

Este artículo aparecerá publicado en el Anuario Astronómico del Observatorio de Madrid para el año 2005.

MEDIDAS GRAVIMÉTRICAS EN MADRID Y EN ESPAÑA

Enrique Rodríguez Pujol

Instituto Geográfico Nacional

Abstract

In 2002 we celebrated the 120th anniversary of the first absolute gravity measurements in Spain. The first network was observed by Mr. Joaquín María Barraquer y Rovira among others, being the first and fundamental station observed in the Astronomical Observatory of Madrid, placed in Parque del Retiro. We also celebrated the centenary of the first relative gravity measurements and, for this reason, a retrospect is presented in this paper. Remembering those measurements, in May 2001 absolute measurements with the FG5#211 absolute gravimeter were performed again in the Astronomical Observatory, as the first station of a new zero order absolute gravity network for Spain.

Resumen

Con motivo del 120 aniversario de las medidas gravimétricas absolutas del insigne ingeniero geógrafo Sr. D. Joaquín María Barraquer y Rovira en la biblioteca del Observatorio Astronómico de Madrid sito en el parque del Retiro y del centenario del proyecto de las observaciones gravimétricas relativas, se muestra en este trabajo una retrospectiva de las medidas gravimétricas en España. Recordando esas medidas, en Mayo de 2001 se realizaron de nuevo medidas en el Observatorio Astronómico de Madrid con el gravímetro absoluto FG5#211, siendo las primeras de una nueva red absoluta de gravedad de orden cero para España.

Introducción

Denominamos atracción gravitatoria a la propiedad de atracción entre los cuerpos en virtud de su masa que tiene el universo en que vivimos. Es una de las cuatro fuerzas conocidas en la Física de nuestro Universo: electromagnética, gravitatoria, nuclear fuerte y nuclear débil (ver Tabla 1). La fuerza de atracción gravitatoria, regida por la Ley de Newton de

Gravitación Universal, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre los cuerpos considerados:

$$F = \frac{G m_1 m_2}{r^2}$$

siendo $G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$.

Tabla 1. Ámbito de aplicación de la gravedad y fuerzas existentes en el Universo

Nombre	gravitación	electromagnética	fuerza nuclear débil	fuerza nuclear fuerte
Actúa en	mundo macroscópico; todas las partículas	partículas con carga eléctrica	todas las partículas excepto las gamma	quarks y gluones
Cuanto o partículas de intercambio	partícula postulada: gravitón	fotón, gamma	bosones débiles (W y Z)	gluones
Signo	atracción	atractivo o repulsivo	no se aplica	atractivo total, pero con coraza de repulsión
Alcance	largo (r^{-2})	largo (r^{-2})	$< 10^{-17} \text{ m}$	10^{-15} m
Fuerza	10^{-40}	10^{-2}	10^{-12}	1
<i>Ejemplos:</i>				
Sistemas estables	sistema solar	átomos, rocas	ninguno	hadrones, núcleos
Reacción inducida por la fuerza	caída de cuerpos	reacciones químicas	desintegración beta de los neutrones	reacciones nucleares

Adaptado de: Enciclopedia Británica.

La gravedad en un punto de la superficie de la Tierra es la fuerza resultante de la atracción gravitatoria de la Tierra y de la fuerza centrífuga, resultado del movimiento de rotación de la Tierra alrededor de su eje. Supuesta la Tierra esférica y de radio R , la fuerza centrífuga, $\omega^2 R^2 \sin^2 \phi$, es función de la latitud ϕ y de su velocidad angular de rotación ω .

Las variaciones principales de la gravedad se deben a la latitud, la altitud y al tiempo. La gravedad, g , varía de $9,78 \text{ m s}^{-2}$ (en el ecuador) a $9,83 \text{ m s}^{-2}$ (en los polos), en primera aproximación. La unidad del Sistema Internacional para la aceleración de la gravedad es m s^{-2} , y su notación es una g minúscula (Bomford 1972). Tradicionalmente g ha sido medida

en Gal y mGal (miliGal), siendo $1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{-2}$. El μGal (microGal) indica un nivel de precisión de 1 parte en 10^9 , y es equivalente a $\approx 10^{-8} \text{ m s}^{-2}$. La palabra Gal se deriva del nombre del astrónomo y físico Galileo (1564–1642), pero no es una abreviatura.

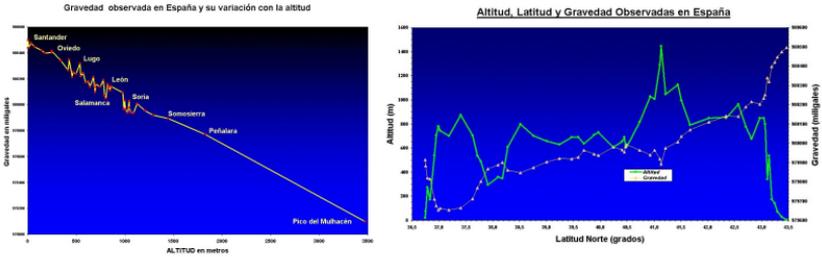


Figura 1: Variaciones de la gravedad en España.

La aceleración de la gravedad es medida en la superficie terrestre, en la superficie del mar, en el aire, en los satélites, en incluso mediante sondas espaciales en los planetas, con una instrumentación específica. Además de g , también se pueden determinar las componentes del tensor gradiente de la gravedad, o variaciones espaciales de la gravedad en distintas direcciones. También han adquirido importancia las variaciones temporales de la gravedad a medida que los instrumentos han superado determinados umbrales de precisión. Es el caso de las mareas terrestres y otras variaciones inducidas por efectos de la dinámica terrestre y del Sistema Solar.

Muchas determinaciones experimentales desde Galileo hasta la actualidad se han realizado con diversos instrumentos basados en diferentes principios. El desarrollo que tuvo lugar a finales del s. XIX y principios del s. XX, con los métodos pendulares, se englobó dentro de las actuaciones de la Asociación Internacional de Geodesia. Sin embargo, es el método de caída libre (el primero en utilizarse) el que proporciona actualmente las máximas exactitudes y precisiones.

Primeros instrumentos

Las primeras medidas gravimétricas de cierta precisión en el mundo fueron las realizadas por Plantamour en el año 1864 en Suiza y por otros astrónomos en Rusia, Alemania y Austria con aparatos de péndulo de Bessel de inversión construidos por los Sres. Repsold (Repsold & Söhne) en Hamburgo. Sin embargo, como escribe D. Guillermo Sans Huelin, “largo es el historial de los trabajos gravimétricos realizados por los españoles, cabiendo a la Marina la honra de ser la iniciadora de estas

investigaciones. Los primeros trabajos de esta índole los efectuaron Jorge Juan y Antonio de Ulloa, que determinaron la intensidad de la gravedad en varios puntos, entre ellos Quito.”

