

**RESUMEN DE LOS ANÁLISIS REALIZADOS DURANTE TRES
AÑOS A PARTIR DE LOS DATOS DEL GRAVÍMETRO
SUPERCONDUCTOR SG064**

Beatriz Córdoba Hita¹, Javier López Ramasco

INFORME TÉCNICO IT - CDT 2015-1

¹ Becaria del Instituto Geográfico Nacional hasta Abril de 2014

Contenidos

1.	Introducción.....	2
2.	Características del SG064.....	3
2.1.	Cálculo del factor de calibración	3
2.2.	Retardo de la señal	4
2.3.	Nivel de ruido de la estación.....	6
3.	Análisis y evolución de los datos	9
4.	Estimación del modelo de marea en el pabellón de gravimetría de Yebes	15
5.	Conclusiones.....	19
6.	Referencias	20

1. Introducción

Los gravímetros superconductores son un tipo de gravímetros relativos usados principalmente para realizar estudios de marea debido a su alta sensibilidad y poca deriva. Consisten en una masa esférica que se encuentra levitando en un campo magnético generado por corrientes que circulan en dos bobinas de niobio que son superconductoras a 4.2K (Helio líquido), de manera que pequeñas variaciones en la gravedad producirán “grandes desplazamientos” de la masa que originan una señal de error que se utiliza como realimentación para, a través de otra bobina superconductora, volver a llevar la masa a su posición de reposo. Estos instrumentos pueden llegar a medir con una precisión de $0.01 \mu Gal$.

En Diciembre de 2011 fue instalado en el pabellón de gravimetría de Yebe el primer gravímetro superconductor, SG064, en la Península Ibérica. Desde entonces ha estado registrando de forma ininterrumpida. Sus datos son mandados mensualmente a la red internacional de gravímetros superconductores GGP (Global Geodynamics Project). El bajo ruido alcanzado por estos instrumentos en diferentes bandas permite estudiar nuevas señales de amplitudes muy pequeñas que con otros gravímetros no pueden ser detectadas.

En el siguiente informe se hace una recopilación de las características principales del gravímetro superconductor SG064 obtenidas desde la instalación del instrumento, así como un análisis de los datos obtenidos del gravímetro desde su instalación hasta Diciembre de 2014 a partir de unos residuales calculados. Con los datos corregidos se calculará también un nuevo modelo de mareas más preciso.

Entre las características principales obtenidas del gravímetro se encuentran la función de transferencia del instrumento, el factor de calibración y el nivel de ruido de la estación.

2. Características del SG064

Dentro de las características principales de un gravímetro superconductor cabe destacar el retardo de la señal o “*time delay*” obtenido a partir de la función de transferencia, el factor de calibración obtenido a partir de la comparación de medidas con un gravímetro absoluto y el nivel de ruido de la estación. A continuación vamos a describir brevemente cada una de las características citadas mostrando los resultados obtenidos en el caso del SG064.

2.1. Cálculo del factor de calibración

La salida de datos brutos del gravímetro superconductor es proporcionada en Voltios y para pasar a unidades de gravedad es necesario calcular un factor de calibración o factor de amplitud. Existen diversas metodologías de calcular dicho factor pero una de las más precisas es comparando durante un intervalo de tiempo las medidas del gravímetro superconductor con un gravímetro absoluto. La elección del tiempo de observación no ha de ser aleatoria si no que debe ser hecha cuando la marea esté en su punto máximo. Si representamos los datos del gravímetro absoluto frente a los datos del gravímetro superconductor en una gráfica la pendiente de la recta ajustada será el factor de calibración que buscamos. El ajuste se puede realizar mediante mínimos cuadrados.

