

## Proyectos REGA y RAEGE. Gravímetros y métodos empleados en su desarrollo *REGA and RAEGE projects. Gravimeters and methods used in their development*

CALVO, Marta <sup>(1)</sup>; SAZ-OROZCO, Rodrigo <sup>(2)</sup>; VILLAR, Arturo <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> IGN, Calle del General Ibáñez de Íbero 3, 28003, Madrid, mcalvo@mitma.es

<sup>(2)</sup> IGN, Calle del General Ibáñez de Íbero 3, 28003, Madrid, rsaz-orozco@mitma.es

<sup>(3)</sup> IGN, Calle del General Ibáñez de Íbero 3, 28003, Madrid, avillarg@mitma.es

### SUMMARY

*Since the first gravity observations performed by the Instituto Geográfico Nacional (IGN) at the end of the 19th century, up to the present day, many improvements have taken place regarding instrumentation and analytic techniques. Measurement precision achieved nowadays makes gravimetry a tool employed in a wide range of geophysical and geodetic studies.*

*At this moment, two of the main projects where IGN uses its most precise gravimeters (both absolute and relative) are the Red Española de Gravimetría Absoluta (REGA) and the Red Atlántica de Estaciones Geodinámicas y Espaciales (RAEGE).*

*The REGA network comprises more than 130 stations scattered throughout Spain. The main purpose of REGA is to serve as a reference for various applications carried out by IGN and other institutions. The observations that are part of REGA have been conducted with the A10#006 and FG5#211 absolute gravimeters manufactured by Micro-g Lacoste. The REGA project is under permanent development through the expansion of its present infrastructure and the review of the previously observed stations.*

*On the other hand, the RAEGE network comprises stations that combine multiple space geodetic techniques where, additionally, the earth gravitational field is studied by using absolute and superconducting gravimeters. Recently, the superconducting gravimeters iGrav#051 and SG#064 have been monitoring gravity variations for a period of six months at the Yebeas observatory. The collected data has been used in the calibration of the iGrav#051 prior to its final location at the Santa María observatory.*

### PALABRAS CLAVE

Geodesia, Geofísica, Gravimetría, Gravitación, Fuerza de la Gravedad, Gravedad, Aceleración, REGA, RAEGE.

### INTRODUCCIÓN

La gravimetría se ocupa de la medición de la aceleración que la fuerza de la gravedad imprime en los cuerpos situados sobre o cerca de la superficie terrestre. Dicha aceleración depende, por lo tanto, de la distribución de masas alrededor del cuerpo observado en virtud de la atracción gravitatoria que éstas ejercen sobre el cuerpo en cuestión y de la fuerza centrífuga generada por la rotación de la Tierra. De tal modo, el estudio de la aceleración de la gravedad proporciona información valiosa sobre nuestro planeta, razón por la que la gravimetría es empleada en campos de estudio como la geodesia o la geofísica.

Para medir la gravedad se emplean unos instrumentos denominados gravímetros. Estos instrumentos se dividen en absolutos o relativos en función de la forma en que realizan dicha medida. Los gravímetros absolutos observan el movimiento de un cuerpo en caída libre, obteniendo incrementos de distancia a lo largo de su trayectoria mediante un láser de helio-neón y, de tiempo, a partir de los ciclos generados por un reloj atómico de rubidio. Por otro lado, los gravímetros relativos incorporan una masa testigo y un sistema que genera una fuerza que contrarresta a la de la gravedad, proporcionando diferencias de gravedad sin ofrecer un valor absoluto.

Los dos principales proyectos en los que el Servicio de Gravimetría del Instituto Geográfico Nacional (IGN) emplea sus

gravímetros absolutos y relativos son la Red Española de Gravimetría Absoluta (REGA) y la Red Atlántica de Estaciones Geodésicas y Espaciales (RAEGE). Las estaciones que forman parte de la red REGA constituyen la referencia más precisa de la gravedad en España, sirven de apoyo en el desarrollo de varias de las infraestructuras mantenidas por el IGN y ofrecen datos a otras instituciones públicas o privadas cuyas actividades requieren del conocimiento preciso de la gravedad. En el caso de RAEGE, las observaciones gravimétricas se combinan con los datos proporcionados por varias técnicas geodésicas espaciales (VLBI, SLR y GNSS) con el objetivo de estudiar y monitorizar los fenómenos geodinámicos que experimenta nuestro planeta.

