

Línea de Calibración Gravimétrica en la República Argentina: metodología y resultados

Ma. Inés Pastorino*
Patricia I. López Domínguez*
Federico Sokolowski*
Eduardo Lauría**

Abstract

The Gravimetric Calibration Line for the Argentine Republic (LICAGRA), that appears in this paper was based on the measurement and the processing of 19 gravity stations, of which 5 are local absolute gravity base stations and 14 are excentric stations. The calibration line was measured in its totality within the framework of this project with absolute gravity stations established by the Institut für Erdmessung (IFE) of the University of Hannover, Germany between 1989-1991. They are part of the Absolute Gravity Control Network.

The gravimetric observations were carried out simultaneously with four Lacoste-Romberg model G gravimeters and positioned by means of a Magellan GPS model NAV 1000-pro, on all the stations and their excenters. The measurement campaign was carried out in a joint operation between the Instituto Geográfico Militar (IGM) and the Laboratory of Applied and Environmental Geophysics (LAGAMA) of the Department of Geodesy and Topography (DGT) of the Faculty of Exact Sciences and Technology of the National University of Tucumán from November 15-25, 1999.

The processing of the observations was done with the Grav-pak software (1999), at the LAGAMA of the National University of Tucumán.

Resumen

La Línea de Calibración Gravimétrica para la República Argentina (LICAGRA), que se presenta en este trabajo se ha elaborado a partir de la medida y el procesado de 19 estaciones de gravedad, de las cuales 5 son estaciones base de gravedad absoluta y 14 estaciones excentros locales. La línea de calibración fue medida en su totalidad

* Laboratorio de Geofísica Aplicada y Ambiental (LAGAMA). Departamento de Geodesia y Topografía, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Universidad Nacional de Tucumán, correo electrónico: maines@unt.edu.ar

** Departamento de Geodesia. Instituto Geográfico Militar (IGM), correo electrónico: elauria@igm.gov.ar

en el marco de este proyecto apoyada en las estaciones de gravedad absoluta establecidas por el Institut für Erdmessung (IFE) de la Universidad de Hannover, Alemania entre los años 1989 - 1991, las que forman parte de la Red de Control de Gravedad Absoluta.

Las observaciones gravimétricas se llevaron a cabo de forma simultánea con cuatro gravímetros Lacoste-Romberg modelo G y posicionamiento mediante un instrumento GPS Magellan modelo NAV 1000-PRO, sobre todas las estaciones y sus excentros.

La campaña de mediciones se llevó a cabo en una acción conjunta del Instituto Geográfico Militar (IGM) y el Laboratorio de Geofísica Aplicada y Ambiental (LAGAMA) del Departamento de Geodesia y Topografía (DGT) de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán del 15 al 25 de noviembre de 1999.

El procesado de las observaciones ha sido realizado mediante el software GRAVPAK (1999), en las instalaciones del LAGAMA de la Universidad Nacional de Tucumán.

Introducción

El objetivo de este trabajo es determinar una Línea de Calibración para los gravímetros relativos que nos permita establecer las variaciones de los valores gravimétricos de Norte a Sur de la República Argentina, que se extiende aproximadamente entre los paralelos de latitud 22° S a 55° S. Una vez cumplida esta etapa estaríamos en condiciones de asignar nuevos valores a la Red Gravimétrica (Figura 3) que permitan complementar y/o optimizar los de la Red BACARA (Base de Calibración de la República Argentina -1968) que se muestra en la Figura 1. Al mismo tiempo, mediante este trabajo se van a establecer los excentros de todas las Estaciones de Gravedad Absoluta existentes en nuestro país, en lugares a los cuales la Accesibilidad sea libre durante las 24 horas del día, cumpliendo además con las condiciones de estabilidad, permanencia, accesibilidad y protección.

Es sabido que la Red en sus condiciones actuales presenta algunas dificultades propias de la metodología empleada en su momento, relacionada fundamentalmente con la falta de homogeneidad y que se materializa en ciertos casos en la falta de precisión requerida para la ejecución de algunas tareas propias de la especialidad.