Escribe Sans que en las postrimerías de dicha centuria tuvo lugar el famoso viaje de circunnavegación de las corbetas españolas *Descubierta* y *Atrevida*, al mando de los capitanes de fragata D. Alejandro Malaspina y D. José Bustamante, que efectuaron notables observaciones de gravedad en ocho lugares del hemisferio ártico y siete del antártico. Fueron los primeros, citados por orden de latitudes crecientes: Zamboaga, Macao, Islas Ladrones, Manila, Acapulco, Monte-Rey, Nutka y Mulgrave; y los del hemisferio Sur: Magdalena (en Lima), Vavao (islas de los Amigos), Puerto Jackson, Montevideo, Talcahuano, Santa Elena y Puerto Egmont, en la Islas Malvinas.

“Estas experiencias –escribe Sans Huelín– se efectuaron con péndulo invariable formado por una lenteja de cobre pendiente de una barra de madera cortada en el sentido longitudinal, según la fibra. La barra terminaba en el extremo superior por una pieza de metal cónica, donde encajaba una lámina de acero que suspendía el péndulo por medio de un eje que la atravesaba. El péndulo se instalaba dentro de una caja que permanecía cerrada durante la observación, percibiéndose sus oscilaciones a través de una abertura cubierta por un cristal.”

“Las experiencias se hacían por tres observadores: dos atentos a las oscilaciones del péndulo y el tercero que anotaba las indicaciones del cronómetro. Complemento indispensable era la caseta astronómica en que se instalaba el aparato para la observación de las alturas correspondientes de astros, que permitían calcular los estados del cronómetro. Se completaba la investigación con la lectura del termómetro y el barómetro al principio y al final y con la de la amplitud del arco descrito por el péndulo en sus oscilaciones.”

“Estas observaciones de gravedad fueron calculadas posteriormente por D. Gabriel Ciscar, y en su opinión formaban una colección suficiente por sí sola para determinar con bastante aproximación el aplastamiento terrestre. Aunque este juicio resulte hoy día algo exagerado, cabe afirmar con el ilustre hidrógrafo de aquella época, Fernández Navarrete, que el viaje de Malaspina fue el más brillante testimonio que a fines del siglo XVIII dió España del laudable interés que tomaba en aumentar los conocimientos de la ciencia de nuestro Globo.”

“En el primer año del siglo XIX –escribe Sans Huelin– determinó D. Gabriel Ciscar la gravedad en Madrid, valiéndose de cuatro péndulos.” Esta es al parecer, la primera medida de la intensidad de la gravedad que tenemos en Madrid. De ella solamente nos quedan dos referencias, ya que de la memoria de los cálculos que fueron efectuados en Cartagena no queda rastro alguno. Dicho valor, cuya última cifra significativa es el miligal (que corresponde a una incertidumbre de aproximadamente 3 metros en altura),

no tiene una acotación del error cometido (ver tabla 2).

Tabla 2. Algunos valores de la gravedad determinados en Madrid

Observador	Lugar	Año	Gravedad	Error	Comentario
Císcar	Madrid	1801	980,45	–	absolutas
Barraquer	c/ Jorge Juan 8	1877	980,180	$\pm 0,0027$	absolutas
Barraquer	Observatorio	1882–83	980,156	$\pm 0,0016$	absolutas
Hecker	Observatorio	1901	979,99	–	relativas
					Potsdam 981,292
Hecker y Galbis	Madrid I	1903	979,999	–	relativas
Galbis	Madrid II	1905	979,999	–	Potsdam 981,292
					relativas
Hecker	Observatorio	1901	979,981	$\pm 0,002$	Potsdam 981,292
					relativas
Sans	S. Gravimetría	1926-28	979,983	$\pm 0,002$	Potsdam 981,274
Sans	IGN	1934	979,972	$\pm 0,009$	relativas
					relativas

Primeras determinaciones absolutas

El primer sistema de referencia gravimétrico fue la compensación realizada por Helmert y observada por Sterneck en 1884, que tuvo como punto fundamental el Instituto Geográfico Militar de Viena. Este valor fue obtenido por comparación entre dos determinaciones absolutas hechas por Oppolzer en 1884 en el Observatorio de Viena y en 1877 por von Orff en Munich. Borrass realizó una compensación conjunta de las 19 principales estaciones de referencia situadas en todo el globo en 1909. Esta compensación fue referida al punto de la Sala de Péndulos del Instituto Geodésico de Potsdam y se obtuvo para Viena el valor $g = 980,860$ Gal, lo cual permite relacionar los sistemas de referencia gravimétricos de Viena y de Potsdam con la corrección:

$$980,860 - 980,876 = -0,016 \text{ Gal.}$$

Los primeros trabajos realizados en España reconocidos por la IAG (Asociación Geodésica Internacional) son los de D. Joaquín María Barraquer y Rovira. El péndulo de Repsold, anterior al de Defforges y fabricado por primera vez en 1866, fue utilizado para un gran número de determinaciones absolutas en Alemania (Albrecht, Borrass), en Austria (Oppolzer) y en España (Barraquer). De carácter preliminar y hechas con el único péndulo de inversión de Repsold que poseía el Instituto Geográfico y Estadístico, fundado en 1870, el Sr. Barraquer realizó medidas en los antiguos locales del Instituto en la calle Jorge Juan número 8 de Madrid durante el año 1877. A éstas siguieron las realizadas en la biblioteca del Observatorio

Astronómico de Madrid en los años 1882 y 1883, empleando para ello esta vez dos aparatos de péndulo de Bessel fabricados por Repsold, uno grande y otro pequeño. La determinación de la longitud del péndulo matemático fue certificada por el BIPM (Oficina Internacional de Pesas y Medidas) de Sévres, París. Obtiene el primer valor absoluto de la gravedad en Madrid con una incertidumbre de 1,6 mGal (ver Tabla 2).

Ocho años después reciben el encargo de la Dirección General D. Antonio los Arcos y D. Príamo Cebrián de continuar las medidas absolutas. Eligen Pamplona (octubre de 1892) por estar en la ruta de París, donde debían dirigirse, La Coruña (agosto y septiembre de 1893) y Barcelona (noviembre y diciembre de 1893); sólo por D. Antonio los Arcos en el Observatorio Astronómico de San Fernando (octubre y diciembre de 1894), D. Rafael Aparici Puig y D. Arturo Mifsut Macón en Valencia (otoño de 1895), D. Eduardo Escribano en Granada (1897) y finalmente D. Príamo Cebrián y D. Felipe de la Rica en Valladolid (1901). Estando proyectadas inicialmente las estaciones absolutas de Badajoz y de Formentera, no se tienen datos de que estas estaciones fueran observadas ni calculadas. Sin embargo, en el informe de E. Borrass de 1909 sí existe otra determinación relativa de la gravedad en España. La estación de Vigo (La Guía) fue observada D. Antonio los Arcos en el año 1893.

