

# DETERMINACIÓN DEL VALOR ABSOLUTO DE LA GRAVEDAD EN LOIOLA Y PASAIA (GIPUZKOA)



**PEDRO AGUSTÍN VAQUERO FERNÁNDEZ  
SERGIO SAINZ-MAZA APARICIO**

**Instituto Geográfico Nacional 2017**

---



## Contenido

OBJETIVOS.....	1
FECHAS DE OBSERVACIÓN .....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
FG5 de MicrogLacoste (Nº de Serie 211) .....	1
SCINTREX CG5 (Nº de Serie 811 y 1391) .....	2
Información complementaria .....	3
OBSERVACIONES DE GRAVEDAD EN EL SANTUARIO DE LOIOLA .....	5
Descripción de la medida del valor absoluto de la gravedad .....	5
Descripción del procesado para la obtención del valor absoluto de la gravedad .....	6
Determinación del gradiente vertical de gravedad.....	6
Traslado del valor absoluto a puntos externos al Santuario.....	7
OBSERVACIONES DE GRAVEDAD EN EL PUERTO DE PASAIA.....	10
Descripción de la medida del valor absoluto de la gravedad .....	10
Descripción del procesado para la obtención del valor absoluto de la gravedad .....	11
Determinación del gradiente vertical de gravedad.....	11
Traslado del valor absoluto al clavo de referencia del mareógrafo.....	12
ANEXOS (MEDIDAS DE GRAVEDAD ABSOLUTA).....	15
Tabla resumen de resultados.....	17

---



## OBJETIVOS

Determinación del valor de gravedad absoluta en el Santuario de Loiola y en el Puerto de Pasaia, ambos emplazamientos en Gipuzkoa, con el objeto de servir de apoyo a las distintas redes geofísicas y geodésicas. Desde ambos emplazamientos se han realizado medidas a puntos destacados en los clavos de las redes de nivelación más cercanos.

## FECHAS DE OBSERVACIÓN

Santuario de Loiola: Del 26 al 28 de Junio de 2017.

Puerto de Pasaia: Del 28 al 30 de Junio de 2017.

## INTRODUCCIÓN

Para la obtención de los valores finales de gravedad absoluta se han empleado tanto gravímetros relativos como gravímetros absolutos, de los que a continuación se ofrece una breve descripción:

### FG5 de MicroLacoste (Nº de Serie 211)



Se trata de un gravímetro absoluto que proporciona valores de gravedad locales de forma instantánea. Los gravímetros absolutos presentan la ventaja proporcionar un valor de gravedad independiente del sistema de referencia utilizado. La precisión de las medidas de los AG dependen en gran medida de la calidad del sitio donde el gravímetro sea instalado (nivel de ruido microsísmico, estabilidad térmica, ruido humano...). En la actualidad los gravímetros FG5 son los gravímetros absolutos de caída libre, que proporcionan una mayor precisión, del orden de  $2\mu\text{Gal}$  ( $1\mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ).

<http://www.microlacoste.com/fg5x.php>

Su fundamento se basa en la determinación de la aceleración de un cuerpo en caída libre, durante la cual, se miden mediante pares de distancias y tiempos. Como cuerpo se emplea una masa de ensayo consistente en un prisma reflectante que cae libremente en el vacío dentro de una cámara que es la parte del equipo donde se realiza el experimento (figura 1). La trayectoria de dicha masa se determina con una precisión de unos  $10^{-6} \text{ m}$  mediante interferometría láser, mientras que el tiempo de caída se mide con un reloj atómico de Rubidio con una precisión de  $2 \cdot 10^{-12} \text{ Hz}$ . Reloj e interferómetro constituyen el sistema de medición del equipo. La altura de la caída es de aproximadamente  $0,2 \text{ m}$  y la masa tarda alrededor de  $0,2 \text{ s}$  en la caída completa. Por último, las observaciones se filtran de altas frecuencias, las cuales

son determinadas mediante la colocación de un sismómetro en la parte inferior del equipo (superspring), y que constituye la tercera parte del equipo.

Estos instrumentos requieren para su instalación de lugares estables, cerrados y con instalación eléctrica.

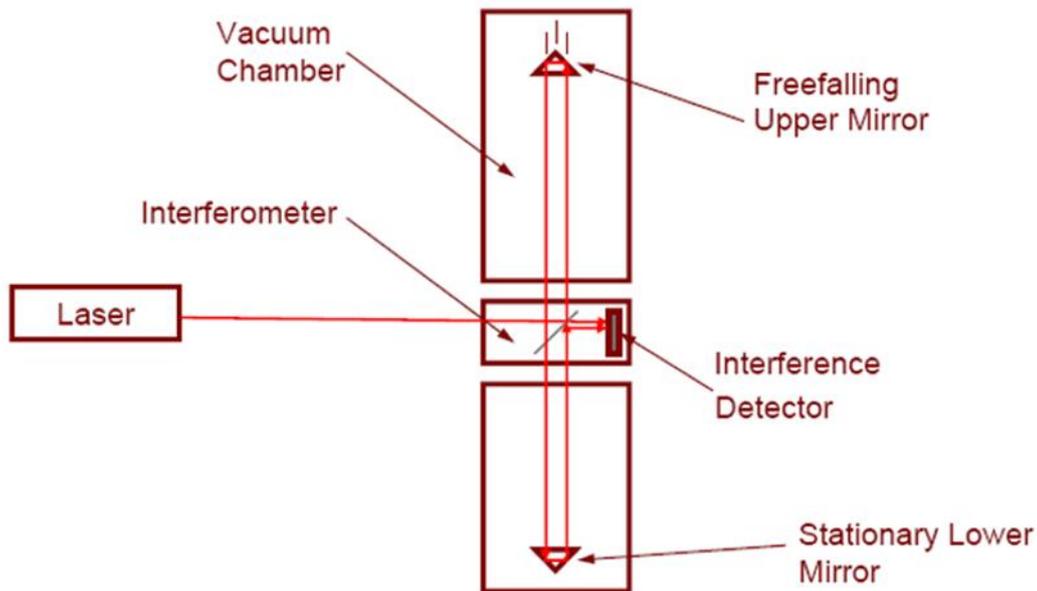


Figura 1. Esquema simplificado de los componentes de un gravímetro absoluto de caída libre.