## REGA

La relación del IGN con la gravimetría se remonta a la época en la que fue fundada la institución. Motivadas por la necesidad de determinar el campo de la gravedad en España, en 1877 se llevan a cabo las primeras observaciones absolutas en territorio nacional, empleando para tal fin un péndulo de Repsold & Söhne (Barraquer et al., 1889). Posteriormente, las limitaciones de los instrumentos absolutos resultaron en un largo periodo en el que los trabajos de gravimetría llevados a cabo por el IGN se centraron en la observación mediante gravímetros relativos (Rodríguez, 2005). Durante la segunda mitad del s. XX comenzó el desarrollo de los gravímetros de tipo balístico empleados en la actualidad, poniendo fin a los métodos pendulares tras trescientos años de dominio en la gravimetría. La llegada de los nuevos instrumentos cambió el paradigma de las redes gravimétricas, dando lugar a la posibilidad de crear redes densas a partir de observaciones absolutas.

A principios del presente siglo el IGN adquirió dos gravímetros absolutos: los modelos FG5 y A10 de la empresa americana Micro-g Lacoste, con números de serie 211 y 006 respectivamente (FG5#211 y A10#006). Ambos instrumentos funcionan bajo el principio de caída libre. El modelo FG5 proporciona resultados con una incertidumbre de unos  $1,8 \mu\text{Gal}$  ( $1 \text{ Gal} = 10^{-2} \text{ m/s}^2$ ), mientras que el A10 es una versión del FG5 adaptada para realizar observaciones en campo, pudiendo determinar la gravedad con una incertidumbre cercana a los  $10 \mu\text{Gal}$ . Ambos instrumentos participan en el desarrollo y mantenimiento de la red REGA.