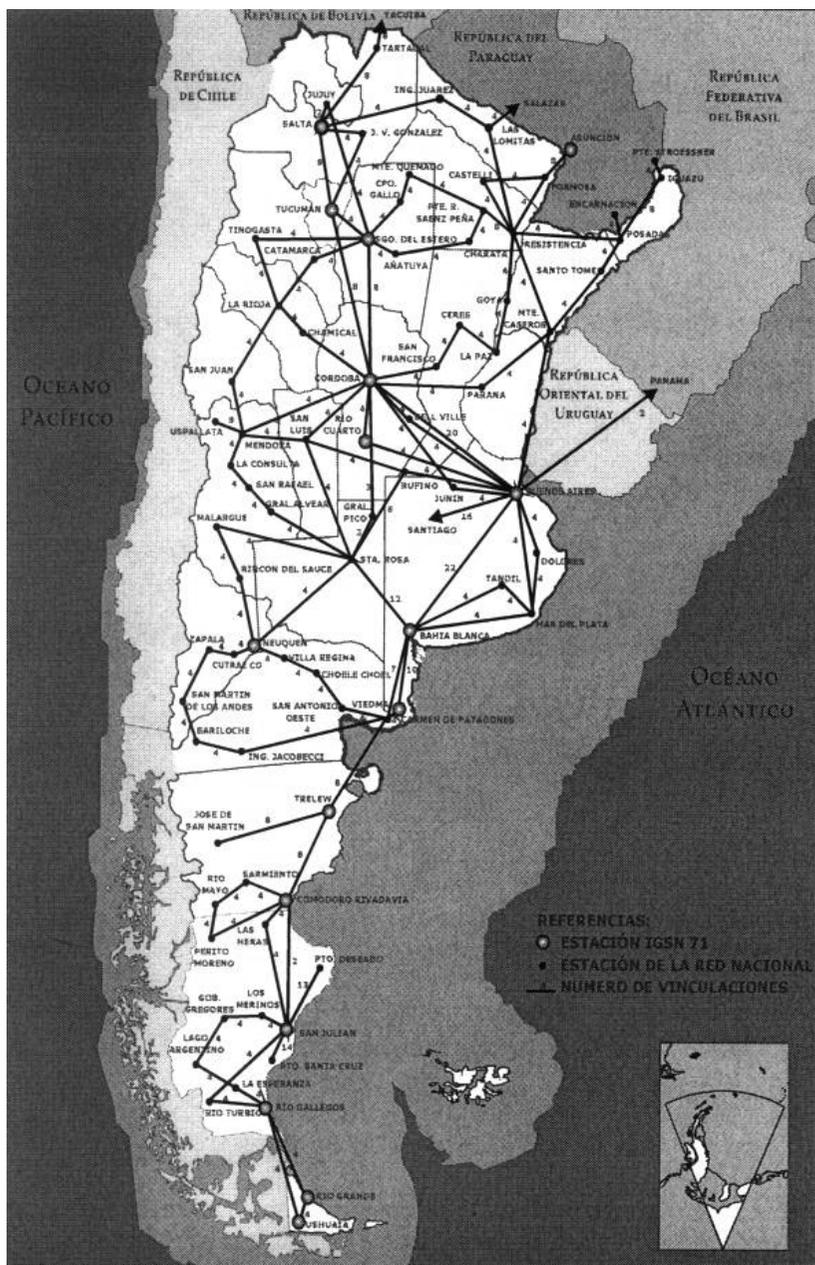


Figura 1. Base de Calibración de la República Argentina (BACARA) 1968.

Antes que nada cabe destacar que el diseño de la nueva base (Figuras 2 y 3) fue propuesto con tan sólo 20 puntos nuevos, en contra posición a otra presentación que propuso recuperar 20 estaciones desaparecidas, lo cual no garantizaría la precisión de primer orden que debe tener la Red, debido a la heterogeneidad en los nuevos levantamientos con los viejos. Dicha explicación fue debidamente dada en el momento de presentación del “Proyecto y Modelado de la Red Gravimétrica Argentina” en la VI Semana Nacional de Cartografía – I Jornadas del Instituto Geográfico Militar en Agosto 1997.

Para lograr una Red Uniformemente Estructurada es necesario, debido a la gran variación en latitud de 33° , establecer una Línea de Calibración definida por los puntos dados por las Estaciones Absolutas de Gravedad existentes en el país. Entre 1989 y 1991 la Universidad de Hannover, Alemania, estableció cinco estaciones Absolutas de Gravedad en Argentina, ubicadas al Norte (latitud S 24.73°) en San Lorenzo, Salta; en San Juan (latitud S 31.55°); dos estaciones en la provincia de Buenos Aires: una en Migueletes (latitud S 34.57°) y otra en Tandil (latitud S 37.40°) y al Sur en Comodoro Rivadavia (latitud S 45.82°), Chubut (Figura 2 y 3).

El objetivo final del proyecto será el de optimizar la Red Gravimétrica Nacional y constituir una base digital de datos gravimétricos homogéneos que permitan estar al servicio de las necesidades básicas de la Geociencia Nacional, tales como:

- Proporcionar información precisa necesaria para definir el geoides nacional lo cual permite explotar al máximo el GPS (Sistema de Posicionamiento Global).
- Proporcionar los parámetros requeridos para definir la estructura geológica nacional, la cual será una base para la exploración de recursos energéticos, minerales, y demás elementos de importancia económica.
- Proporcionar los parámetros necesarios para el cuidado y ordenación eficaz del territorio, minimizando los riesgos naturales, y resguardando a la vez al hombre y a todos los elementos que lo rodean.

El Proyecto de la *Línea de Calibración* (Figura 2) como la Red Gravimétrica (Figura 3) fue puesto a consideración y opinión de los colegas de nuestra área como así también de las conexas al ser presentado a la “VI Semana Nacional de la Cartografía – I Jornadas del Instituto Geográfico Militar”, en Buenos Aires, Argentina y a la “VIII Reunión de Consulta de la Comisión de Geofísica del IPGH”, en Santiago, Chile.



Figura 2. Línea de Calibración Gravimétrica de la República Argentina (LICAGRA), una las estaciones de Gravedad Absoluta.