Para cada caída de la masa, el valor de  $g$  se determina mediante un ajuste por mínimos cuadrados de los pares distancia-tiempo obtenidos. En este sistema de ecuaciones, se debe tener en cuenta el gradiente vertical de la gravedad local, que genera cambios en el valor de  $g$  durante la trayectoria de la masa, afectando dicha trayectoria.

Como procedimiento habitual, las medidas se dividen generalmente en sets de  $n$  medidas, de cada uno de los cuales se obtiene un valor medio con su desviación estándar. El valor final se obtiene como la media del conjunto de todos los sets.

## SCINTREX CG5 (Nº de Serie 811 y 1391)



Se trata de un gravímetro relativo, capaz de medir diferencias de gravedad entre dos puntos dados con una precisión que puede alcanzar el  $1 \mu\text{Gal}$ , dependiendo de las condiciones ambientales. Su principio de funcionamiento consiste en la medida de variación de elongación que experimenta un muelle al ser sometido a una fuerza externa, que en este caso es la fuerza de la gravedad terrestre, la cual sufre variaciones tanto espaciales como temporales (Ver figura 2).

([http://scintrexltd.com/documents/867700\\_5.pdf](http://scintrexltd.com/documents/867700_5.pdf))

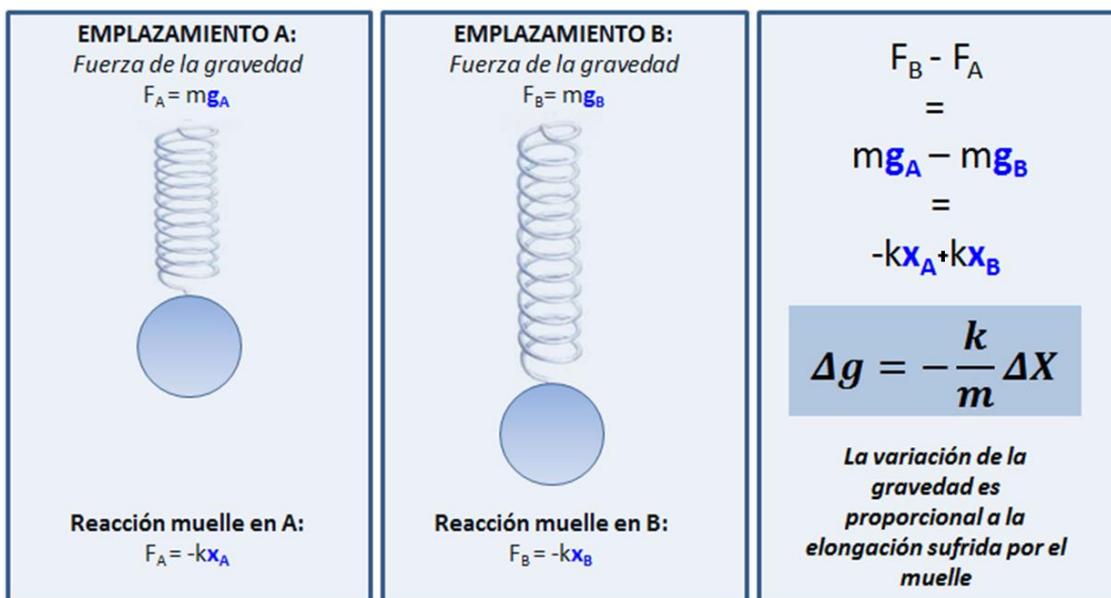


Figura 2. Esquema simplificado del funcionamiento del gravímetro relativo Scintrex CG5.

Su portabilidad y robustez, así como la inmediatez en la medida, es lo que le hace ideal para realizar medidas de precisión en campo y lugares a los que los gravímetros absolutos no pueden acceder.

### Información complementaria

26/06/2017	<ul style="list-style-type: none"> <li>Llegada a Loiola, descarga e instalación del FG5, que se deja estabilizando y calentando.</li> <li>Sobre las 19.30 se procede al ajuste de los parámetros, mecánicos y eléctricos del FG5 para configurar la medida. Inicio del registro de datos.</li> </ul>
27/06/2017	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reajuste de los parámetros, mecánicos y eléctricos del FG5 para configurar la medida. Se lanza un nuevo registro de datos.</li> <li>Traslado de la medida de gravedad absoluta a dos puntos en el exterior del Santuario, uno en la puerta lateral y otro en el clavo de la Red de Nivelación de Gipuzkoa GFA 08/130</li> <li>Determinación del gradiente vertical de gravedad en el lugar de medida del valor absoluto con el CG5.</li> </ul>
28/06/2017	<ul style="list-style-type: none"> <li>Traslado de medida entre el punto de observación del gradiente y el punto de absolutas.</li> <li>Empaquetado del FG5 y traslado a Pasaia.</li> <li>Llegada a Pasaia, descarga e instalación del FG5, que se deja estabilizando y calentando.</li> <li>Sobre las 17.30 se procede al ajuste de los parámetros, mecánicos y eléctricos del FG5 para configurar la medida. Inicio del registro de datos.</li> </ul>