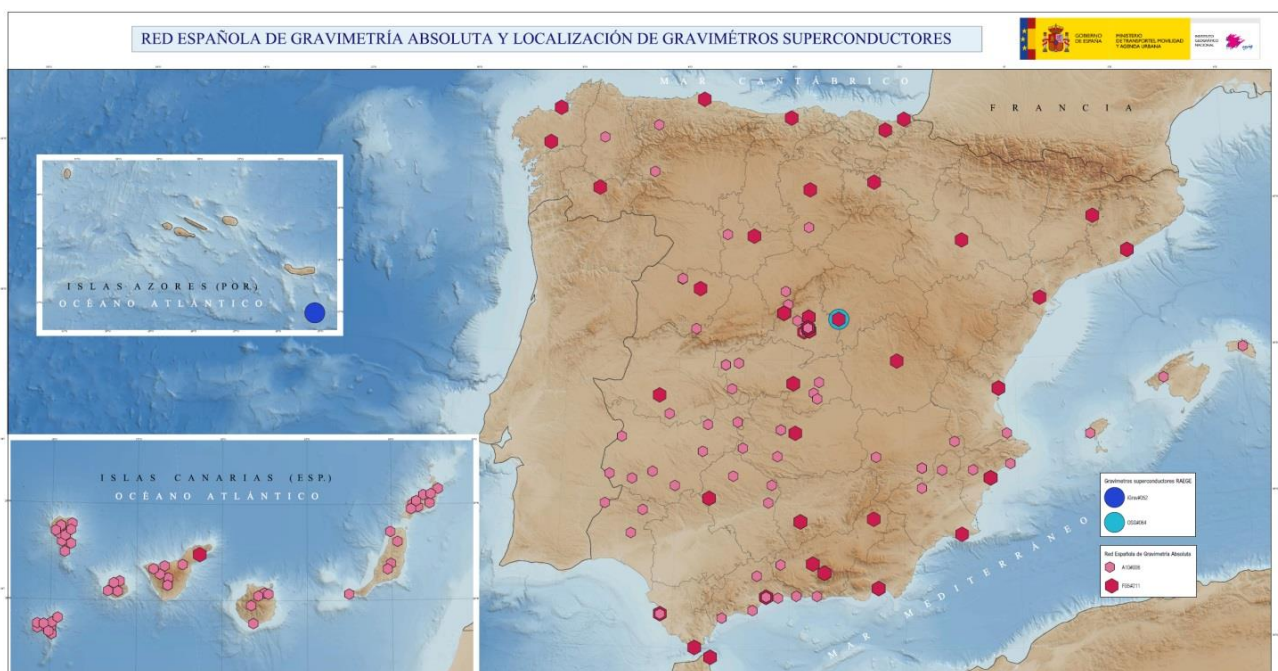


Figura 1: Localización de estaciones REGA (fucsia claro: A10; fucsia oscuro: FG5) y de gravímetros superconductores (azul claro: SG; azul oscuro: iGrav).

En la actualidad, la red REGA está integrada por más de 130 estaciones repartidas por todo el territorio nacional (Fig. 1). En su desarrollo se emplean gravímetros absolutos y relativos. Por un lado, la determinación de la gravedad se realiza sobre un punto de coordenadas bien definidas empleando los gravímetros FG5 y A10. Dichas medidas son referidas a la altura en la que se sitúa la cámara de caída de cada instrumento respecto a la superficie de estacionamiento (130 cm y 72 cm respectivamente). Para trasladar los resultados a una altura común se emplea el gradiente vertical de la gravedad, cuya observación se realiza mediante gravímetros relativos de campo. Además, los gravímetros relativos se emplean en la observación de los "Destacados REGA", los cuales definen la gravedad en puntos cercanos a las observaciones absolutas a partir de los incrementos observados respecto a

éstas (Villar, 2022).

Las estaciones REGA se dividen en dos grupos en función del gravímetro empleado en su observación, distinguiendo entre la Red de Orden Cero y la Red de Primer Orden (densificación de la anterior). Las estaciones de la Red de Orden Cero se observan con el gravímetro FG5. Éstas se ubican en lugares muy estables en los que no se producen cambios bruscos de temperatura y con acceso a corriente eléctrica. Por otro lado, las estaciones de la Red de Primer Orden se observan con el gravímetro A10, pudiéndose ubicar en lugares en los que las condiciones son más adversas gracias a las características del instrumento. En ambos casos las estaciones REGA enlazan con otras infraestructuras mantenidas por el IGN, como la Red Geodésica Nacional de Estaciones de Referencia GNSS (ERGNSS), la Red de Nivelación de Alta Precisión (REDNAP) y la red RAEGE.

## GRAVÍMETROS ABSOLUTOS

La medida de la gravedad empleando gravímetros absolutos consiste en la observación de la trayectoria de una masa en caída libre a lo largo de una cámara de vacío. Durante una caída el gravímetro es capaz de resolver más de 700 pares de posición y tiempo, los cuales se emplean sobre la ecuación del movimiento uniformemente acelerado para calcular la gravedad en un lugar y momento dados.

El registro de la posición se obtiene a partir de un interferómetro láser de helio-neón ( $\lambda = 633 \text{ nm}$ ). En primer lugar el láser genera un haz que, al atravesar un prisma, resulta en dos haces que siguen diferentes recorridos. Uno de los haces se dirige directamente al fotodetector que registra la señal (haz de referencia), mientras que el otro se dirige hacia un prisma que actúa de masa testigo (haz testigo). Además, el haz testigo se refleja en un prisma situado en la parte inferior del instrumento, donde un sistema de muelles compensa los movimientos verticales de largo periodo que pueda experimentar el terreno durante la observación. Al final de sus respectivos recorridos ambos haces se combinan de nuevo para generar una señal de interferencia en la que cada cero indica que la masa testigo se ha desplazado media longitud de onda (Fig. 2) (Micro-g Lacoste, 2012).