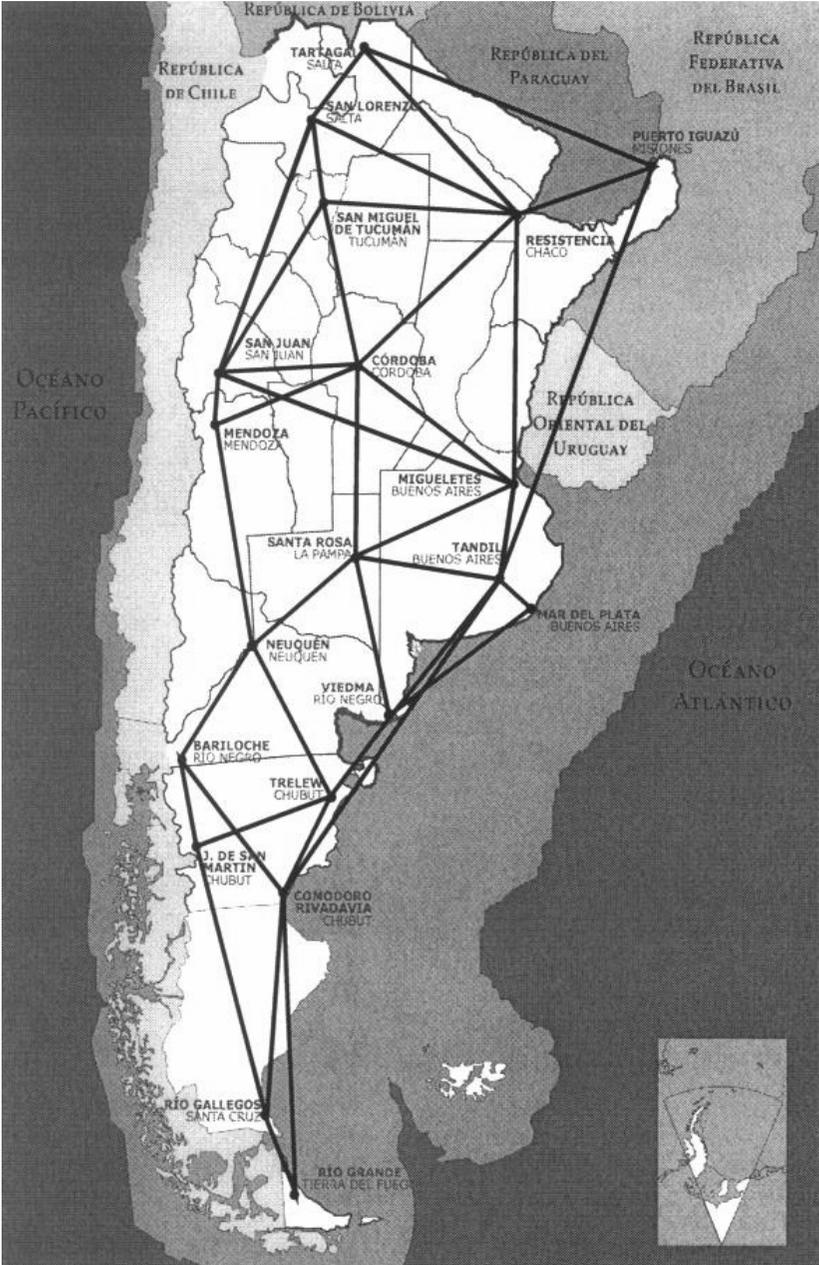


Figura 3. Diseño Optimizado de la Red Gravimétrica Argentina.

Antecedentes

El antecedente en Argentina, sobre mediciones con gravímetros relativos (Lacoste-Romberg y Worden), se remonta a 1968 (Guallart *et al.*, 1999). En aquella época, la compañía Yacimientos Petrolíferos Fiscales (YPF - Empresa Estatal de Hidrocarburos, en aquel momento), el Servicio de Hidrografía Naval (SHN), la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires y el Instituto Geográfico Militar (IGM), con la colaboración del Servicio Geodésico Interamericano (IAGS) llevaron a cabo la operación “Base de Calibración de la República Argentina” (BACARA), logrando la Red Gravimétrica y la Línea de Calibración Gravimétrica disponibles hasta este momento (Figura 1).

La campaña realizada en 1968 tenía como misión vincular entre sí los diferentes levantamientos gravimétricos independientes existentes, y referenciarlos a la línea de calibración que se extendía desde *La Quiaca* (Jujuy) hasta *Ushuaia* (Tierra del Fuego), que no estaba apoyada con la estación de gravedad absoluta. La coincidencia de la realización de dicha operación con el proyecto de la red de 1er. orden del IGM, hizo posible que por medio de la extensión de la operación BA.CA.RA., ésta cubriera también las necesidades de una Red Nacional de control de 1er. orden (Mazzini, 1969).

En aquella oportunidad, se eligieron como estaciones gravimétricas, 79 aeródromos de la República Argentina y 22 de la República de Bolivia, referidos al punto Fundamental de Gravedad No. 1 en Migueletes (provincia de Buenos Aires, Argentina), donde actualmente se encuentra la estación absoluta. El mayor error cuadrático medio de una estación resultó ser de 0.04 mgal (Manzini, 1969).

El objeto de interés científico del nuevo proyecto de la Red Gravimétrica Nacional es disminuir drásticamente la heterogeneidad de los métodos e instrumental (Lacoste-Romberg y Worden) usados tanto en el modelo para las observaciones como en la reducción y ajuste de las observaciones, lo cual fue cuidadosamente tratado mediante métodos estadísticos.

Modelo

Para obtener una verdadera optimización del modelo a implementar es menester analizar las diferentes variantes que nos permiten la aplicación del software GRAVPAK (1999).

Excluidos en primera instancia los factores económico-organizativos, es factible simplificar la optimización considerando que las variantes analizadas, que son diferentes modelos funcionales y estocásticos sometidos al análisis. Es suficiente conocer la matriz de varianza-covarianzas del modelo estocástico, diseñada especialmente para esquema de redes.

Este procedimiento es una herramienta muy útil en la estimación preliminar del análisis de precisión y exactitud. Las condiciones impuestas en el modelo fueron establecer una precisión uniforme en todas sus estaciones y un espaciado homogéneo entre ellas.

Para la determinación de la *Línea de Calibración Gravimétrica* (Figura 2), Red de orden cero, se consideró el modelo con una precisión de $\sigma = 0.01$ mgal, para lo cual se diseñó la secuencia ABCDEEDCBA, es decir, se realizó la unión entre las Estaciones Absolutas existentes en Argentina, de ida y vuelta, entre Salta, San Juan, Buenos Aires, Tandil, Comodoro Rivadavia y como excentros de la Estación de Gravedad Absoluta Comodoro Rivadavia, Río Gallegos (Santa Cruz) y Río Grande (Tierra del Fuego); a realizar en el futuro, como una extensión de la Línea de Calibración que involucra las Estaciones Absolutas. Está claro que esta Línea servirá de control de los gravímetros relativos, además de ser en el futuro, la base para establecer los nuevos valores para la Red de Primer Orden. Además de las Estaciones Absolutas, ya monumentadas, deberán establecerse por lo menos 2 (dos) excentros correspondientes a cada una de dichas estaciones, las que se vincularán mediante la secuencia ABABA. Excentros que respecto a la accesibilidad deberá ser posible acceder a cualquier hora del día y sin necesitar dar aviso previo, es decir *lugar público*, como una plaza, por ejemplo.