29/06/2017	<ul style="list-style-type: none"><li>• Problemas con la potencia y la intensidad del patrón de interferencias. Se desmonta el láser y se vuelve a ajustar, sin mejorar mucho el patrón, pero sin afectación en la medida.</li><li>• Determinación del gradiente vertical de gravedad en el lugar de medida del valor absoluto con el CG5.</li><li>• Reajuste de los parámetros, mecánicos y eléctricos del FG5 para configurar la medida. Se lanza un nuevo registro de datos.</li></ul>
30/06/2017	<ul style="list-style-type: none"><li>• Traslado de la medida de gravedad absoluta a un punto exterior al edificio de medida que corresponde a la Red de Nivelación de alta precisión</li><li>• Empaquetado equipos y vuelta a Madrid</li></ul>

→ El personal del IGN que se traslada para la realización del trabajo es:

- Pedro Agustín Vaquero Fernández (Área de Geodesia, IGN)  
([pavaquero@fomento.es](mailto:pavaquero@fomento.es)).
- Sergio Sainz-Maza Aparicio (Observatorio Geofísico Central , IGN)  
([ssainz-maza@fomento.es](mailto:ssainz-maza@fomento.es))

→ La persona de contacto que nos facilitó la búsqueda y el acceso a los emplazamientos fue:

- Mikel Elorza (Diputación Foral de Gipuzkoa, Sección de Información Territorial)  
([melorza@gipuzkoa.eus](mailto:melorza@gipuzkoa.eus))

→ Santuario de Loiola.

<https://www.santuariodeloyola.org/es/>

Loiola Auzoa, 16  
20730 Azpeitia (Gipuzkoa)  
Tel: + 34 943 025 000  
Coordenadas GPS:  
Latitud: 43.1742°  
Longitud: -2.2827°

→ Puerto de Pasaia

AZTI  
<http://www.azti.es/es/>  
Herrera Kaia, Portualdea z/g  
20110 Pasaia (Gipuzkoa).  
Tel. +34 94 657 40 00 / Fax:+34 94 657 25 55  
info@azti.es  
Coordenadas GPS:  
Latitud: 43.2989°  
Longitud: -2.8705°

## OBSERVACIONES DE GRAVEDAD EN EL SANTUARIO DE LOIOLA

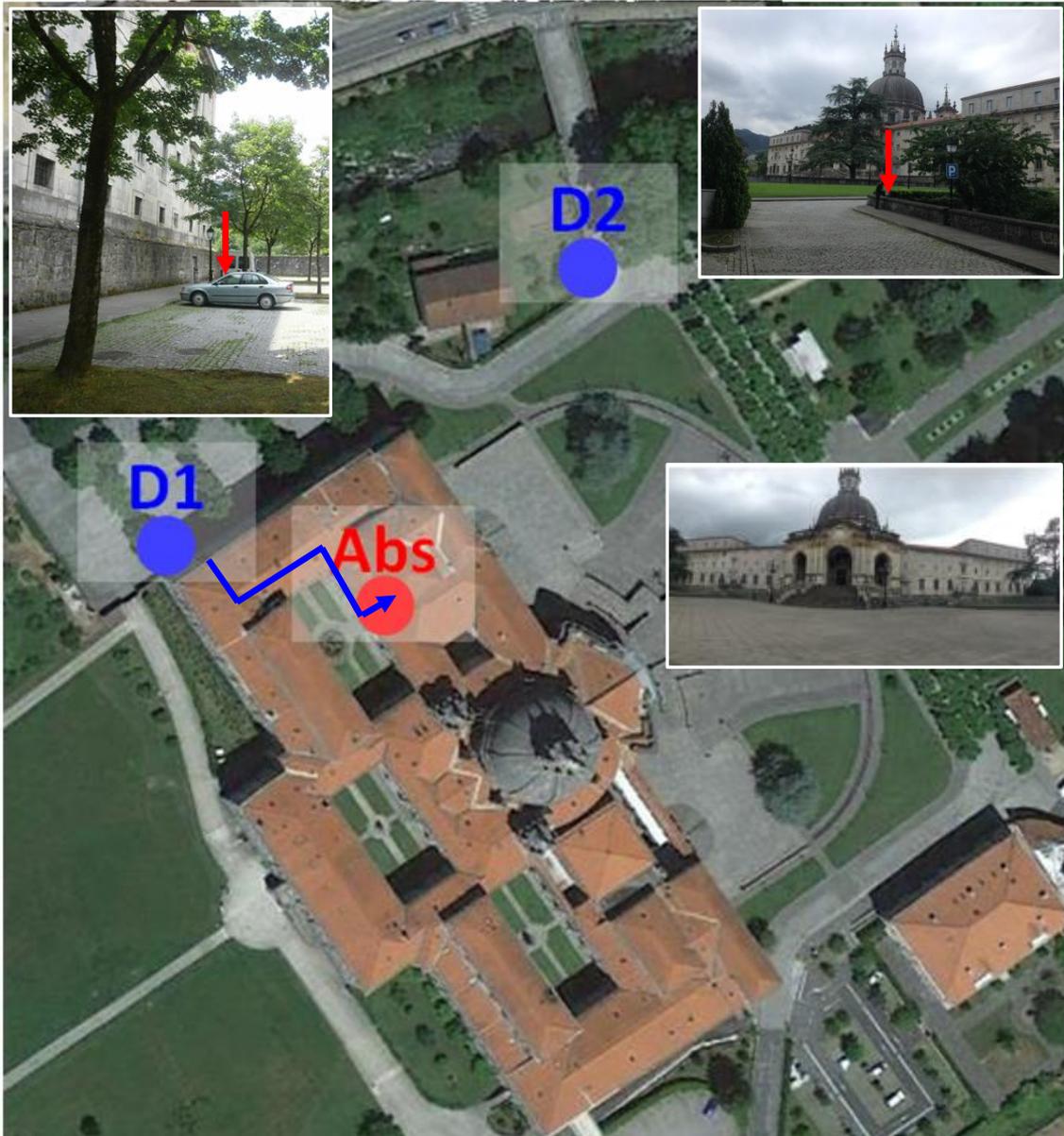


Figura 3. Imagen aérea del Santuario de Loyola con las localizaciones de medida indicadas. En rojo la localización de la medida absoluta en el interior del Santuario y en azul la de los destacados realizados.