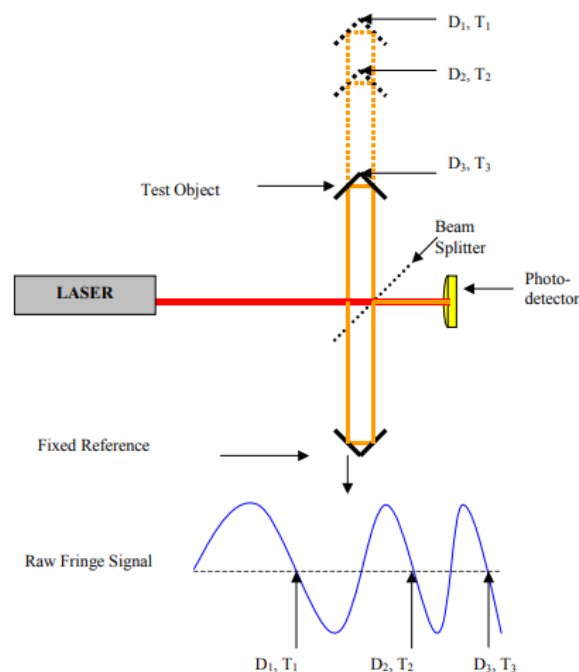


Figura 2: Esquema que muestra el funcionamiento del interferómetro de un gravímetro absoluto. Copyright © 2006 Micro-g LaCoste, Inc.

Por otro lado, la magnitud tiempo se obtiene a partir de un oscilador atómico de rubidio. Dicho oscilador genera una frecuencia nominal de 10 MHz cuya deriva se disciplina mediante el uso de una antena GPS. Al igual que sucede en el caso de la distancia, el sistema toma los intervalos de tiempo a partir de los ceros que muestra la señal de interferencia descrita anteriormente.

Las observaciones absolutas pueden durar horas o días dependiendo del instrumento empleado y de la precisión que se quiera alcanzar. Éstas se programan para que se realicen un número determinado de caídas agrupadas en sets. El resultado final se

obtiene a partir de la media de varios sets, cuyos valores a su vez son la media de todas las caídas que integran cada set. Posteriormente, la gravedad observada se corrige de los efectos producidos por la marea terrestre, la carga oceánica, el movimiento del polo y la presión atmosférica.

## GRAVIMETRÍA EN RAEGE

El proyecto RAEGE es el resultado de la colaboración entre el *Governo dos Açores* (Portugal) y el IGN. Esta red está formada por cuatro estaciones geodésicas fundamentales (Global Geodetic Observing System, 2015) integradas a su vez en las redes globales de observación geodésica. Las estaciones de Yebes y Gran Canaria se sitúan en territorio español, mientras que las de Santa María y Flores se ubican en territorio portugués. Está previsto que cada una de las estaciones sea equipada con un gravímetro relativo de alta precisión para el registro en continuo de las variaciones temporales de la gravedad. Actualmente, las estaciones de Yebes y Santa María cuentan con un gravímetro superconductor (SG#064 e iGrav#051) entre su instrumentación (Fig. 1).

### Yebes

El observatorio de Yebes dispone de un pabellón de gravimetría diseñado para controlar el comportamiento térmico del edificio (doble cámara con sistema de aire acondicionado en la externa). En su cámara interna el pabellón incluye siete pilares de hormigón en los que se pueden realizar mediciones de la gravedad de forma independiente (Córdoba et al., 2013). El gravímetro superconductor SG#064 está instalado en su pilar principal desde finales de 2011, dando lugar a un registro de casi 4.000 días sin interrupciones.

A parte del SG#064, en los últimos años el pabellón ha albergado todo tipo de instrumentación gravimétrica en sus pilares auxiliares (Fig. 3). Los gravímetros absolutos FG5#211 y A10#006 se usan principalmente para realizar los estudios de estabilidad del factor de calibración y modelar la deriva teórica del SG#064 (Calvo et al., 2012). Otros instrumentos absolutos han realizado medidas puntuales en el pabellón. En este sentido cabe destacar la intercomparación regional en la que participaron los equipos FG5#206 y FG5#228 (pertenecientes a la *École et Observatoire des Sciences de la Terre* de Estrasburgo y a *Géosciences Montpellier* respectivamente), la cual tuvo lugar a mediados de 2013. Además, a lo largo de los años se han estacionado multitud de gravímetros de muelle en distintos pilares (Scintrex CG5, Lacoste&Romberg, Graviton-EG o gPhone), registrando en paralelo al SG#064 con el objetivo de comparar sus observaciones (Arnos et al., 2014).