Tabla 3. Gravedad absoluta en España determinada por el método pendular

Lugar	Año	Gravedad m s ⁻²	Error m s ⁻²
OAN	1882	9,800156	0,000016
IGC	1877	9,800180	0,000027
La Coruña	1893	9,805497	0,000059
Pamplona	1892	9,803365	0,000041
Barcelona	1893	9,803262	0,000050
Valencia	1895	9,801050	0,000072
San Fernando	1894	9,799473	0,000038
Granada	1897	9,796933	0,000052

Determinaciones relativas

La estación de referencia fundamental española de gravedad, anterior a las actuales observaciones, está en la biblioteca del Observatorio Astronómico Nacional de Madrid, sita en el Parque del Retiro. Fue ligada dos veces con Potsdam, estación fundamental para la red mundial de estaciones de gravedad. La primera en 1901 por el observador Dr. Oscar Hecker del Instituto Geodésico de Prusia, con un aparato de Sterneck de cuatro péndulos de dicha institución. Fue con motivo del viaje de observaciones por el

Atlántico (Río de Janeiro, Lisboa y Madrid). La segunda vez en 1903 con el aparato de péndulos español del Instituto Geográfico, como se explica más adelante. El profesor Borrass, que fue informador de Gravimetría en la antigua Asociación Geodésica Internacional, sólo tuvo en cuenta el primer enlace de 1901, obteniendo para Madrid, en el sistema de Potsdam el valor $g = 979,981 \pm 0,002$ Gal.

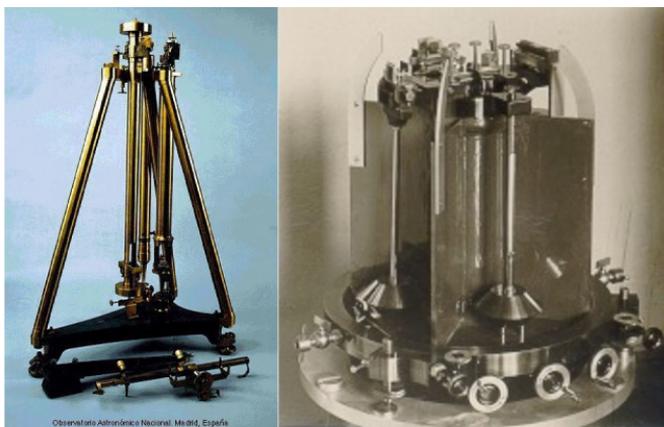


Figura 2: Péndulo de absolutas de Repsold (colección del OAN) y péndulo de relativas de Von Sterneck.

A fines de 1901 el Director Gral. del Instituto Geográfico y Estadístico encargó a D. José Galbis y al ingeniero geógrafo D. Bernabé Estrada que estudiaran los métodos adoptados en otros países para la determinación relativa de la gravedad. Entregaron una Memoria el 24 de diciembre de 1901, que tenía más carácter histórico que didáctico, y posteriormente se adquirió el aparato de von Sterneck.

Las medidas relativas pendulares se extendieron hasta 1942, completando una red de estaciones gravimétricas por toda España (alrededor de 200), que permitieron el cálculo de los primeros mapas de España de anomalías de la gravedad de aire libre y de Bouguer. También fueron realizadas medidas del gradiente de la gravedad con la balanza de torsión de Eötvös, adquirida por el IGN en 1923, a partir de 1924.

Gravedad absoluta corregida del Observatorio Astronómico de Madrid

La gravedad obtenida por Barraquer y reseñada tanto en la placa del observatorio como en las Memorias del IGN puede ser refinada de acuerdo a correcciones posteriores de F. Helmert. Antes de obtener el valor final

corregido de la estación absoluta del OAN, hemos de hacer un breve comentario sobre el origen de esta corrección.

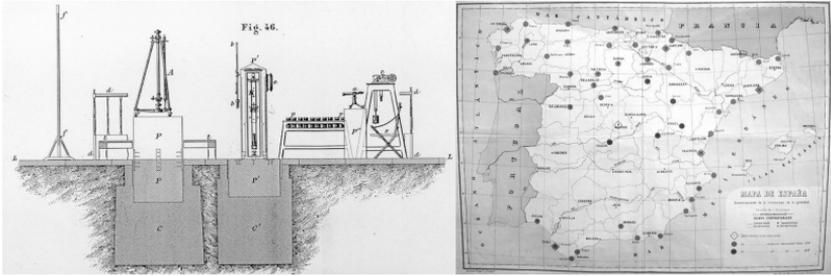


Figura 3: Observaciones absolutas realizadas con el péndulo de Repsold (1882).

Según refiere D. Manuel de Barandica y Ampuero, en 1894, el director del Instituto Geodésico Prusiano de Potsdam, profesor Dr. Helmert, efectuó algunas pruebas de tanteo para la investigación absoluta de la intensidad de la gravedad en el nuevo edificio construido en aquella época para instituto geodésico.

En dichas pruebas encontró una diferencia entre los datos obtenidos por un péndulo de segundos y otro de medios segundos de peso igual. A consecuencia de ésto se vió que la causa de la diferencia consistía en la flexión del péndulo en su movimiento oscilatorio, de la cual provenía una causa de error no prevista hasta entonces. El profesor Helmert comisionó a Kühnen y Furtwängler para que teniendo en cuenta esta corrección y haciendo todas las observaciones, procediesen a la determinación del nuevo valor correspondiente a Potsdam, diferente del valor $g = 981,292$ Gal en aquel momento vigente. Estas medidas fueron realizadas por Kühnen y Furtwängler entre 1898 y 1904 (Kühnen y Furtwängler 1906). Esta corrección por flexión es la que llevó al valor del sistema de Potsdam $g = 981,292$ Gal, a ser corregido al nuevo valor adoptado oficialmente a partir de la Conferencia General de la Asociación Geodésica Internacional de 1909 (Londres-Cambridge), $g_{\text{Potsdam}} = 981,274 \pm 0,003$ Gal.

En la memoria citada, se hace un estudio comparativo del nuevo valor de g en Potsdam con los que para la misma población resultarían de las determinaciones de la misma clase hechas en diversos sitios, fechas diferentes y observadores distintos y que refiere el Sr. Barandica tanto por su interés intrínseco, como por su resultado final en favor de la Ciencia Española de la época.

El valor de la intensidad de la gravedad observada y calculada por D. Joaquín Barraquer y Rovira en Madrid, corregido por la flexión, más la diferencia observada por el Dr. Hecker entre Madrid y Potsdam, da

por resultado un valor que solamente difiere del obtenido por Kühnen y Furtwängler en 0,004 Gal, el mejor de toda la comparación.

Volviendo a las determinaciones absolutas de la gravedad en Madrid del Sr. Barraquer, la corrección por flexión descubierta 12 años después de realizada la medida (referida anteriormente) no fue considerada por el insigne geodesta por desconocida, según refiere D. Manuel de Barandica y Ampuero.