### Descripción de la medida del valor absoluto de la gravedad

La medida se realizó en uno de los pasillos que se encuentran en los sótanos del Santuario de Loyola entre los días 26 y 28 de Junio de 2017, consistiendo la observación en dos bloques de medidas. El primero de 17 horas y el segundo de 19 horas, programados de la

siguiente manera:

- ✓ 1 caída cada 20 segundos
- ✓ 1 set compuesto por 150 caídas
- ✓ 1 set cada hora

De esta manera, obtenemos un total de 36 sets (5400 caídas), que trataremos estadísticamente, para obtener el valor de gravedad absoluta.

## Descripción del procesado para la obtención del valor absoluto de la gravedad

Al igual que la mayoría de las señales geofísicas, los registros brutos generados por el gravímetro deben ser procesados cuidadosamente para corregirlos de todos los efectos locales y ambientales que pueden afectarlos. Estas correcciones son tanto de origen geofísico (mareas terrestres, carga oceánica, movimiento del polo, terremotos...) como de origen atmosférico (presión atmosférica). Además existe alteraciones de origen antropogénico, como ruido de motores.

En la siguiente tabla se resumen los principales parámetros utilizados y modelos para las correcciones de las medidas:

	Parámetros
<b>Coordenadas</b>	Latitud: 43,175
	Longitud: -2,283
	Altura ortométrica: 97 m
<b>Gradiente vertical</b>	-2,277 $\mu\text{Gal}/\text{cm}$
<b>Altura instrumental</b>	130 cm
<b>Modelo mareas terrestre</b>	Teórico (ETGTAB)
<b>Modelo carga oceánica</b>	Teórico (FES2004)
<b>Movimiento del polo (IERS)</b>	X= 0,145167
	Y= 0,452638
<b>Presión barométrica teórica</b>	1001,65 mBar
<b>Factor de corrección de presión</b>	-0,30 $\mu\text{Gal}/\text{mBar}$

Tabla 1: Parámetros empleados en el procesado de los datos para obtener el valor de gravedad absoluta.

## Determinación del gradiente vertical de gravedad

Las medidas realizadas por gravímetros absolutos, nos proporcionan el valor de la gravedad de manera muy precisa, a la altura donde se localiza la masa de prueba que cae en el vacío. Esta altura se denominada altura instrumental y es distinta para cada instrumento (FG5#211 unos 130 cm sobre el suelo aproximadamente). Si queremos determinar el valor de gravedad al nivel del suelo es necesario trasladar la medida, esto se hace utilizando lo que se conoce como gradiente vertical de gravedad teórico (-3,086  $\mu\text{Gal}/\text{cm}$ ). De tal manera que:

$$g(h_{\text{suelo}}) = g(h_{\text{instrumental}}) - \frac{\Delta g}{\Delta h} h_{\text{instrumental}}$$

Siendo  $\frac{\Delta g}{\Delta h}$  el denominado gradiente vertical de gravedad.

Este gradiente depende de las características geológicas y ambientales del sitio de medida, pudiendo sufrir variaciones significativas entre dos puntos de observación distintos. La exactitud de una medida absoluta, se puede aumentar por tanto, determinando in situ dicho gradiente. Para ello se ha medido el valor de gravedad a distintas alturas con el gravímetro relativo CG5#811 en el emplazamiento donde se obtuvo el valor de gravedad absoluta. El valor obtenido fue

$$\frac{\Delta g}{\Delta h} = -2,277 \pm 0,009 \left( \frac{\mu\text{Gal}}{\text{cm}} \right)$$