Para calibrar el gravímetro superconductor SG064 se puso a medir el gravímetro absoluto FG5#211 de forma simultánea en el pabellón de gravimetría durante cinco días entre el 20 y el 25 de Enero de 2012 coincidiendo este periodo con un máximo en la marea. Los datos comparados se pueden ver en la siguiente gráfica:

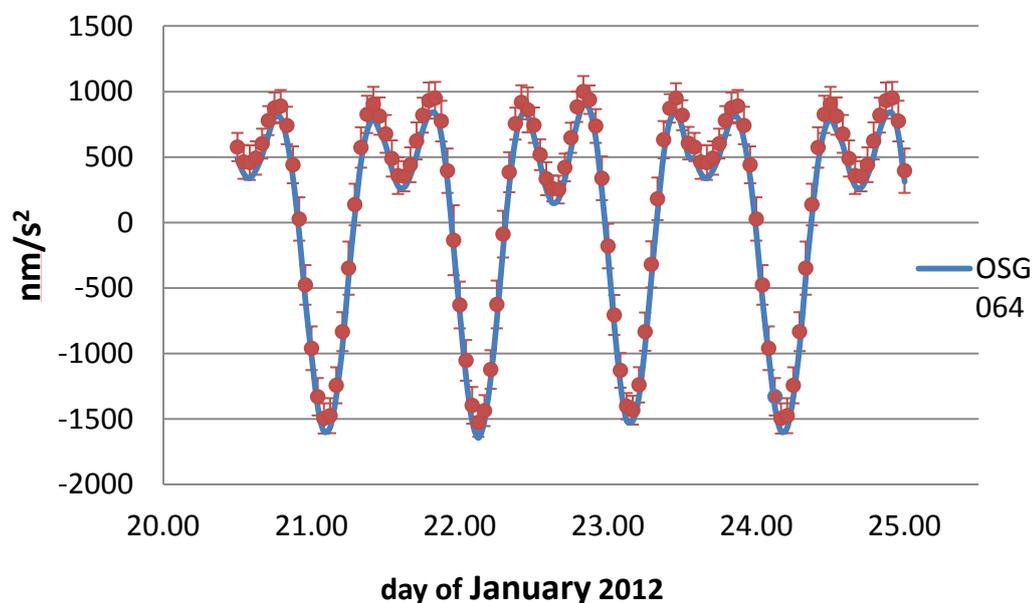


Figura 2.1

Como ya hemos señalado a partir de la representación de los datos del gravímetro absoluto frente a los datos del gravímetro superconductor obtenemos el factor de calibración a partir de la pendiente de la recta ajustada:

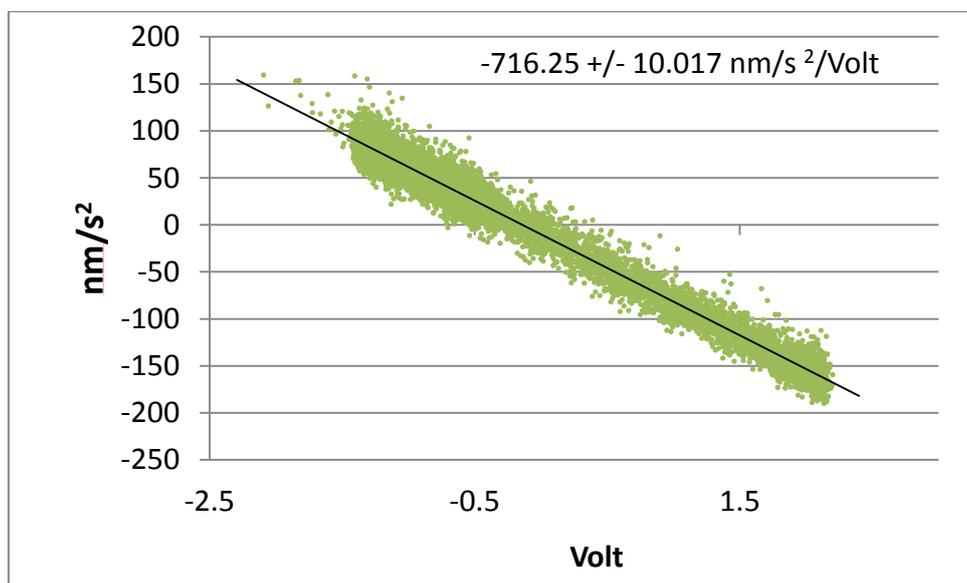


Figura 2.2

De esta manera el factor de calibración obtenido fue de $-716.25 \pm 10.017 \frac{\text{nm}^2}{\text{s}} / \text{Volt}$. Se puede observar que la desviación estándar es demasiado alta y sería conveniente repetir las medidas de calibración, pero debido a diversos problemas técnicos con el gravímetro absoluto, esto no ha sido posible desde entonces.