Con el valor de Potsdam a partir de Madrid (con el valor de Barraquer corregido de flexión más la diferencia obtenida por el Sr. Hecker en 1901 entre Madrid y Potsdam) podemos deducir la corrección de flexión (que algunos autores como Inglada citan de 0,039 Gal):

$$\begin{aligned} g_{\text{Potsdam Barraquer}} &= g_{\text{Madrid Barraquer}} + \delta g_{\text{Madrid-Potsdam Hecker}} \\ &= 980,0156 + 1,293 = 981,3086 \text{ Gal} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{\text{flexion}} &= g_{\text{Potsdam Barraquer}} - g_{\text{Potsdam Kuehnen}} = 981,3086 - 981,270 \\ &= 0,0386 \text{ Gal} \simeq 0,039 \text{ Gal (segun Inglada)}. \end{aligned}$$

Por tanto, el valor del Observatorio Astronómico de Madrid de D. J. Barraquer y Rovira corregido de flexión será:

$$g_{\text{Barraquer}} = 980,0156 - 0,0386 = 979,977 \pm 0,0016 \text{ Gal.}$$

También cambiaron los valores obtenidos en las campañas anteriores a 1906. Y sobre todo el valor de la gravedad del Observatorio Astronómico de Madrid, referido a Potsdam, que fue tomado como referencia de aquí en adelante para todas las campañas realizadas en España. A partir del nuevo valor de Potsdam $g_{\text{Potsdam}} = 981,274 \pm 0,003$ Gal obtenemos el valor que el profesor Borrass dió para Madrid:

$$\begin{aligned} g_{\text{Madrid nuevo}} &= g_{\text{Potsdam nuevo}} + \delta g_{\text{Madrid-Potsdam Hecker}} = 981,274 - 1,293 \\ &= 979,981 \text{ Gal.} \end{aligned}$$

Por unificación de la red internacional, bajo recomendación de la Asociación Geodésica Internacional, siempre se consideraron las determinaciones relativas con relación al Sistema de Referencia de Potsdam y no las absolutas de Barraquer como valor de referencia para las campañas de relativas observadas en España hasta el año 1942.

Con motivo de la Asamblea General de Geodesia y Geofísica del año 1924 celebrada en Madrid se construyó un Pabellón de Geofísica en el Observatorio Meteorológico del Parque del Retiro. En el sótano de este edificio existen tres salas: una de Gravimetría, otra para comparadores, y otra de Sismología. En los años 1926, 1927 y 1928 se ligó la sala de gravimetría con el Observatorio Astronómico mediante los péndulos de

relativas de Sterneck del Instituto Geográfico. El resultado de este triple enlace relativo promediado tuvo como resultado el valor:

$$g = 979,983 \pm 0,002 \text{ Gal.}$$

Este punto se utilizó como estación auxiliar de referencia en los años posteriores a partir de 1929, hasta que se transportó el valor de la gravedad a las nuevas y actuales instalaciones del Instituto Geográfico.

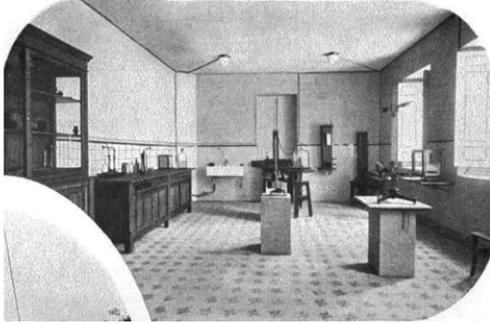


Figura 4: Sala de Gravimetría del Observatorio Meteorológico del Retiro.

Medidas de la gravedad entre 1960 y 1989

Las medidas sobre la superficie de la Tierra son reducidas a una superficie llamada geode, materializada por la superficie de los océanos en calma y en ausencia de mareas, y se comparan con los valores calculados de gravedad normal en un elipsoide de referencia determinado. Las diferencias entre el campo normal y el campo real observado y reducido son pequeñas y se pueden considerar lineales (Heiskanen, 1985). Son las denominadas anomalías de la gravedad. A lo largo de la historia son muchos los elipsoides y fórmulas de gravedad normal determinados. En 1930 se acepta la fórmula de Cassini para la gravedad teórica para, en unión del elipsoide internacional (Hayford 1924), constituir el sistema geodésico de referencia europeo:

$$\gamma_{1930} = 978\,049,0 (1 + 0,005\,2884 \text{ sen}^2\phi - 0,000\,0059 \text{ sen}^22\phi) \text{ mGal}$$

de donde se deducen:

$$\begin{aligned} \text{Gravedad teórica ecuatorial } (\phi = 0^\circ) & \quad \gamma_E = 978\,049,0 \text{ mGal} \\ \text{Gravedad teórica normal } (\phi = 45^\circ) & \quad \gamma_0 \equiv \gamma_{45} = 980\,629,5 \text{ mGal.} \end{aligned}$$

En un punto de la Tierra, la *anomalía de la gravedad* será la diferencia entre la gravedad teórica para su latitud y la gravedad observada.

Hacia 1950, se deduce que el valor de la gravedad absoluta en Potsdam aceptado en 1904 es erróneo en -14 mGal pasando a ser $g = 981\,260,0$ mGal, debido a las nuevas comprobaciones experimentales absolutas realizadas por Cook (1950). El desarrollo de los nuevos gravímetros de muelle (Askania, Worden, y sobre todo Lacoste & Romberg) permiten una densificación mundial suficiente como para establecer una red mundial. En 1967 se adopta el sistema de referencia 1967:

$$\gamma_{1967} = 978\,031,85 (1 + 0,005\,278\,895 \sin^2\phi + 0,000\,023\,642 \sin^4\phi) \text{ mGal}$$

Gravedad teórica ecuatorial ($\phi = 0^\circ$) $\gamma_E = 978\,031,85$ mGal

Gravedad teórica normal ($\phi = 45^\circ$) $\gamma_0 \equiv \gamma_{45} = 980\,619,0943$ mGal.

Hacia 1971, se aprueba la International Gravity Standardization Net 1971 (IGSN71), en la que se acepta la modificación ya reseñada de la gravedad absoluta en Potsdam, que pasa a ser $g = 981\,260,0$ mGal.

Está constituida por una red de estaciones fundamentales en todo el mundo formada por: 10 estaciones absolutas, 1200 mediciones de péndulo, 12.000 mediciones de gravímetros Lacoste-Romberg, 11.700 mediciones excéntricas. Se obtienen 24.974 relaciones de observación y se deducen 1854 valores de la gravedad, 96 valores de escala de gravímetros, 26 derivas de 26 instrumentos. De estas estaciones fundamentales corresponden a España:

1. 10966 ROTA K y P
2. 14492 MALLORCA J y K
3. 14503 MADRID A(OAN), B(OAN), C (IGN),J,K,L,M,N
4. 18012 BARCELONA J, L

En Marruecos:

1. 10909 AGADIR J,K
2. 10918 MARRAKECH J
3. 10937 CASABLANCA B,J
4. 10955 TANGER B,J,K

Las estaciones A y B se encuentran en el OAN de Madrid debajo de la cúpula central y en la biblioteca, respectivamente. A partir de ese momento, se adopta en España IGSN 71 y el valor de la gravedad del SR 1967.