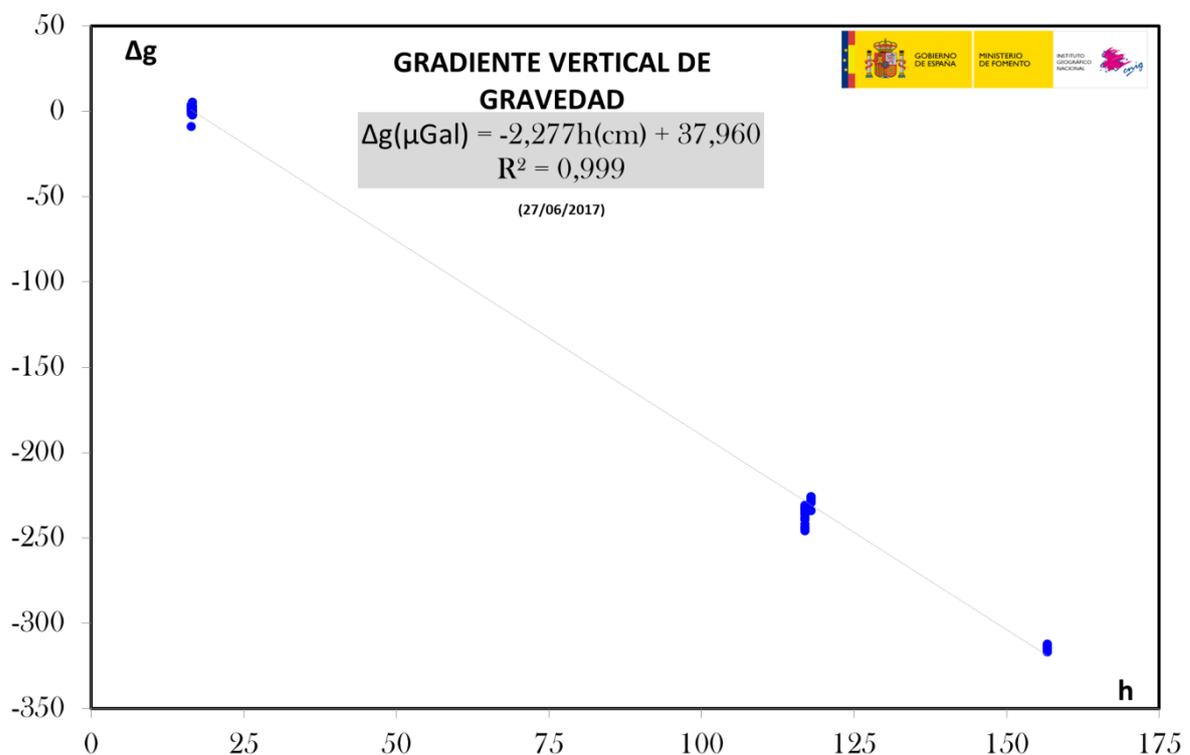


Figura 4. Variación del valor de gravedad con la altura.

## Traslado del valor absoluto a puntos externos al Santuario

Se realizaron dos destacados marcados en la Figura 3 como D1, situado junto a la puerta más al oeste de la fachada norte, y el D2 que se corresponde con el clavo de la red de nivelación Guipuzkoana **GF 08/130**. Para ello se empleó nuevamente el gravímetro relativo CG5#811.

Se hicieron repetidas medidas entre el punto de gravedad absoluta a nivel de suelo y los puntos seleccionados, obteniendo de este modo los respectivos valores relativos de gravedad entre puntos, y pudiendo determinar de esta manera al valor absoluto de gravedad

en dichos puntos.

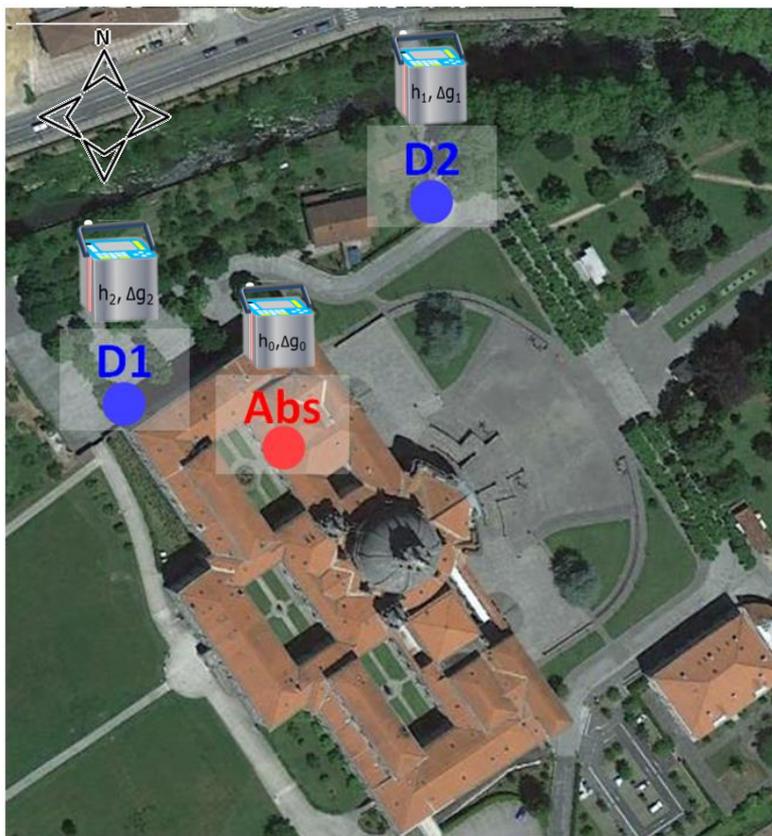
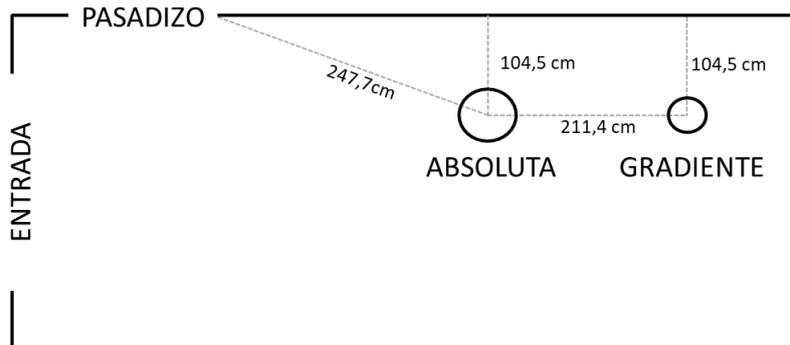


Figura 5. Localización de los distintos puntos de observación, medidas con gravímetros relativos

Punto	Altura (cm)	Valor relativo ( $\mu\text{gal}$ )	Valor absoluto ( $\mu\text{gal}$ )
<b>Absoluta</b>	130	0	<b>980405150,7 ± 1,6</b>
<b>Absoluta trasladada</b>	0	296,0	<b>980405446,7 ± 2,8</b>
<b>Punto gradiente</b>	0	295,5	<b>980405446,2 ± 6,6</b>
<b>D1</b>	0	566,4	<b>980405717,2 ± 7,1</b>
<b>D2</b>	0	-121,9	<b>980405028,8 ± 7,4</b>

Tabla2: Resultados finales de los valores de gravedad en los distintos emplazamientos

## Abs



## D1



## D2



Figura 6. Imágenes de los distintos emplazamientos donde se determinó el valor de gravedad.