Las estaciones se ubicaron en lo posible espaciadas entre 100 a 500 km, vinculadas entre sí con varios gravímetros (en este caso 4 instrumentos) midiendo en una secuencia ABA y a su vez cada estación conectada con al menos otras dos. Todo esto fue volcado en las exigencias puestas en la matriz de varianza-covarianza donde los ECM (error cuadrático medio) serán menores o iguales a 0.015 mgal. La optimización de la matriz varianza-covarianza fue realizada mediante el módulo NETOPT del programa GRAVPAK (1999). Esta Red (Figura 3) fue optimizada con 20 estaciones, y el datum de la misma está dado por la estación de gravedad absoluta, ubicada en Tandil.

La preferencia de ésta por sobre las otras cuatro estaciones absolutas se debe a que no se encuentra en zona sísmica como es el caso de las de San Lorenzo en Salta o San Juan (Figuras 4 y 5) y por otra parte, no sufre la influencia cercana de grandes masas de agua, como las estaciones de Miguelete y Comodoro Rivadavia, considerando el Río de la Plata y el Océano Atlántico, respectivamente. La elección y ubicación de las 20 estaciones de la Red de Primer Orden se realizó teniendo en cuenta la disponibilidad, en el momento de diseño de la red, de vuelos comerciales que pudieran facilitar el traslado del grupo de trabajo para realizar las mediciones.

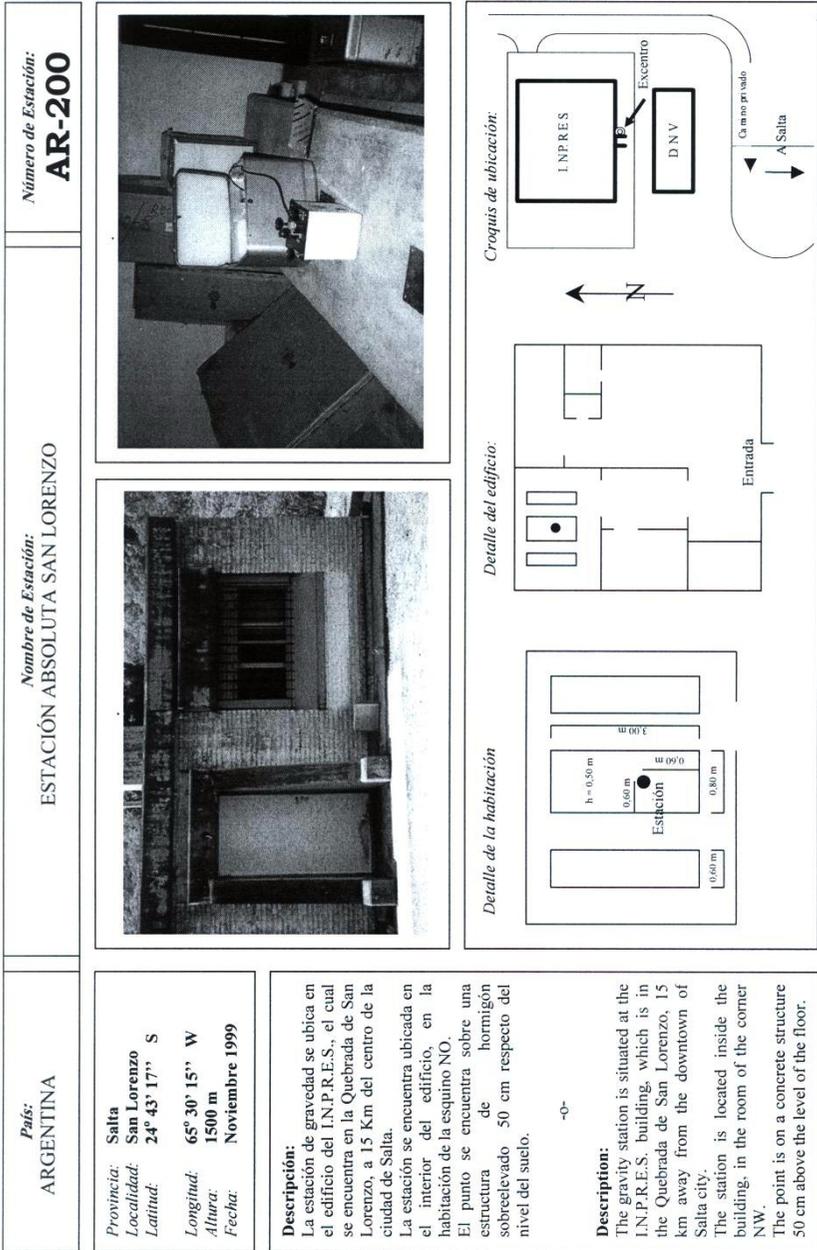


Figura 4. Estación Absoluta San Lorenzo.