En 1975 se establece en España la RED GRAVIMÉTRICA FUNDAMENTAL ESPAÑOLA 1973 (RGFE 73), constituida por 101 estaciones

observadas con 4 gravímetros Lacoste-Romberg y que se calcula apoyada en 3 estaciones fijas de IGSN 71: BARCELONA J, MADRID C (IGN, $g = 979955,61 \pm 0,21$ mGal), LISBOA A. Se establece línea de calibración gravimétrica española 1975 (LCGE-75), que comprende las estaciones RGFE 73:

1. SANTANDER B
2. BURGOS B
3. ARANDA B
4. MADRID C
5. MANZANARES B
6. BAILEN B
7. GRANADA B
8. MÁLAGA B

Y otras 45 estaciones más deducidas a partir de éstas. En Alonso (1975) se reseñan todas las estaciones que componen RGFE 73 con sus altitudes y gravedad, las estaciones de la red gravimétrica portuguesa RGFE 73 y la relación de las Bases Principales de la Línea de Calibración Santander-Málaga (LCGE-75).

En el año 1980 se aprueba el Geodetic Reference System 1980 (GRS80): ($\phi = 0^\circ$) $\gamma_E = 978032,67715$ mGal

Aunque todavía se siguen utilizando las anomalías calculadas con relación a GRS67 sobre la que está basada IGSN71, los últimos mapas de anomalías han sido calculados en el sistema de Referencia GRS80 (Mézcuá et al. 1996).

La Red IGSN71 (Morelli 1974) ha proporcionado valores de gravedad con errores medios de alrededor de 0,025 mGal en los mejores lugares, y esta red junto con su densificación española RGFE73 continúa utilizándose en la actualidad.

Medidas absolutas actuales de la gravedad

El desarrollo de los gravímetros de caída libre en las dos últimas décadas del siglo XX han permitido de nuevo medidas absolutas de la aceleración de la gravedad, esta vez con precisiones cercanas a 10^{-8} m s⁻². Entre 1989-97, Mäkinen y Vieira (2002) con el JILAG-5 observaron en el Valle de los Caídos. Gracias a P. de Maria, I. Marson, G. Cerutti (1992,1995) del Instituto de Metrología Colonetti (IMGC), las estaciones observadas fueron en Barcelona (Observatorio Astronómico de Fabra, 1995), Centro Español de Metrología en Tres Cantos (Madrid) y Observatorio Geofísico de Las Mesas en Tenerife (Islas Canarias). Gracias al BKG, mediante los proyectos SELF I y II, algunas estaciones fueron observadas e incluso repetidas: Valle de los Caídos (FGI); Tarifa, Ceuta, Alicante, San Fernando,

Granada (Wilmes and Falk, 2003 ,BKG). Todas están resumidas en el apéndice A.

El FG5 es una nueva generación de gravímetros absolutos basados en tecnología desarrollada en los últimos treinta años por el Dr. James Faller del Instituto Nacional de Tecnología y Patrones de EEUU (NIST) y sus colegas. Comenzando con un sistema interferométrico de interferencias de luz blanca construido en 1962, los predecesores del FG5 fueron los seis gravímetros de la serie JILA construidos en 1985, con el apoyo de otras instituciones (NIST, DMA, NOAA, GSC, FGI, Universidad de Hannover y de Viena).

El FG5#211 es un gravímetro de absolutas que utiliza la técnica de medida de caída libre. Una esquina de prisma cúbico cae en una cámara en donde se ha hecho el vacío. Utiliza un interferómetro en línea de Mach-Zender, que lo diferencia de los interferómetros Michelson de antiguos diseños JILA, proporcionando una mayor estabilidad en las medidas. El FG5 emplea un sismómetro de período 60 s denominado “SuperSpring” que aísla las medidas de las vibraciones de alta frecuencia del suelo. La utilización de un estándar en longitud como es el láser de HeNe estabilizado en frecuencia (precisión en frecuencia absoluta de 1 parte en 10^{10}), y en tiempo, un reloj atómico de rubidio (incertidumbre de 5 partes en 10^{11}), hace que los resultados obtenidos con él alcancen las mejores precisiones obtenidas hasta el momento, con una repetibilidad instrumental individual de una medida de $1,1 \mu\text{Gal}$ (Niebauer et al., 1995). El valor de gravedad así obtenido está exento de correcciones de deriva o procedimientos de trabajo que se utilizan con los instrumentos relativos. Es un equipo construido para ser transportado con un peso aproximado de 240 kg repartidos en ocho cajas.

Una caída consiste en un conjunto de pares tiempo-posición (t_i, x_i) del grave o masa test en caída libre en vacío. La gravedad observada de cada caída se referencia a la posición al comienzo de la caída. Esto se realiza ajustando, por mínimos cuadrados en cada caída i , la gravedad a una trayectoria parabólica modificada con términos cúbicos y de cuarto orden en el tiempo:

$$x(t_i) = x_0 + v_0 (t_i + \frac{\gamma}{6} t_i^3) + \frac{g_0}{2} (t_i^2 + \frac{\gamma}{12} t_i^4)$$

donde g es el gradiente observado en el punto; en $t = 0$, x_0 es la posición inicial, g_0 es la aceleración inicial y v_0 es la velocidad inicial. Si queremos errores relativos no mayores de 10^{-9} , la distancia de 0,5 m y tiempos de caída de 0,3 s nos llevan a requerir exactitudes de $\pm 0,5 \text{ nm}$ y $\pm 0,2 \text{ ns}$.

Antes de las medidas absolutas, el gradiente vertical de la gravedad es medido experimentalmente. Esta medida sirve para obtener el valor de la gravedad así como para reducirlo a nivel del suelo Niebauer (1989, 1995) y Francis & Van Dam (2003). Para ello se emplea un gravímetro

relativo Lacoste Romberg Modelo G con realimentación analógica. Una vez realizada la medida del gradiente, en cada estación se registran al menos 24 horas, del orden de 2400 caídas libres en vacío de una masa de unos 200 gramos. El valor final de gravedad absoluta se corrige de mareas terrestres y carga oceánica, presión barométrica y movimiento polar (Francis & van Dam, 2003).

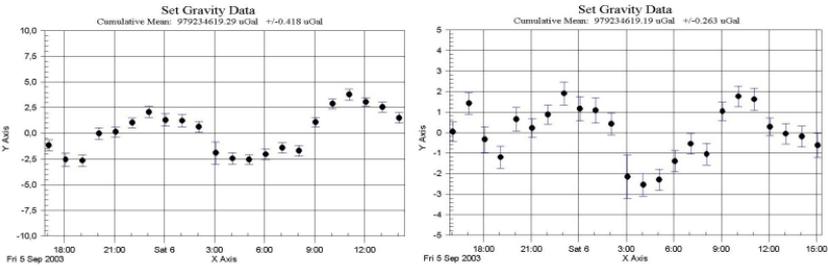


Figura 5: Observatorio IRAM de Pico Veleta (2850 m sobre el nivel del mar): antes y después de la corrección por carga oceánica.