2.2. Retardo de la señal

Los gravímetros superconductores están dotados de un sistema electrónico y como la mayoría de los sistemas electrónicos, hacen que la señal de entrada en el aparato se perturbe tanto en amplitud (debido a pérdidas, filtrados,...) como en fase (debido a que tanto la electrónica digital como la analógica introducen retrasos), de manera que la señal de salida aparece alterada en amplitud y fase. Al retraso que sufre la señal registrada por el gravímetro se la conoce como *time lag* y para calcularla se utilizó lo que se conoce como Función de Transferencia que es un modelo matemático que relaciona la respuesta de un sistema respecto a una señal de entrada o excitación. Para llevar a cabo el experimento se introdujo un Voltaje conocido (función step) en el feedback del sensor del gravímetro, y se analizó la salida del sistema. El experimento fue realizado el día 24 de Mayo de 2012 desde las 8:30 UTC hasta las 12:00 aproximadamente. De manera que para calcular la función de transferencia hemos utilizado 20 saltos.

En la primera de las siguientes figuras (Figura 2.3) vemos la señal bruta de salida en la que aparecen los saltos introducidos afectados por la gravedad mientras que en la segunda (Figura 2.4) vemos los residuales calculados eliminando la marea, la carga oceánica y la presión atmosférica:

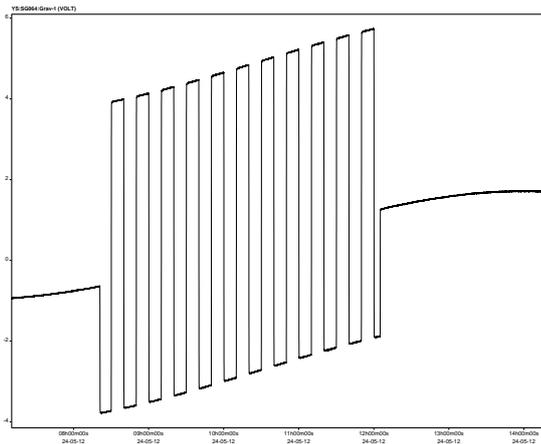


Figura 2.3

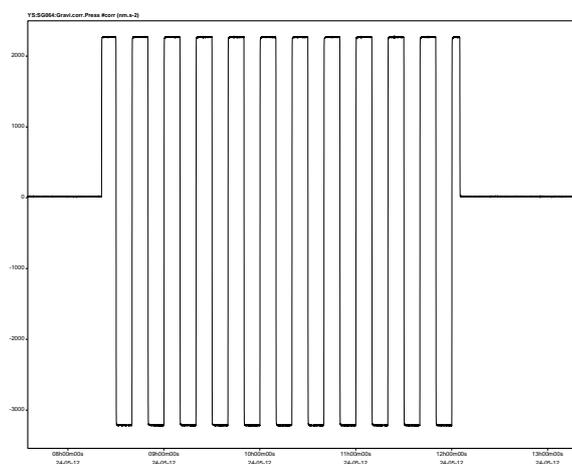


Figura 2.4

Los resultados fueron contrastados con dos programas llegando en ambos casos a los mismos resultados y concluyendo que el retraso (*time delay*) en las frecuencias cercanas a las ondas de marea principales es de aproximadamente 9 segundos.