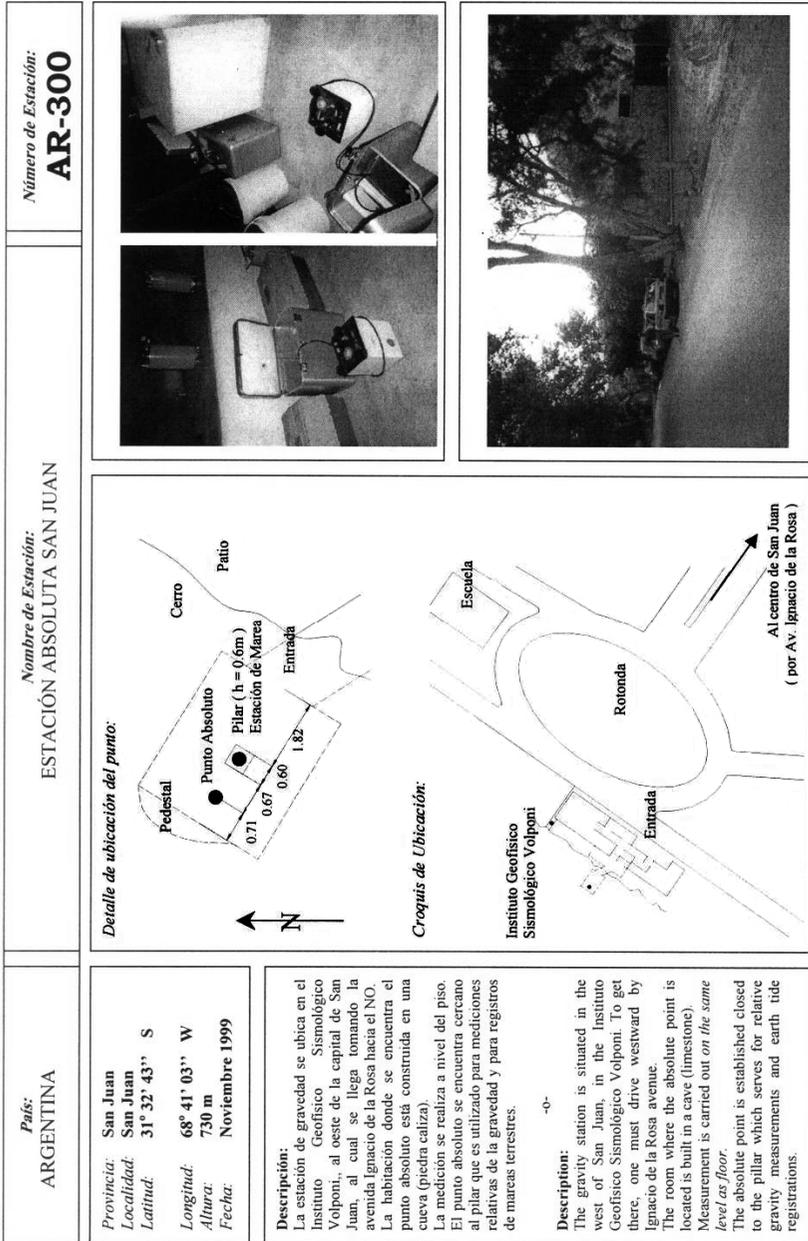


Figura 5. Estación Absoluta San Juan.

En todos los casos, al realizar la ubicación de las nuevas estaciones y de los excentros, para la elección del lugar de emplazamiento deberá tenerse en cuenta factores tales como: estabilidad, accesibilidad, permanencia, lugar público y protegido (en lo posible), siendo necesario realizar una adecuada monumentación de carácter permanente y una clara y detallada monografía de cada estación.

Operaciones de Campo

Manteniendo los objetivos propuestos, se ejecutó la campaña de medidas sobre un total de cinco estaciones de gravedad absoluta y sus respectivos excentros, con cuatro gravímetros Lacoste-Romberg, pertenecientes a NIMA (National Imagery and Mapping Agency de la Geospatial Information and Services de USA): G-043 y G-673 (en préstamo al IGM), y G-013 y G-057 (en préstamo al LAGAMA del DGT). La campaña se realizó entre los días 15 y 25 del mes de noviembre de 1999, y la comisión se desplazó por vía aérea entre ciudades, y dentro de las mismas, para establecer los excentros, por vía automovilística.

Se partió midiendo desde la estación absoluta que se encuentra en la Quebrada de San Lorenzo, provincia de Salta, tomándose como excentros la puerta de acceso a la estación, el Aeropuerto y la Iglesia de San Francisco. Con las observaciones realizadas allí se partió a San Juan donde se midió en la estación absoluta y como excentros, en la puerta de acceso a la misma, el Aeropuerto y la Catedral de San Juan; luego se continuó a Buenos Aires, midiéndose en la estación absoluta de Migueletes y como excentros en la Parroquia Nuestra Señora de Luján y en la Sección Gráfica del IGM. Continuamos con la estación absoluta de Tandil, ubicando a los excentros en la Estación de Marea, al lado de la Absoluta, en el Nodal 77 y en la Base de la Fuerza Área, utilizando allí el punto existente de la Red BACARA, para luego terminar en la estación absoluta Comodoro Rivadavia, tomándose allí como excentros el Aeropuerto y el monumento a Manuel Belgrano. Finalizada la medición de las estaciones en el sentido descrito, se procedió a la medición de la línea en sentido inverso, comenzando en Comodoro Rivadavia y terminando en San Lorenzo, Salta.

A continuación se muestra en la tabla I el detalle de todas las estaciones absolutas con sus respectivos excentros.

Tabla 1
Detalle de las Estaciones Absolutas

<i>Estaciones Absolutas</i>	<i>Estaciones Excéntricas</i>
San Lorenzo, Salta	- Puerta de acceso del absoluto San Lorenzo - Iglesia de San Francisco - Aeropuerto de Salta
El Zonda, San Juan	- Puerta de acceso del absoluto El Zonda - Aeropuerto de San Juan - Catedral de San Juan - Estación de Mareas
Miguelete, Buenos Aires	- Instituto Geográfico Militar - Parroquia de Nuestra Señora de Luján
Tandil	- Nodal 77 - Base de La Fuerza Aérea - Estación de Mareas
Comodoro Rivadavia	- Aeropuerto Comodoro Rivadavia - Monumento a Manuel Belgrano

En las tablas que se producen para cada gravímetro se establece un solo tiempo, una lectura de gravímetro que es, en general, el valor promedio y ésta es la observación correspondiente a una ocupación de estación.