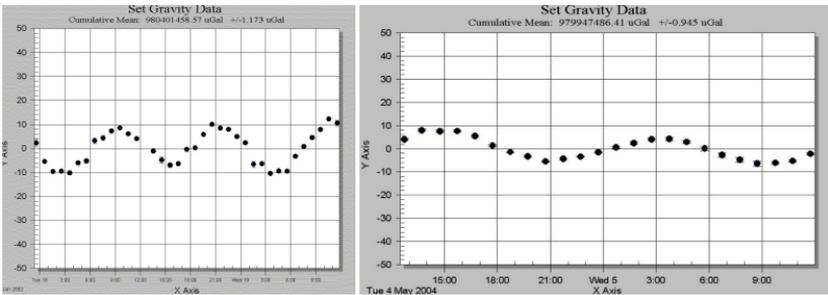


Figura 6: Observaciones en Observatorio Geofísico de Santiago de Compostela y Centro Astronómico de Yebeos (OAN).

Con el FG5#211 se está observando la nueva Red Gravimétrica Absoluta de Orden Cero en España, que estará constituida por al menos 20 estaciones peninsulares y 11 insulares (una en cada isla principal). La primera observación se realizó en un pilar, utilizado por Barraquer para observaciones meteorológicas, en su determinación absoluta mediante dos péndulos Repsold.

Más de 35 lugares han sido ocupados entre mayo de 2001 hasta junio 2004, incluyendo aquellos de las intercomparaciones. Todas las observaciones siguen un protocolo establecido para las intercomparaciones y determinado en los "World Gravity Standards" (Boedecker, 1988). Algunas

estaciones han sido reocupadas, permitiendo de esta manera el comienzo de las series temporales de gravedad absoluta (apéndice C). Todos los resultados han de ser considerados dentro del marco de las intercomparaciones internacionales de gravímetros absolutos y detenidamente vigilados en el futuro para detectar cualquier medida especialmente anómala por cualquier motivo.

En la Península Ibérica los efectos inducidos esperados y observados de gravedad son principalmente diurnos y semidiurnos alcanzando los $11 \mu\text{Gal}$ (Zerbini et al, 1996). Sin embargo, las últimas observaciones absolutas de gravedad muestran un efecto mayor. Por ejemplo en Santiago de Compostela incluso más de $20 \mu\text{Gal}$ pico a pico. En el caso de la corrección por carga oceánica, los modelos son adecuados hasta valores que oscilan entre $\pm 2 - 5 \mu\text{Gal}$. En las estaciones del oeste o incluso en algunas estaciones cercanas a costa, el valor más alto no es suficientemente explicado por el modelo teórico. Por el contrario, en lugares continentales del centro de la Península Ibérica el modelo teórico de carga explica hasta los $2 \mu\text{Gal}$ el efecto de carga oceánica. Un valor significativamente bajo es el observado en el observatorio IRAM de Pico Veleta (Granada), situado en Sierra Nevada junto a la montaña más alta de la Península Ibérica, donde el efecto inducido sobre la aceleración de la gravedad es el más bajo de todas las estaciones observadas hasta el momento (figura 5).



En el Observatorio Astronómico de Madrid existen varios valores: el pilar de Barraquer corregido es $979,977 \pm 0,0016 \text{ Gal}$. El valor dado por la red internacional IGSN71 en el clavo denominado MADRID A, que se encuentra debajo de la cúpula del edificio principal del observatorio (señal de nivelación NP 26), es $979966520 \pm 23 \mu\text{Gal}$. El valor dado por IGSN71 en el clavo denominado MADRID B, que se encuentra junto al pilar donde observó Barraquer, es $979966320 \pm 25 \mu\text{Gal}$. La diferencia con respecto al valor de la placa es aproximadamente $49,3 \text{ mGal}$. Si, como hemos referido anteriormente, se aplica la corrección por flexión de Helmert, la diferencia

baja a 10,7 mGal. El valor obtenido en el pilar de observación absoluta de 2001 es de 979966122,4 μ Gal a la altura de 1,25 metros. Si tenemos en cuenta un gradiente vertical de 3,086 μ Gal/m, entonces el valor a la altura del suelo es 979966508,15 μ Gal. La diferencia con respecto al valor de Barraquer corregido de flexión, corrección posterior encontrada por Helmert, es de aproximadamente 10,5 mGal.

Agradecimientos. Quisiera agradecer a J. L. Caturla y a P. Planesas la ayuda prestada para la realización de este artículo.

Referencias

Alonso, F. (1975). Presentación de la primera edición de los Mapas Gravimétricos de la Península Ibérica. F. Alonso IGC. XVI Asamblea General de la IUGG en Grenoble.

Barraquer y Rovira, J., Cebrián P., los Arcos, A., Galbis J., et al. (1889,1895,1905,1913,1918). Determinación Experimental de la Intensidad de la Gravedad en Madrid. Memorias del Instituto Geográfico y Estadístico, Tomos VIII, X, XI, XII, XIII, XIV. Madrid.

Barandica y Ampuero, M. (1914,1924). Determinación Relativa de la Intensidad de la Fuerza De La Gravedad en Roldán, Cartagena y Torrejón. Memorias del Instituto Geográfico y Estadístico. Tomo XIV, I. Madrid.

Becker, M., S. Zerbini, T. Baker, B. Bürki, J. Galanis, J. Garate, I. Georgiev, H. -G. Kahle, V. Kotzev, V. Lobazov et al. Assessment of height variations by GPS at Mediterranean and Black Sea coast tide gauges from the SELF projects. Global and Planetary Change Vol 34, Iss.1-2,pp. 5-35 (2002).

Boedecker, G. (1988). International Gravity Commission – Working Group II « World Gravity Standards » ; Bull. Inf. Bur. Grav. Int., 1988, 63, 51-57.

Cerutti, G., De Maria (1992). P. Technical Report R358 IMGC. Torino.

De Maria, P., Marson, I. (1995). Technical Report R408 IMGC and Trieste University. Torino July 1995.

De Maria, P., Marson, I. (1995). Technical Report R409 IMGC and Trieste University. Torino.

Francis, O., and Van Dam, T. (2003). Processing of ICAG01. Proceedings of the Workshop IMG-2002 Instrumentation and Metrology in Gravimetry. Luxembourg.

Francis, O. (2004). Results of the International Comparison of Absolute Gravimeters in Walferdange (Luxembourg). Proceedings of GGSM2004. Oporto.

Heiskanen (1985). Geodesia Física. Instituto Geográfico Nacional. Madrid.

Kühnen, F. Furtwängler, PH. (1906). Bestimmung der Absoluten Größe der Schwerkraft zu Potsdam mit Reversionspendeln. In: IAG Conferences. Berlin.

Morelli, C. (1974). The International Gravity Standardization Net 1971 (IGSN71) Network. IAG Publication number 4.

Niebauer T.M. et al (1995): A new generation of absolute gravimeters. *Metrologia*, 1995, 32, 159-180.

Niebauer T.M. et al. (2002). FG5 software manual g. Publication from Microg-solutions Inc.

Niebauer T.M. (1989): The effective measurement height of Free-Fall absolute gravimeters. *Metrologia*, 1989, 26, 115-118.