El comportamiento de la amplitud a diferentes frecuencias se muestra en la siguiente gráfica:

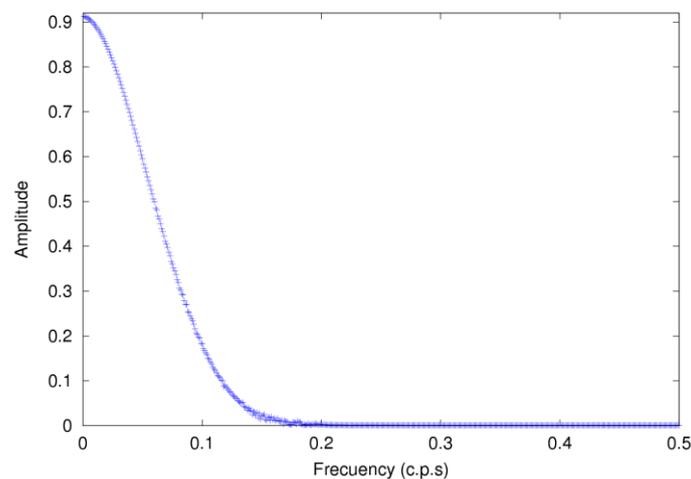


Figura 2.5

A continuación se puede observar el retraso de la señal según las diferentes frecuencias en las frecuencias de las ondas principales de marea:

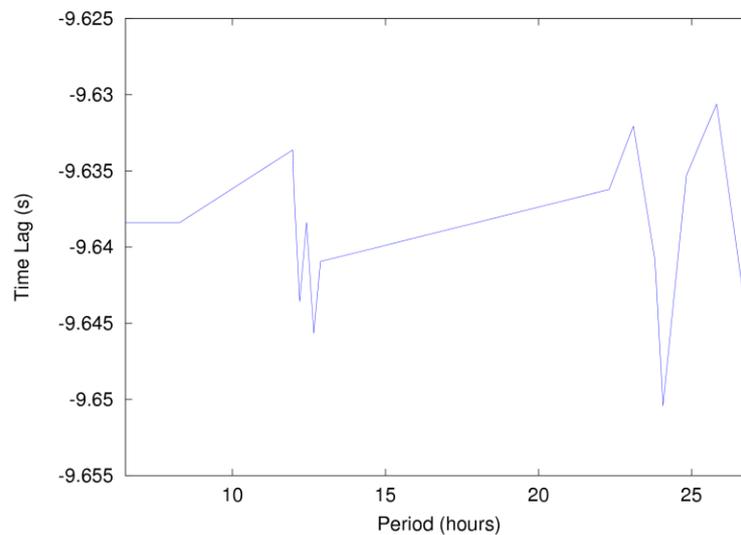


Figura 2.6

2.3. Nivel de ruido de la estación

Para caracterizar y dar una medida del nivel de ruido de una estación gravimétrica se desarrolló el concepto de Magnitud de Ruido Sísmico. Esta medida se consigue principalmente juntando los cinco días de registro con más bajo nivel de ruido y obteniendo a partir de ellos la densidad espectral de potencia del ruido en la banda de frecuencias de 0.05-20mHz (50 s a 6 h). Una vez obtenida la medida se compara con el Nuevo Modelo de Referencia de Bajo Ruido (NLMN, Peterson, 1993) calculado a partir de sismómetros distribuidos por toda la Tierra estimando así la calidad tanto del emplazamiento como del sensor gravimétrico.

Para estimar el nivel de ruido de la estación gravimétrica de Yebes se tomaron los datos registrados por el gravímetro desde Enero hasta Octubre de 2013, esto es un total de 304 días. El nivel de ruido viene representado por la Densidad Espectral de Potencia (PSD) que podemos ver representada en la siguiente gráfica:

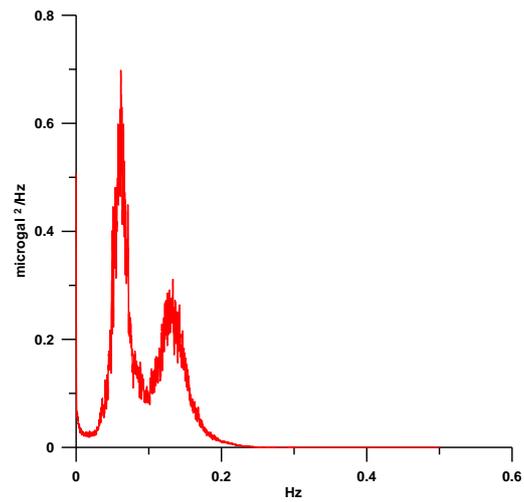


Figura 2.7

En la siguiente gráfica se puede ver la PSD obtenida comparada con el modelo NLMN:

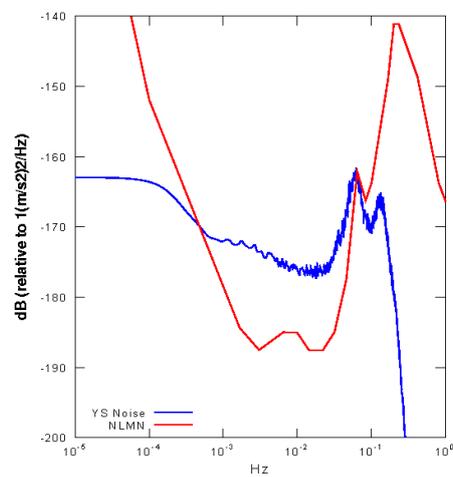


Figura 2.7

Ampliando la zona que nos interesa en el intervalo de frecuencias 10^{-5} - 10^{-2} Hz:

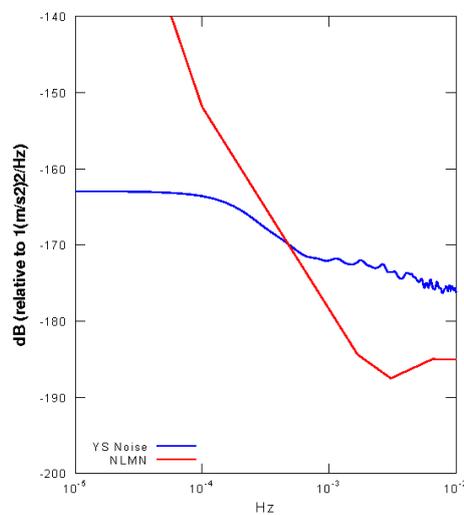


Figura 2.8

En la siguiente gráfica (Rosat et al.), se compara el ruido de la estación de Yebes con otras 19 estaciones pertenecientes a la red GGP (Global Geodynamics Project). En ella se puede ver como la estación de Yebes se encuentra dentro del rango de ruido delimitado por el resto de las estaciones. El decrecimiento observado en las altas frecuencias es debido a la aplicación de un filtro de paso bajo en los datos en bruto para decimar el muestreo a 1 minuto.