Cabe aclarar que está previsto continuar con la línea llevando el valor de la Estación de Comodoro Rivadavia a Río Gallegos (Santa Cruz) y Río Grande (Tierra del Fuego), para establecer estas dos últimas estaciones como excentros.

Como se ha mencionado, los gravímetros fueron transportados por avión y por tierra en vehículo, sobre los asientos traseros, perfectamente acondicionados para evitar vibración y cualquier cambio brusco de temperatura. Cada vez que se descendía de los aviones se dejaba reposar los gravímetros una hora para eliminar el stress del vuelo, lo que ayuda a estabilizar la deriva de los gravímetros.

Todas las precauciones en cuanto a las mediciones realizadas con los gravímetros fueron tenidas en cuenta según lo aconsejado por la fábrica de los instrumentos.

Todos los valores de Gravedad fueron siempre determinados poniendo los gravímetros directamente sobre el suelo donde, en algunos casos, se encuentra el botón de la marca que señala la ubicación de la estación, por ejemplo en las Estaciones Absolutas.

En todas las estaciones la ubicación geográfica de los puntos fue determinada mediante un posicionador satelital GPS, marca Magellan, modelo NAV 1000-PRO,

que asegura la precisión de los valores de coordenadas geográficas al segundo de arco sexagesimal, o sea con elipses de error menores de 30 m.

No se tomaron datos en el campo para realizar correcciones por influencia de la presión atmosférica o por la temperatura ambiente, debido a la poca significación de estas dos variables en los gravímetros modernos, que ya están adaptados para compensar dichos efectos ambientales.

Al mismo tiempo que se realizaban las mediciones de gravedad se confeccionaron los croquis de todas y cada una de las estaciones y tomándose las fotografías necesarias y correspondientes croquis, para la elaboración de las correspondientes monografías. Se adjuntan sólo dos de ellas.

Procesado de los datos

El trabajo de procesado y ajuste de los datos obtenidos se realizó en el LAGAMA, utilizando para el cálculo el software GRAVPAK (1999).

La etapa de tratamiento de los datos incluyó la transformación de las lecturas de dial a miligales, de acuerdo a las tablas correspondientes a cada gravímetro utilizado en la campaña y además se efectuó las correcciones por mareas terrestres y deriva (Tsubokawa y Nakai, 1982).

Luego se realizó el ajuste de la red completa, tomando como puntos fijos para el cálculo de compensación, los valores de gravedad de las cinco estaciones absolutas. Como resultado de este ajuste se obtienen valores compensados de las constantes de calibración de los instrumentos y valores absolutos de gravedad compensados de los excentros, con sus respectivas desviaciones estándar o EMC.

Los valores de las constantes de calibración ajustados, tienen aplicación en toda la extensión de la línea, puesto que salen como resultado del ajuste de la red completa. Debido a que nuestra Línea de Calibración tiene una gran extensión en latitud ($\Delta\phi = 20^\circ$), los valores de estas constantes no necesariamente son iguales en los diferentes tramos, por lo que una sola constante no es representativa del comportamiento del gravímetro en las diferentes latitudes (Nakagawa *et al.*, 1985). Para obtener constantes de calibración más precisas en este sentido, se realizaron ajustes parciales para todos los tramos, y así se determinaron las distintas constantes, que podrán ser utilizadas en las futuras mediciones de las diferentes latitudes.

Modelo Matemático

Las observaciones de la Línea de Calibración se ajustaron con el software GRAVPAK (1999), que utiliza el modelo de ecuaciones de observaciones. En este modelo, los observables son diferencias de gravedad observada entre dos estaciones consecutivas, y con un mismo gravímetro. A continuación se presenta el modelo utilizado para obtener el ajuste.

En el modelo utilizado, las observaciones están representadas por un sistema de n ecuaciones con cinco parámetros incógnitas dado por:

$$g_i - g_j - k_{1\ell}(R_i - R_j) - k_{2\ell}(R_i^2 - R_j^2) - d_q \Delta T_{ij} = v_{ij} \quad (1)$$

donde:

- g_i, g_j** son los parámetros que representan valores de gravedad en dos estaciones i y j , sucesivamente observadas;
- $k_{1\ell}$** es el parámetro para la constante de calibración de primer orden para el gravímetro l ;
- $k_{2\ell}$** es el parámetro para la constante de calibración de segundo orden para el gravímetro l ;
- R_i y R_j** son las lecturas del gravímetro con el instrumento l en las estaciones i y j , respectivamente, corregidas por las tablas de calibración del dial, mareas terrestres y posiblemente otros factores relacionados con la posición del punto;
- d_q** es el parámetro de deriva para el intervalo de deriva q , determinado por el usuario;
- ΔT_{ij}** es la diferencia de tiempo entre las lecturas de las estaciones i y j ;
- v_{ij}** es el error de observación.

Substituyendo en la ecuación (1) los valores aproximados:

$$g_i^o, g_j^o, k_{1\ell}^o, k_{2\ell}^o, d_q^o$$

más una corrección δ para cada uno, por los valores:

$$g_i, g_j, k_{1\ell}, k_{2\ell}, d_q$$

respectivamente, la ecuación (1) se convierte en la ecuación (2):

$$(g_i^o + \delta g_i) - (g_j^o + \delta g_j) - (k_{1\ell}^o + \delta k_{1\ell})(R_i - R_j) - (k_{2\ell}^o + \delta k_{2\ell})(R_i^2 - R_j^2) - (d_q^o + \delta d_q) \Delta T_{ij} = v_{ij}^o + \delta v_{ij}$$

Definimos un valor v^o , tal que:

$$v_{ij}^o = (g_i^o - g_j^o) - k_{1\ell}^o(R_i - R_j) - k_{2\ell}^o(R_i^2 - R_j^2) - d_q^o \Delta T_{ij}$$

Con lo cual, la ecuación (2) se convierte en:

$$\delta g_i - \delta g_j - \delta k_{1\ell} (R_i - R_j) - \delta k_{2\ell} (R_i^2 - R_j^2) - \delta d_q \Delta T_{ij} = \delta v_{ij} \quad (3)$$

O en notación matricial:

$$\mathbf{A} \delta \mathbf{x} = \delta \mathbf{V} \quad (4)$$

Introduciendo la matriz de pesos diagonal \mathbf{P} :

$$P = \begin{pmatrix} 1/\sigma_1^2 & & & & 0 \\ & 1/\sigma_2^2 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ 0 & & & & 1/\sigma_n^2 \end{pmatrix}$$

donde $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_n^2$ son los estimadores a priori de las varianzas de las incógnitas.