Sans Huelín, G., Madrid (1921, 1924, 1925, 1927, 1929, 1934,1944). Determinación Relativa de la Intensidad de la Gravedad. Memorias del Instituto Geográfico y Estadístico, Tomo XIV, V.

Sans Huelín, G. (1947). Manual de Gravimetría.

Torge, W. (1989). "Gravimetry". De Gruyter.

Vieira, R., Makinen, J. et al. (2002). Global adjustment for the gravity calibration line Madrid-Valle de los Caídos. *Física de la Tierra*,14,127-159.

Vitushkin L., Becker M., Jiang Z., Francis O., van Dam T.M., Faller J., Chartier J.-M., Amalvict M., Bonvalot S., Debeglia N., Desogus S., Diament M., Dupont F., Falk R., Gabalda G., Gagnon C. G. L., Gattacceca T., Germak A., Hinderer J., Jamet O., Jeffries G., Käker R., Kopaev A., Miard J., Lindau A., Longuevergne L., Luck B., Maderal E.N., Mäkinen J., Meurers B., Mizushima S., Mrlina J., Newell D., Origlia C., Pujol E.R., Reinhold A., Richard Ph., Robinson I.A., Ruess D., Thies S., Van Camp M., Van Ruymbeke M., de Villalta Compagni M.F., Williams S [BIPM, IfG, ECGS, JILA, EOST, IRD, BRGM, IMG C, IPGP, BKG, NRCan, IGN, ENSG] (2002). Results of the Sixth International Comparison of Absolute Gravimeters, ICAG-2001 *Metrologia*, Vol. 39, n°5, 407-424

Zerbini, S., Plag, H., Baker, T., Becker, M., Bürki, B., et al. (1996). Sea level in the Mediterranean: a first step towards separating crustal movements and absolute sea-level variations. *Global and Planetary Change* Vol. 14 1-48.

Apéndice A

Lugar	Fecha	g ($\mu\text{m s}^{-2}$)	σ ($\mu\text{m s}^{-2}$)	h (m)	Gradiente ($\mu\text{Gal/m}$)	Instrum.	Agencia
ROA	1994,20	9798263,393	$\pm 0,036$	1,25	-2,500	FG5#101	BKG
Tarifa	1994,20	9797372,485	$\pm 0,037$	1,25	-2,800	FG5#101	BKG
Ceuta	1994,20	9797550,222	$\pm 0,030$	1,25	-3,420	FG5#101	BKG
ROA	1998,19	9798263,410	$\pm 0,036$	1,25	-2,502	FG5#101	BKG
Tarifa	1998,21	9797372,486	$\pm 0,013$	1,25	-2,796	FG5#101	BKG
Ceuta	1998,20	9797550,211	$\pm 0,011$	1,25	-3,417	FG5#101	BKG
Alicante	1998,23	9800259,207	$\pm 0,014$	1,25	-3,090	FG5#101	BKG
Granada	1998,22	9796365,091	$\pm 0,109$	1,25	-2,930	FG5#101	BKG
VdIC	1998,19	9798849,072	$\pm 0,094$	1,25	-3,123	FG5#101	BKG
CEM	1992,68	9799499,824	$\pm 0,013$	0,93	-	IMGC rise&fall	IMGC
Mesas	1995,46	9793296,180	$\pm 0,020$	0,94	-	IMGC rise&fall	IMGC
Fabra	1995,49	9802255,839	$\pm 0,016$	0,92	-	IMGC rise&fall	IMGC
MveM	1989,35	9799641,268	$\pm 0,010$	0	2,920	JILAG-5	FGI
VdIC	1989,36	9798849,000	$\pm 0,010$	0	3,070	JILAG-5	FGI
MneM	1992,59	9799653,286	$\pm 0,058$	0	-2,710	JILAG-5	FGI
VdIC	1992,58	9798849,035	$\pm 0,043$	0	-3,100	JILAG-5	FGI
VdIC	1994,87	9798849,021	$\pm 0,039$	0	-3,100	JILAG-5	FGI
VdIC	1997,46	9798849,057	$\pm 0,052$	0	-3,100	JILAG-5	FGI
MneM	1994,87	9799653,310	$\pm 0,039$	0	-2,710	JILAG-5	FGI
MneM	1997,45	9799653,253	$\pm 0,046$	0	-2,710	JILAG-5	FGI

Abreviaturas:

ROA: Real Instituto y Observatorio de la Armada, San Fernando (Cádiz).

CEM: Centro Español de Metrología.

MneM: Madrid nuevo edificio Matemáticas.

MveM: Madrid viejo edificio Matemáticas.

VdIC: Valle de los Caidos.

BKG: Bundesamt für Kartographie und Geodesie.

IMGC: Instituto de Metrología G. Colonetti.

FGI: Finish Geodetic Institute.

IGN: Instituto Geográfico Nacional.

ECGS: European Center for Geodynamics and Seismology.