## OBSERVACIONES DE GRAVEDAD EN EL PUERTO DE PASAIA



Figura 6. Imagen aérea del Puerto de Pasaia con las localizaciones de medida indicadas. En rojo la localización de la medida absoluta en el interior del laboratorio de la empresa AZTI cedido para la medida y en azul el del destacado realizado sobre la marca de referencia del mareógrafo.

### Descripción de la medida del valor absoluto de la gravedad

La medida se realizó en uno de los laboratorios de la empresa AZTI (Centro tecnológico experto en innovación marina y alimentaria) entre los días 28 y 30 de Junio de 2017, consistiendo la observación en dos bloques de medidas el primero de 16 horas y el segundo de

22 horas, programados de la siguiente manera:

- ✓ 1 caída cada 20 segundos
- ✓ 1 set compuesto por 150 caídas
- ✓ 1 set cada hora

De esta manera, obtenemos un total de 38 sets (5700 caídas), que trataremos estadísticamente, para obtener el valor de gravedad absoluta.

## Descripción del procesado para la obtención del valor absoluto de la gravedad

Al igual que el caso anterior, mostramos en la siguiente tabla se resumen los principales parámetros utilizados y las correcciones aplicadas a la medida:

Parámetros	
Coordenadas	Latitud: 43,322
	Longitud: -1,931
	Altura ortométrica: 4 m
Gradiente vertical	-2,821 $\mu\text{Gal}/\text{cm}$
Altura instrumental	130 cm
Modelo mareas terrestre	Teórico (ETGTAB)
Modelo carga oceánica	Teórico (FES2004)
Movimiento del polo (IERS)	X= 0,147191
	Y= 0,451670
Presión barométrica teórica	1012,77 mBar
Factor de corrección de presión	-0,30 $\mu\text{Gal}/\text{mBar}$

Tabla 3: Parámetros empleados en el procesado de los datos para obtener el valor de gravedad absoluta.

## Determinación del gradiente vertical de gravedad

Siguiendo el mismo procedimiento que el empleado para el caso anterior, se ha medido el valor de gravedad a distintas alturas con el gravímetro relativo CG5#811 en el mismo emplazamiento donde se obtuvo el valor de gravedad absoluto. El gradiente vertical de gravedad obtenido fue:

$$\frac{\Delta g}{\Delta h} = -2,821 \pm 0,004 \left( \frac{\mu\text{Gal}}{\text{cm}} \right)$$

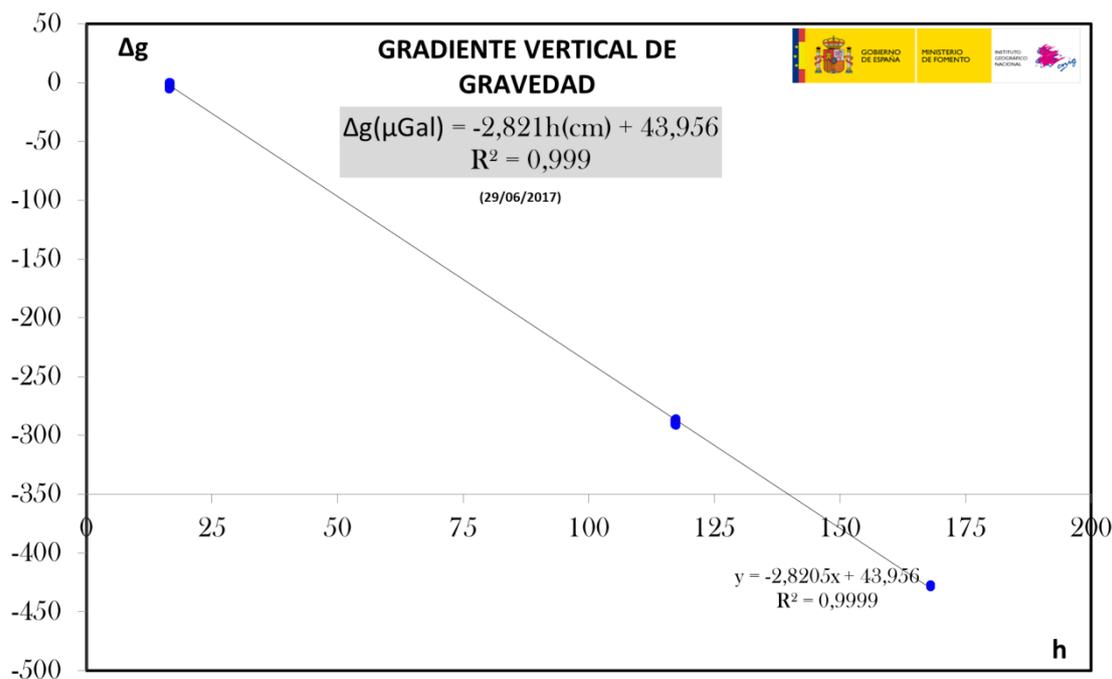


Figura 7. Variación del valor de gravedad con la altura.