Figura 3: Gravímetros absolutos y relativos en el pabellón de gravimetría del Centro Astronómico de Yebes.

El pabellón de gravimetría también incorpora multitud de instrumentos auxiliares que sirven para complementar los registros gravimétricos, incluyendo una antena GNSS, barómetros, un piezómetro y una estación meteorológica (Córdoba et al., 2012).

### Santa María

El observatorio de Santa María no cuenta con un pabellón de gravimetría, sino que se han habilitado dos salas con un total de tres pilares independientes. La sala que contiene el pilar principal está controlada térmicamente para poder mantener la estabilidad que requiere el uso de un gravímetro superconductor. Desde abril de 2019 hasta finales de 2022, el gravímetro relativo de muelle Graviton-EG#1183 ha estado registrando datos en el pilar principal. En total se ha obtenido una serie de más

de 1000 días con la que se ha calculado un modelo provisional de mareas locales. El Graviton-EG#1183 ha sido sustituido por el gravímetro superconductor iGrav#051 en octubre de 2022 (Fig. 4). Previamente, los gravímetros iGrav#051 y SG#064 han realizado observaciones simultáneas en el pilar principal de Yebees sumando un registro de 280 días. Este registro es de gran utilidad para llevar a cabo diferentes comparativas entre ambos equipos, principalmente en lo que respecta a los niveles de ruido y a la estabilidad temporal de muchos de sus parámetros.

Al igual que en el caso de Yebees, el observatorio de Santa María incluye instrumentación auxiliar con el fin de analizar los datos gravimétricos desde una perspectiva multidisciplinar.



Figura 4: Gravímetro superconductor iGrav#051 en el observatorio de Santa María.

## GRAVÍMETROS SUPERCONDUCTORES

La introducción de los gravímetros superconductores (SG) en la década de 1980 mejoró drásticamente todos los estudios de variaciones temporales de la gravedad en un amplio rango de frecuencias (desde minutos hasta años), contribuyendo de manera única al análisis de las mareas terrestres de baja frecuencia y a las ondas de pequeña amplitud. Son los sensores de gravedad más sensibles y estables disponibles en la actualidad para mediciones en tierra, pero a diferencia de los gravímetros de resorte, los SG no son móviles, por lo que sólo se utilizan como instrumentos estacionarios y no como equipos de campo.

Los gravímetros superconductores son empleados principalmente para medir las mareas de la Tierra en un punto específico, ya que proporcionan amplitudes en las frecuencias de marea con una enorme precisión en registros largos (precisión  $\approx 1$  nGal). También son empleados para observar las oscilaciones libres de la Tierra y otros fenómenos geofísicos.

Estos instrumentos son relativos, por lo que al igual que los gravímetros de muelle, los SG se fundamentan en el equilibrio de fuerzas para medir las variaciones del campo de gravedad. Sin embargo, éstos se diferencian de los gravímetros de muelle en que la suspensión de resorte de la masa es reemplazada por la levitación magnética de una esfera superconductora que solamente es perturbada bajo la acción de un campo gravitatorio externo (Fig. 5). El campo magnético aplicado para mantener la esfera en equilibrio es proporcional al campo de la gravedad que actúa sobre ella. Para mantener el sistema en estado de superconductividad es necesario sumergir al conjunto en helio líquido (temperatura = 4,2 K) (GWR Instruments).