La solución por mínimos cuadrados de la ecuación (4) es:

$$\delta \mathbf{X} = - (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{V}$$

Los estimadores mínimos cuadrados de los valores de los parámetros se obtienen con:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}^0 + \delta \mathbf{X}$$

donde \mathbf{X}^0 es el vector de valores aproximados para los parámetros.

Los residuales pesados para las ecuaciones de observación son dados por:

$$\mathbf{P} \mathbf{V} = \mathbf{P} \mathbf{V}^0 - \mathbf{P} \mathbf{A} \delta \mathbf{X}$$

La varianza de la unidad de peso está dada por:

$$S_0^2 = \frac{V^T P V}{n - m}$$

donde **n** es el número de diferencias de gravedad observadas y **m** el número de parámetros. El valor esperado de S_0^2 es **1**.

El estimador de la varianza a posteriori para un gravímetro cualquiera es:

$$S^2 = \frac{\sum v_{ij}^2}{n - 1}$$

donde la suma es llevada a cabo sobre los residuales de las observaciones realizadas con ese gravímetro.

En este análisis, se supone que las observaciones con cada gravímetro se obtienen de poblaciones diferentes, con varianzas distintas. Debido a que los pesos de las observaciones no son conocidos a priori, les asignamos arbitrariamente un valor de 400 (que corresponde a una desviación estándar de 0.05 mGal) en el primer ciclo del ajuste. En los siguientes ciclos, se calculan nuevos pesos para cada gravímetro según:

$$P_{new} = \frac{S_0^2}{S_{old}^2} \quad \text{donde} \quad S_{old}^2 = \sum_r \frac{v_{ij}^2}{r - 1}$$

y la suma se lleva a cabo sobre las **r** observaciones realizadas con cada gravímetro.

Tendiente a eliminar las mediciones que contienen errores groseros de mediciones cuyos errores se distribuyen normalmente, los datos ingresados son rechazados si:

$$\left| v_{ij} \sqrt{p_{ij}} \right| > C S_0$$

donde **C** es un número elegido por la persona que realiza el ajuste. En el primer ciclo de ajuste se toma para **C** un valor alto (10 ó más) dependiendo de la estimación de cuan cercanos sean los valores aproximados a los reales (ajustados). Luego de inspeccionar el histograma de los residuales y otros estadísticos, de cada ciclo del ajuste, se

puede elegir otro valor para C para el próximo ciclo de ajuste. El valor C nunca se elige menor que 3 (estaríamos en el límite de los “tres sigmas”). En nuestro caso se realizaron tres ciclos de ajuste, con valores de C igual a 10, 5 y 3, en ese orden.

Resultados

A continuación se muestran los resultados del procesado, tanto el correspondiente al ajuste de la red completa como el de los tramos independientes (Tabla 2).

Tabla 2
Información general del ajuste

Número de observaciones	216	
Número de observaciones aceptadas	184	
Número de observaciones excluidas	32	
Número de incógnitas	18	
Número de grados de libertad	166	
Número de valores de bases gravimétricas	19	
Número de valores de bases gravimétricas fijas	5	
Número de de bases gravimétricas ajustables	14	
Número de constantes de escala instrumental	4	
Número de constantes de escala instrumental fijas		0
Número de constantes de escala instrumental ajustables	4	
Peso medio de la observación	363.4923 mgal	
	Antes del ajuste	Después del ajuste
Media de residuales ponderadas-	0.0978 mgal	0.0368 mgal
Suma de residuales--	0.4370 mgal	- 0.2238 mgal
Suma de residuales ponderados	17.9951 mga	6.7796 mgal
Suma de cuadrados de residuos	1.3727 mgal ²	1.4382 mgal ²
Suma de cuadrados de residuos ponderados	131.8328 mgal ²	123.6979 mgal ²
Error estándar por unidad de ponderación	0.8222 mgal	
Desviación estándar de una observación	0.0884 mgal	

Residuales

En la Figura 6 se muestra la distribución de los residuales ponderados y ajustados, obtenidos luego de la compensación. El gráfico muestra el comportamiento de los datos observados y de los esperados para la aplicación del Test de Bondad de Ajuste Chi-Cuadrado, mediante el cual se determinó la aceptación de la hipótesis H_0 : los datos tienen Distribución Normal.