## Traslado del valor absoluto al clavo de referencia del mareógrafo

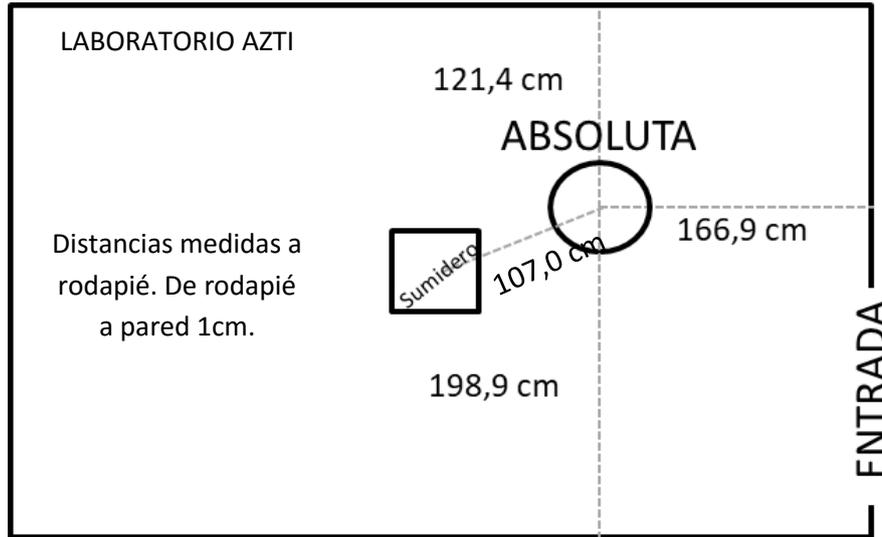
Se empleó nuevamente el gravímetro relativo CG5#811, para el traslado de la medida absoluta del interior del laboratorio al clavo de referencia del mareógrafo (*benchmark*).

Se hicieron repetidas medidas entre el punto de gravedad absoluta a nivel de suelo y los puntos seleccionados, obteniendo de este modo los respectivos valores relativos de gravedad entre puntos, y pudiendo determinar de esta manera al valor absoluto de gravedad en dicho punto.



Figura 8. Localización de los distintos puntos de observación con el gravímetro relativo.

## Abs



## D1



Figura 9. Imágenes de los distintos emplazamientos donde se determinó el valor de gravedad. Hay que tener en cuenta que el clavo de nivelación tiene una altura determinada y se da el valor a nivel de suelo

Punto	Altura (cm)	Valor relativo ( $\mu$ gal)	Valor absoluto ( $\mu$ gal)
<b>Absoluta</b>	130	0	<b>980442374,6<math>\pm</math> 4,0</b>
<b>Absoluta trasladada</b>	0	366,7	<b>980442741,2 <math>\pm</math> 4,5</b>
<b>D1</b>	0	209,5	<b>980442584,1 <math>\pm</math> 9,5</b>

*Tabla4: Resultados finales de los valores de gravedad en los distintos emplazamientos.*

## ANEXOS (MEDIDAS DE GRAVEDAD ABSOLUTA)

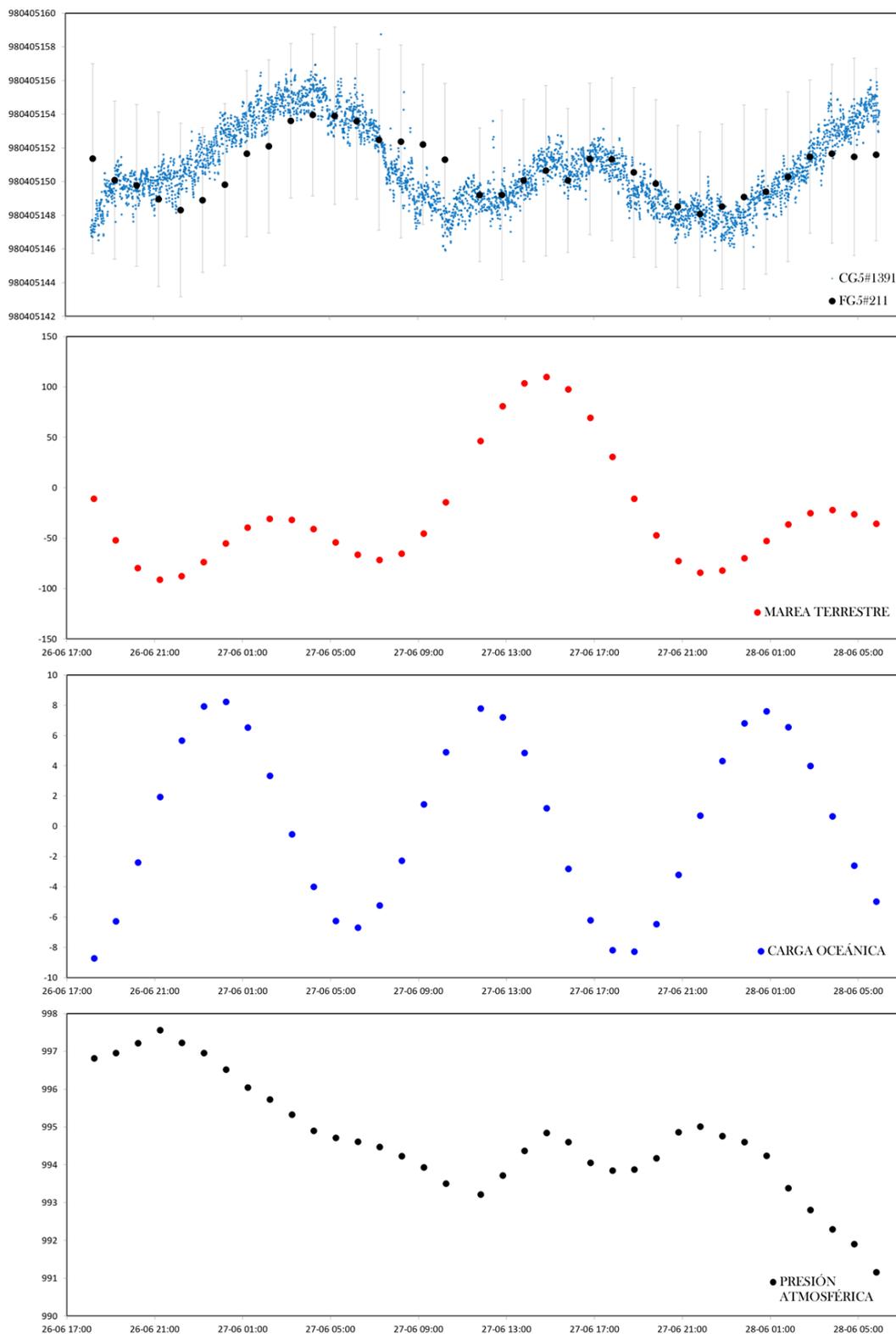


Figura 10. Medida de gravedad absoluta en el santuario de Loiola y correcciones aplicadas. En azul sobre la medida absoluta tenemos el registro obtenido con el gravímetro relativo CG5#1391