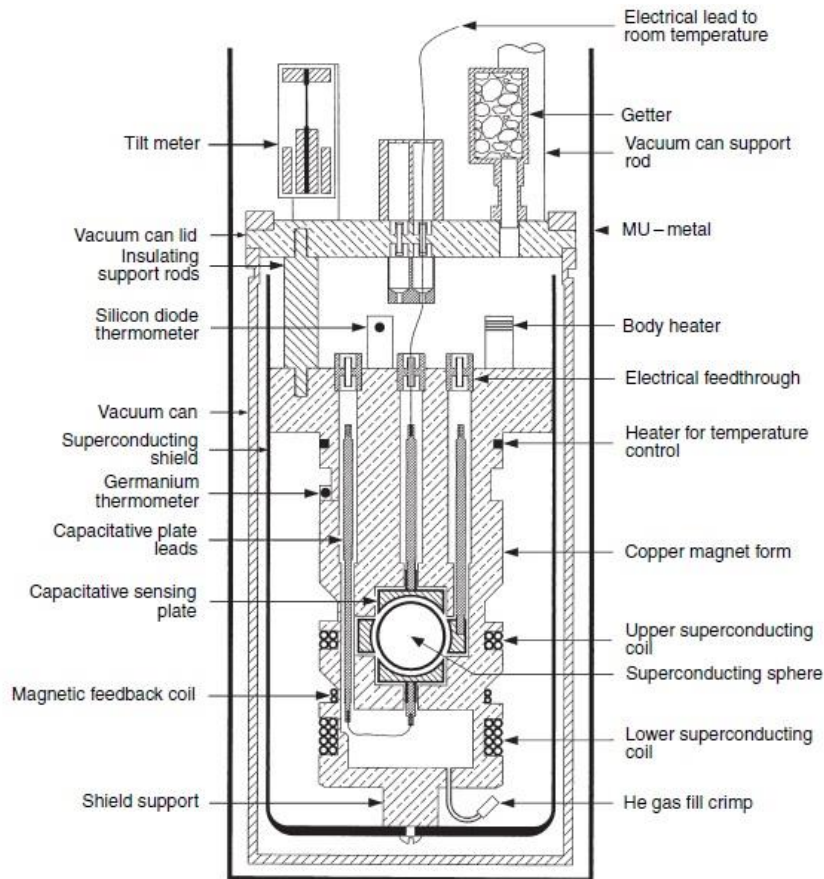


Figura 5: Esquema que muestra el interior de un gravímetro superconductor. Copyright © GWR Instruments, Inc.

Los efectos mecánicos y térmicos inherentes a los gravímetros de muelle se evitan gracias a la levitación magnética. Además, los SG tienen una deriva instrumental significativamente menor (del orden de unos pocos  $\mu\text{Gal}$  al año). Por todo ello, los gravímetros superconductores están caracterizados por una estabilidad a largo plazo sin precedentes, razón por la que contribuyen de manera única al estudio de las mareas terrestres de baja frecuencia y a las ondas de pequeña amplitud.

## REFERENCIAS

- [1] Barraquer y Rovira, J., Cebrián P., los Arcos, A., et al. (1889): "Determinación Experimental de la Intensidad de la Gravedad en Madrid". *Memorias del Instituto Geográfico y Estadístico*.
- [2] Rodríguez, E. (2005): "Medidas gravimétricas en Madrid y en España". *Anuario Astronómico del Observatorio de Madrid*.
- [3] Villar, A. (2022): "La medida de la gravedad: conceptos básicos, instrumentos, aplicaciones e infraestructuras mantenidas por el Instituto Geográfico Nacional". *e-medida*, 21.
- [4] Micro-g Lacoste, <https://microglacoste.com>
- [5] Global Geodetic Observing System, <https://ggos.org/item/ggos-core-sites/>
- [6] Córdoba, B., Calvo, M., López, J., Serna, JM. (2013): "The new Earth Tide Station in Spain; Yebe". *17th International Symposium on Earth Tides, Military University of Technology, Warsaw, Poland, 04/2013*.
- [7] Calvo, M., Córdoba, B., Serna, JM., Rosat, S., López, J. (2012): "Presentation of the new Spanish Gravimeter Station: Yebe". *Geophys. Res. Abs., EGU, 2012, Vienna*.
- [8] Arnos, J., Riccardi, U., Hinderer, J., Córdoba, B., Montesinos, F. G. (2014): "Analysis of co-located measurements made with

a LaCoste&Romberg Graviton-EG gravimeter and two superconducting gravimeters at Strasbourg (France) and Yebes (Spain)". *Acta Geodaetica et Geophysica*, **49**, 147-160.