Apéndice B

Lugar	Fecha	g ($\mu\text{m s}^{-2}$)	σ ($\mu\text{m s}^{-2}$)	h (m)	Gradiente ($\mu\text{Gal/m}$)	Instrum.	Agen.
CEM-A	2001,41	9799498,549	$\pm 0,030$	1,31	-2,702	FG5#211	IGN
CEM-Hg	2001,42	9799498,283	$\pm 0,030$	1,3	-2,789	FG5#211	IGN
OAN	2001,44	9799661,224	$\pm 0,017$	1,25	-	FG5#211	IGN
BIPM-B	2001,52	9809280,126	$\pm 0,010$	0,9	-2,815	FG5#211	IGN
BIPM-A	2001,53	9809256,946	$\pm 0,010$	0,9	-2,992	FG5#211	IGN
BIPM-A2	2001,53	9809256,935	$\pm 0,010$	0,9	-2,937	FG5#211	IGN
IGN-A	2001,78	9799553,547	$\pm 0,010$	1,25	-2,857	FG5#211	IGN
Santiago	2002,47	9804014,588	$\pm 0,010$	1,25	-2,442	FG5#211	IGN
Logroño	2002,41	9805353,201	$\pm 0,010$	1,25	-2,848	FG5#211	IGN
Sonseca	2002,39	9799354,945	$\pm 0,010$	1,25	-3,172	FG5#211	IGN
SPAB-A	2002,48	9798963,793	$\pm 0,100$	1,25	-2,494	FG5#211	IGN
Málaga	2002,45	9798997,920	$\pm 0,010$	1,25	-3,515	FG5#211	IGN
IGN-B	2002,05	9799553,524	$\pm 0,030$	1,3	-2,857	FG5#211	IGN
IGN-A	2002,79	9799557,037	$\pm 0,010$	0	-2,857	FG5#211	IGN
SPAB-A	2002,85	9798963,979	$\pm 0,008$	1,25	-2,494	FG5#211	IGN
Miracle	2002,87	9801079,421	$\pm 0,009$	1,25	-2,865	FG5#211	IGN
Fabra	2002,88	9802254,540	$\pm 0,012$	1,25	-4,158	FG5#211	IGN
Ebro	2002,89	9802020,322	$\pm 0,034$	1,25	-2,726	FG5#211	IGN
Puig	2002,9	9801399,781	$\pm 0,012$	1,25	-2,733	FG5#211	IGN
VdlC	2002,93	9798845,150	$\pm 0,012$	1,25	-3,115	FG5#211	IGN
CEM-Hg	2002,95	9799498,420	$\pm 0,030$	1,3	-2,810	FG5#211	IGN
CEM-A	2003,05	9799498,720	$\pm 0,030$	1,31	-2,702	FG5#211	IGN
SPAB-A	2003,27	9798963,793	$\pm 0,013$	1,25	-2,494	FG5#216	ECGS
SPAB-A	2003,27	9798963,746	$\pm 0,011$	1,25	-2,494	FG5#211	IGN
Jaén	2003,47	9797430,390	$\pm 0,011$	1,25	-3,368	FG5#211	IGN
Almería	2003,45	9798912,478	$\pm 0,011$	1,25	-2,546	FG5#211	IGN
Veleta	2003,68	9792346,192	$\pm 0,014$	1,25	-3,869	FG5#211	IGN
IGN-A	2003,89	9799557,155	$\pm 0,013$	0	-2,857	FG5#211	IGN
WL-B4	2003,84	9809640,605	$\pm 0,008$	1,3	-2,645	FG5#211	IGN
WL-C4	2003,84	9809639,516	$\pm 0,006$	1,3	-2,616	FG5#211	IGN
WL-A5	2003,85	9809641,792	$\pm 0,007$	1,3	-2,629	FG5#211	IGN
IGN-A	2003,89	9799557,051	$\pm 0,019$	0	-2,857	FG5#211	IGN
Alicante	2003,95	9800259,235	$\pm 0,002$	1,25	-3,090	FG5#211	IGN
Yebes	2004,34	9799474,865	$\pm 0,014$	1,25	-3,286	FG5#211	IGN
ROA	2004,53	9798263,370	$\pm 0,036$	1,25	2,500	FG5#211	IGN

Abreviaturas:

IGN: Instituto Geográfico Nacional, Madrid.

OAN: Observatorio Astronómico Nacional, Madrid.

ROA: Real Instituto y Observatorio de la Armada, San Fernando (Cádiz).

VdIC: Valle de los Caídos.

BIPM: Bureau International des Poids et Mesures, Sèvres, Paris.

SPAB: San Pablo.

WL: Walferdange (Luxemburgo).

Apéndice C

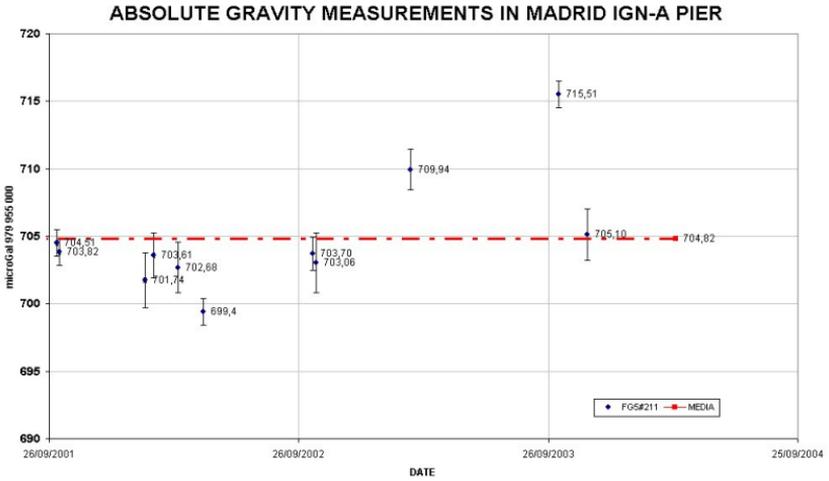


Figura 8: Serie temporal de gravedad en la sede del IGN en Madrid.

Medidas absolutas de gravedad en el Observatorio Geofísico de Alicante

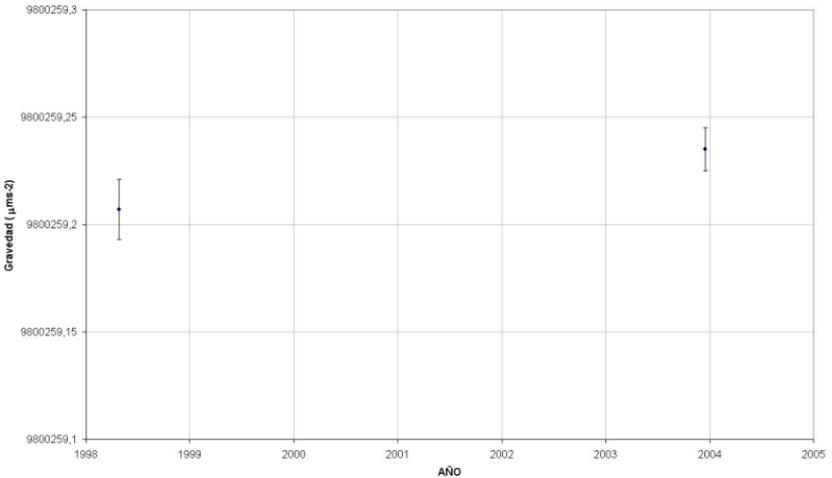


Figura 9: Serie temporal de gravedad en el Observatorio Geofísico de Alicante.

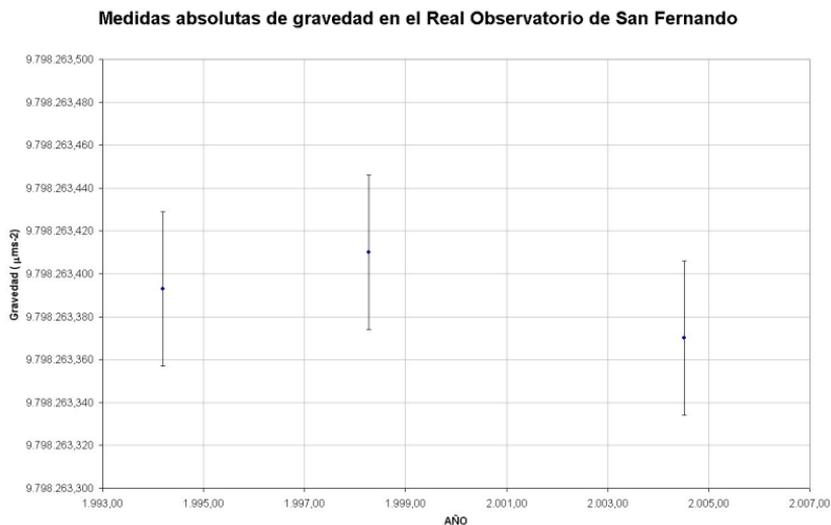


Figura 10: Serie temporal de gravedad en el Real Observatorio de San Fernando (Cádiz).