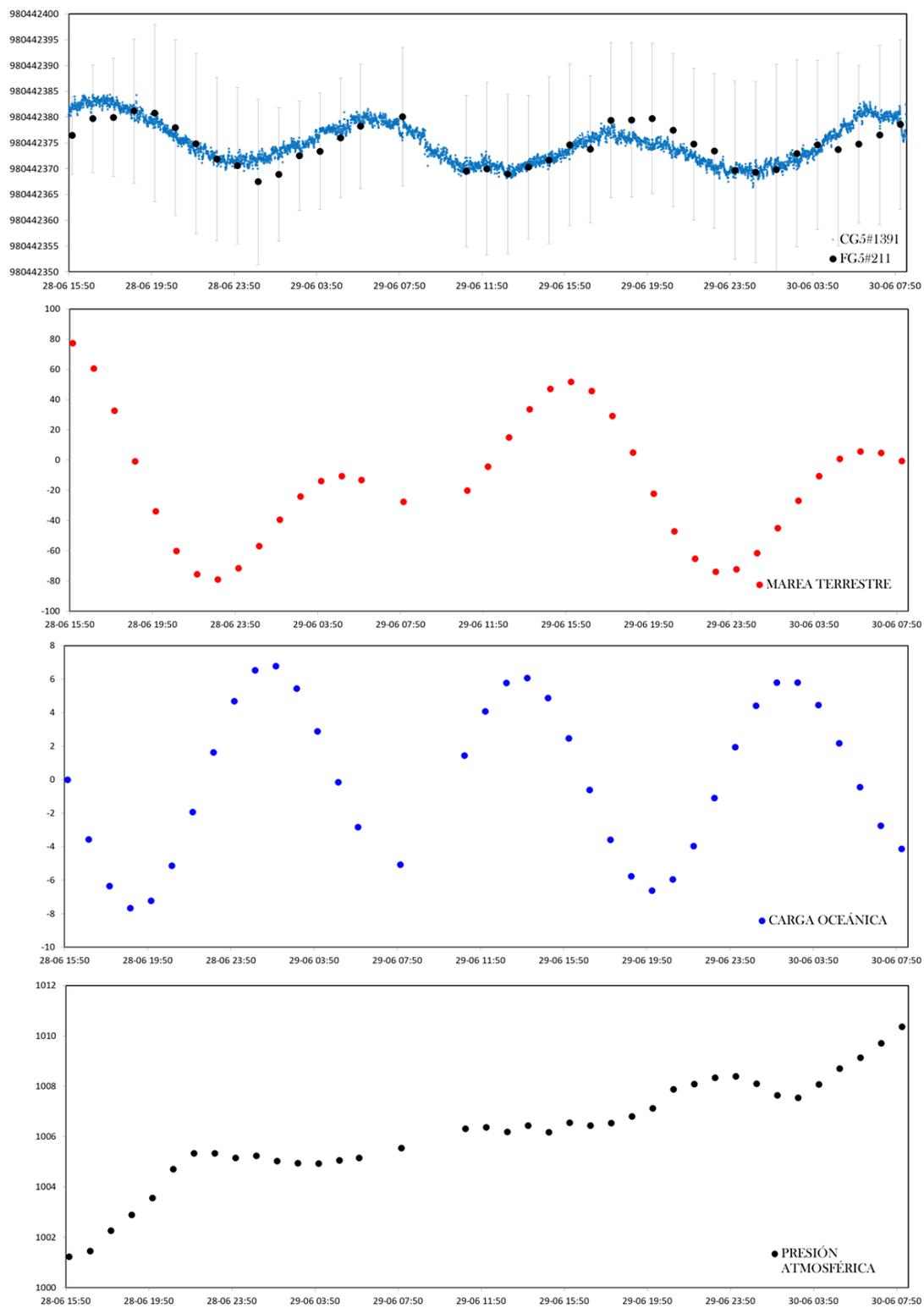


Figura 11. Medida de gravedad absoluta en el Puerto de Pasaia y correcciones aplicadas. En azul sobre la medida absoluta tenemos el registro obtenido con el gravímetro relativo CG5#1391.

## Tabla resumen de resultados

<b>SANTUARIO DE LOIOLA</b>			
<b>Punto</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Valor relativo (<math>\mu</math>gal)</b>	<b>Valor absoluto (<math>\mu</math>gal)</b>
<b>Absoluta</b>	130	0	<b>980405150,7<math>\pm</math> 1,6</b>
<b>Absoluta trasladada</b>	0	296,0	<b>980405446,7 <math>\pm</math> 2,8</b>
<b>Punto gradiente</b>	0	295,5	<b>980405446,2 <math>\pm</math> 6,6</b>
<b>D1</b>	0	566,4	<b>980405717,2 <math>\pm</math> 7,1</b>
<b>D2</b>	0	-121,9	<b>980405028,8 <math>\pm</math> 7,4</b>
<b>PUERTO DE PASAIA</b>			
<b>Punto</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Valor relativo (<math>\mu</math>gal)</b>	<b>Valor absoluto (<math>\mu</math>gal)</b>
<b>Absoluta</b>	130	0	<b>980442374,6<math>\pm</math> 4,0</b>
<b>Absoluta trasladada</b>	0	366,7	<b>980442741,2 <math>\pm</math> 4,5</b>
<b>D1</b>	0	209,5	<b>980442584,1 <math>\pm</math> 9,5</b>