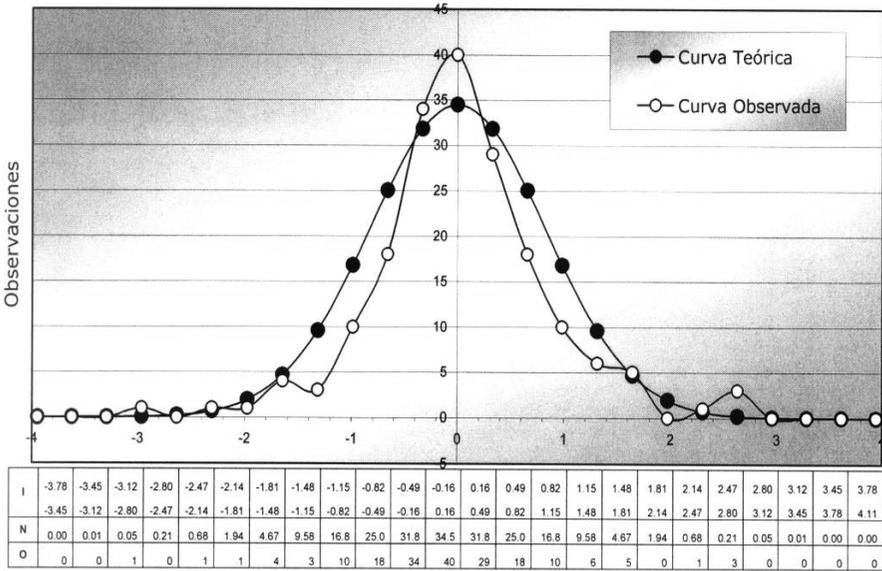


Figura 6. Residuales, Ponderados y Ajustados.
I : Límites inferior y superior del intervalo
N: Valor de la Curva Normal
O: Número de observaciones dentro del intervalo

Valores de Gravedad Ajustados

La Tabla 3 muestra los valores ajustados de gravedad de todas las estaciones medidas, junto con los errores estimados de cada una. Se muestran también las estaciones que se tomaron como fijas en el ajuste.

Valores de constantes de calibración ajustados

La Tabla 4 muestra los valores iniciales y ajustados de las constantes de calibración de los cuatro gravímetros utilizados en las mediciones. También se muestran los errores estimados de cada constante, obtenidos del ajuste.

Ningún valor de constante de calibración se tomó como fijo.

Los siguientes valores corresponden al procesamiento de todas las observaciones.

Tabla 3
Valores de Gravedad Ajustados

<i>ID</i> <i>Estación</i>	<i>Nombre de</i> <i>Estación</i>	<i>Valor de</i> <i>Gravedad</i> <i>Ajustado</i> <i>[mgal]</i>	<i>Error</i> <i>Estimado</i> <i>[mgal]</i>
910099	Estación Absoluta Tandil	979904.360	Fijo
910199	Estación de Mareas Tandil	979904.337	0.010
910299	Nodal 77 Tandil	979900.324	0.017
910399	Base Aérea Tandil	979910.477	0.017
920099	Estación Absoluta San Lorenzo	978409.410	Fijo
920199	Excentro Asoluto San Lorenzo	978409.607	0.014
920299	Aeropuerto Salta	978483.903	0.017
920399	Iglesia San Francisco Salta	978521.460	0.015
930099	Estación Absoluta San Juan	979141.649	Fijo
930199	Estación de Mareas San Juan	979141.634	0.010
930299	Excentro Absoluto San Juan	979142.310	0.017
930399	Aeropuerto San Juan	979184.964	0.019
930499	Catedral San Juan	979169.929	0.017
940099	Estación Absoluta Miguelete Buenos Aires	979690.069	Fijo
940299	Iglesia Nuestra Señora de Luján Buenos Aires	979688.322	0.010
940399	Excentro IGM Buenos Aires	979687.875	0.014
950099	Estación Absoluta Comodoro Rivadavia	980663.757	Fijo
950199	Aeropuerto General Mosconi Comodoro Rivadavia	980648.053	0.013
950299	Monumento a Belgrano Comodoro Rivadavia	980668.419	0.013

Tabla 4
Observaciones Procesadas

<i>ID</i> <i>Instrumento</i>	<i>Constante de</i> <i>calibración inicial</i>	<i>Constante de</i> <i>calibración ajustada</i>	<i>Error</i> <i>estándar</i>
G013	1.000380	1.000522	0.000073
G043	1.000380	1.000296	0.000055
G057	1.000380	1.000776	0.000129
G673	1.000500	1.000727	0.000123

Conclusiones

El presente trabajo ha mostrado la eficacia de la metodología propuesta para el establecimiento de una línea de calibración gravimétrica para la República Argenti-

na (LICAGRA) constituida a partir de la medida y el procesado de 19 estaciones de gravedad, de las cuales 5 son estaciones base de gravedad absoluta y 14 estaciones excentros locales (Figura 2).

Después del ajuste y compensación de los datos resulta un error medio estimado del valor de la gravedad absoluta de 0,015 mGal, con un error máximo de 0,019 mGal para la base situada en el aeropuerto de San Juan y un error mínimo de 0,010 mGal para dos bases, la situada en la iglesia de Nuestra Señora de Luján en Buenos Aires y la de emplazada en la estación de mareas de San Juan.

La extensión de líneas de calibración y ajuste de las redes de base gravimétrica permitirán en un próximo futuro dotar a la República Argentina de una infraestructura de nivel a disposición de proyectos, tanto de Metrología que requieran un preciso conocimiento de esta variable como en el ámbito de las Ciencias de la Tierra.

Referencias

- GRAVPAK, 1999. "Process Network Observations and Adjust of Gravity Network", GRAVICO Geoscience Inc. Ottawa, Canada.
- Guallart J.E., Lauría E.A. y Ramos R., 1999. "La actividad gravimétrica del Instituto Geográfico Militar", *Revista Cartográfica* del Instituto Panamericano de Geografía e Historia, enero-junio 1999, 13 pp.
- Mazzini, V.L., 1969. Procesamiento de una extensa Red Gravimétrica Argentina-Geoacta V Reunión Científica Córdoba, Argentina, 1969.
- Nakagawa I., Nakai S., Shichi R., Tajima H., Izutuya S., Kono Y., Higashi T., Fujimoto H., Murakami M., Tajima K. y Funaki M., 1985. On the sensitivity characteristics of Lacoste & Romberg gravimeter (Model G.). *Bulletin Geodesique*, 59(1):55-67.
- Tsubokawa T. y Nakai S., 1982. Data processing system for Lacoste and Romberg gravimeter. *Journal of the Geodetic Society of Japan*, 28(3):121-133.