

Este comportamiento sugiere que el modelo adoptado para la región puede ser una combinación de un modelo global (el que mejor represente los valores observados) y una corrección gráfica (o numérica tomada de la matriz de diferencias utilizada para generar el gráfico).

Este planteo requiere una estimación crítica de los errores que se pueden cometer mediante su empleo. Por ejemplo, la figura muestra zonas donde indudablemente se requieren más puntos para asegurar el resultado (en -60.8,-34.6 existe un extremo, y entre ese punto y el borde inferior de la figura se nota un gradiente importante). Otras regiones (al norte de -34.4) muestran variaciones muy suaves y no parece probable que existan extremos que introduzcan errores mayores a unos pocos cm.

El ejemplo presentado permite evaluar esta metodología en distancias relativamente cortas. Cada uno de los puntos principales de la red cuenta con un segundo punto medido en un entorno de 10 km. Este punto auxiliar permite detectar eventuales errores gruesos en h y/o H . Estos puntos no fueron incluidos en las figuras anteriores, pero en ellos se dispone de la información básica para obtener Nobs. La tabla siguiente muestra los valores observados y los obtenidos a partir de la interpolación en la figura V.

Punto	Nobs	Nint	Punto	Nobs	Nint
Chacabuco	17.42	17.39	Bragado	17.19	17.22
Junin	17.53	17.54	C. de Areco	16.89	16.90
Chivilcoy	17.13	17.09	S.A. de Areco	16.69	16.70
Colón	17.46	17.41	Jáuregui	16.15	16.18
San Nicolás	16.70	16.73			

Las diferencias entre los valores observados y los que resultan de la metodología propuesta son muy pequeñas (en todos los casos menores o iguales a 5 cm). Es un orden similar al error con que se puede determinar una altura h sobre el elipsoide o el que se puede esperar para las cotas de nivelación geométrica con errores propagados a lo largo de miles de kilómetros incluyendo las incertidumbres propias de la estabilidad de los puntos sobre la corteza terrestre.

5. CONCLUSIONES

La Red de Nivelación Fundamental Argentina está prácticamente concluida y ha sido medida con muy buena precisión, tomando recaudos de asegurar estabildades de marcas y agregar mediciones gravimétricas.

La Red Mareográfica Nacional cuenta con estaciones que poseen series de observaciones suficientemente prolongadas, algunas de ellas con participación en programas internacionales de análisis del nivel del mar.

Las diferencias de niveles medios obtenidas no representan en este caso el gradiente de presión que existe entre las distintas localidades. Esto se debe a que no se han efectuado las correcciones oceanográficas y meteorológicas correspondientes. De acuerdo con lo expuesto, estos desniveles presentan dos tipos de error, uno debido al traslado del Cero del IGM desde su punto origen hasta los distintos lugares de la costa y otro debido a las mediciones de marea. Se destaca que las diferencias encontradas son del orden de magnitud de las obtenidas entre Aberdeen ($57^{\circ} 09'N$, $02^{\circ} 05'W$) y Newlyn ($50^{\circ} 06'N$, $05^{\circ} 33'W$) por Thompson, (1980).

Independientemente de perfeccionamientos que se podrían introducir mediante correcciones oceanográficas, meteorológicas, geodésicas (mediante correcciones por gravedad medida) y hasta geodinámicas, puede decirse que, la vinculación entre redes de nivelación y mareográfica ha mostrado diferencias razonables y de análisis promisorio.

Los modelos generales de potencial terrestre, combinados con mediciones GPS precisas, permiten inferir que la tecnología satelitaria, además de haber resuelto satisfactoriamente las posiciones horizontales, permite efectuar aportes sustanciales a la resolución de problemas altimétricos.