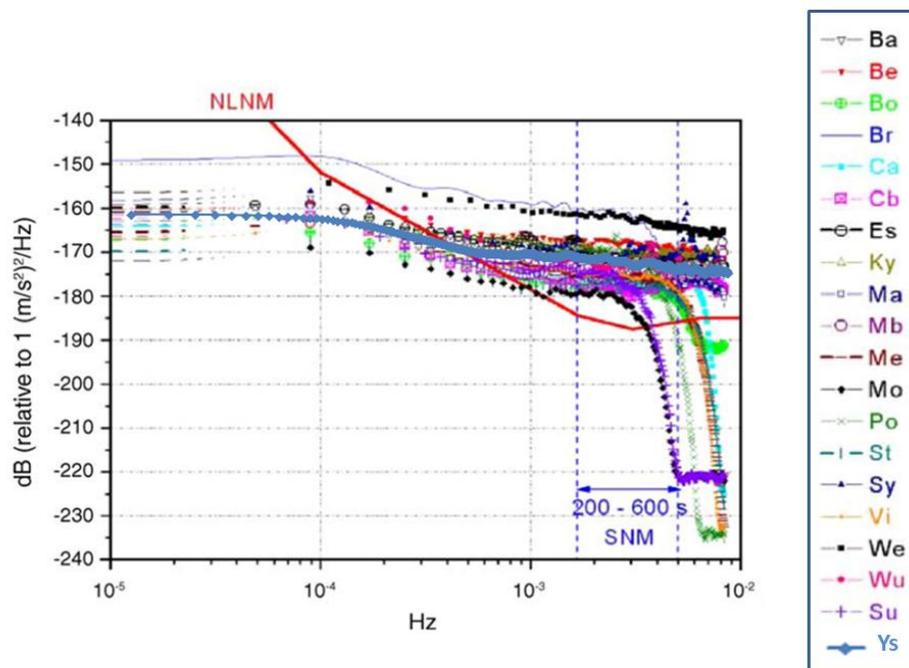


Figura 2.9

Observando la gráfica podemos ver que el comportamiento de la estación se encuentra dentro de la media. Los efectos que determinan este valor de ruido deben seguir siendo investigados. Uno de los efectos se debe probablemente al hecho de la ubicación de Yebes en el centro de la Península Ibérica, rodeada de mares y océanos, lo que propicia que la carga oceánica sea considerable y contribuya a aumentar el nivel de ruido de la estación.

3. Análisis y evolución de los datos

Desde la instalación del SG064 se han realizado análisis periódicos que nos muestran la evolución de los datos. A continuación se muestra la serie de datos en bruto desde que se instaló el gravímetro hasta el 31 de Diciembre de 2014, esto es, más de 3 años de datos:

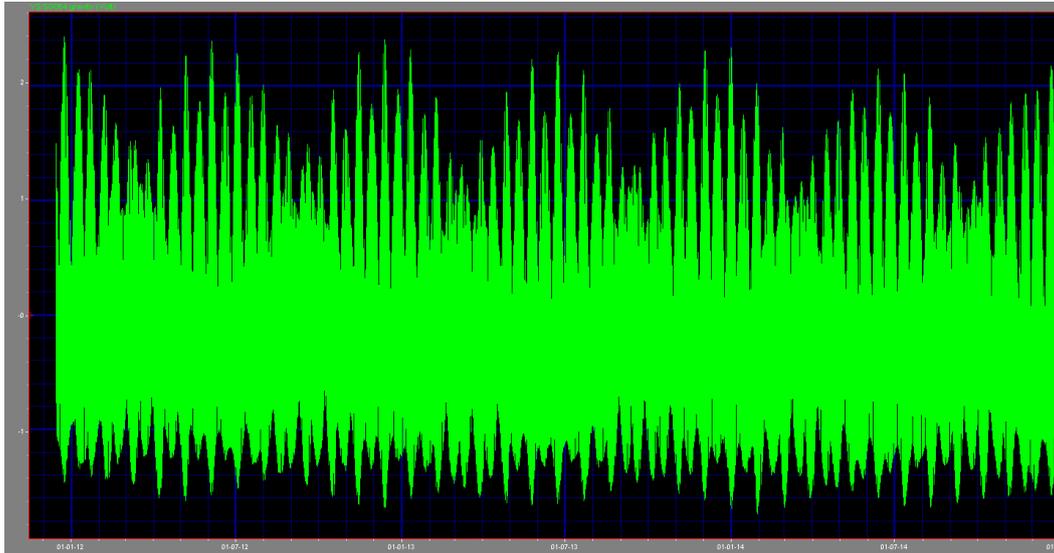


Figura 3.1

Para estudiar la evolución de los datos, es necesario realizar un análisis de los residuales. Para su cálculo los datos han sido corregidos de marea teórica y carga oceánica, (con un modelo de marea anterior), carga atmosférica y movimiento del polo.

El factor de calibración usado para convertir la señal de voltios a gravedad ha sido $-716.25 \frac{nm}{s^2} / Volt$ y el factor de admitancia usado para corregir los datos de la presión atmosférica ha sido $3.3 \frac{nm}{s^2} / Hpascal$.

Los residuales obtenidos se muestran en la siguiente figura:

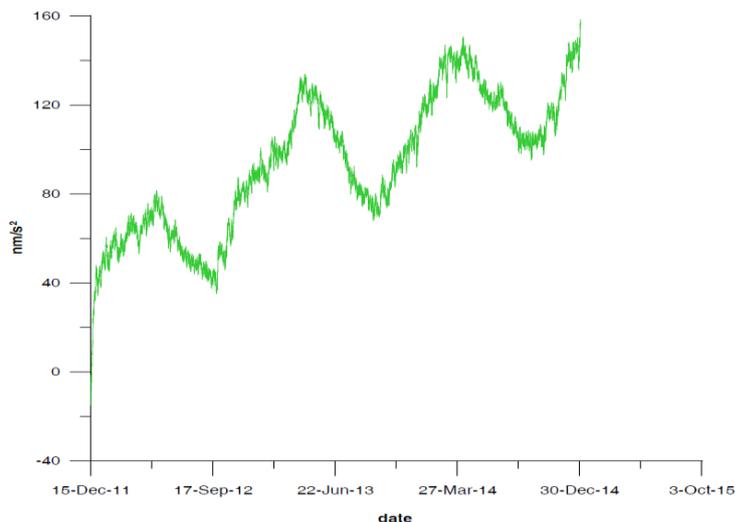


Figura 3.2

A estos residuales no se les ha eliminado todavía el efecto hidrológico que produce la variación del agua acumulada en el suelo. El efecto más influyente en los residuales se produce por el agua acumulada en las zonas más superficiales del subsuelo. Por este motivo a partir de los datos de lluvia hemos calculado el efecto hidrológico con un modelo exponencial que se muestra a continuación:

$$h_i = \sum_{j < i+1} r_j (1 - e^{-(i-j)/\tau_1}) e^{-(i-j)/\tau_2}$$

$$g_i = 2\pi G \rho h_i$$

donde:

r_j es la cantidad de lluvia en la hora j (es decir suma todos los datos de lluvia producidos en una hora).

h_i es la profundidad del acuífero en la hora i .

g_i observación de la gravedad en la hora i .

ρ es la constante de densidad que en el caso del agua es: $\rho = 1.0 \text{ gm/cm}^3$.

τ_1 es la constante de tiempo de recarga.

τ_2 es la constante del tiempo de descarga.

G es la constante de gravitación universal.

De manera que la influencia producida por el agua en la gravedad viene dada por:

$$\Delta g_i = 2\pi G \rho \sum_{j=1}^{i-1} r_j (1 - e^{-(i-j)/\tau_1}) e^{-(i-j)/\tau_2}$$

Las constantes τ_1 y τ_2 han sido estimadas de manera que se ha considerado $\tau_1 = 0.77 \text{ horas}$ y $\tau_2 = 5781.6 \text{ horas} \cong 240 \text{ dias}$.

La gráfica de las lluvias producidas (azul oscuro) en mm y el efecto del agua acumulada a partir de las precipitaciones (azul claro) en nm/s^2 se muestran en la siguiente gráfica:

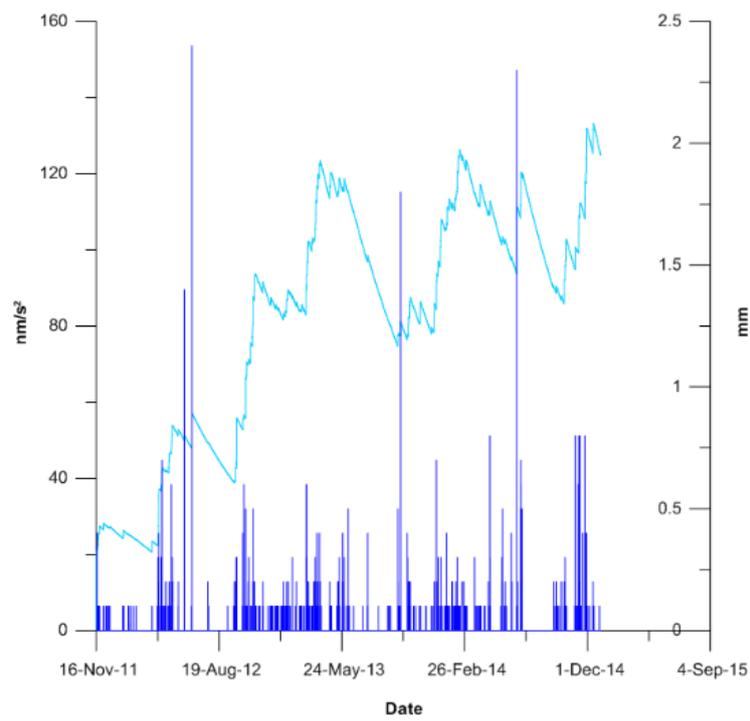


Figura 3.3

En la siguiente gráfica podemos ver el efecto hidrológico comparado con los residuales de gravedad:

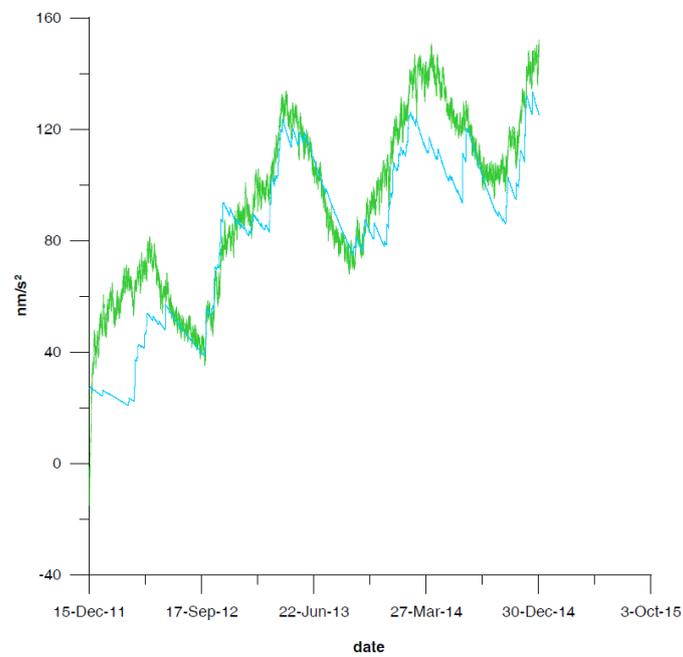


Figura 3.4

Se observa una clara correlación anual entre los residuales y el efecto hidrológico de manera que si eliminamos dicho efecto los residuales que nos quedan ofrecen un aspecto mucho más plano:

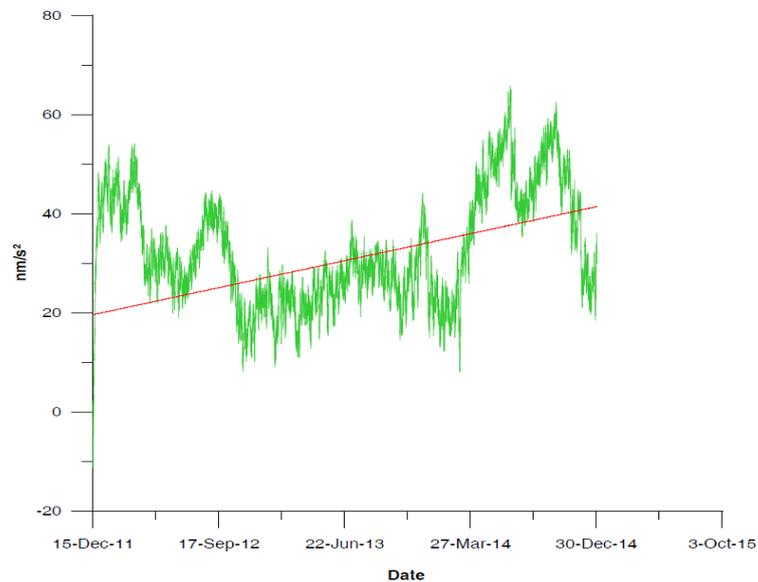


Figura 3.5

En la gráfica anterior la línea roja representa la derivada lineal de los residuales. En realidad los primeros meses de datos tienen una derivada exponencial con una parte lineal, pero en este caso para calcular la derivada hemos omitido los primeros meses de datos hasta que el gravímetro dejó de presentar dicha derivada exponencial. Por este motivo para calcular la derivada se han considerado los datos desde el 1 de Mayo de 2012, considerado así, únicamente la parte lineal. En la siguiente gráfica se puede ver la derivada comparada con los residuales de gravedad desde la fecha en la que han sido considerados los datos para calcularla:

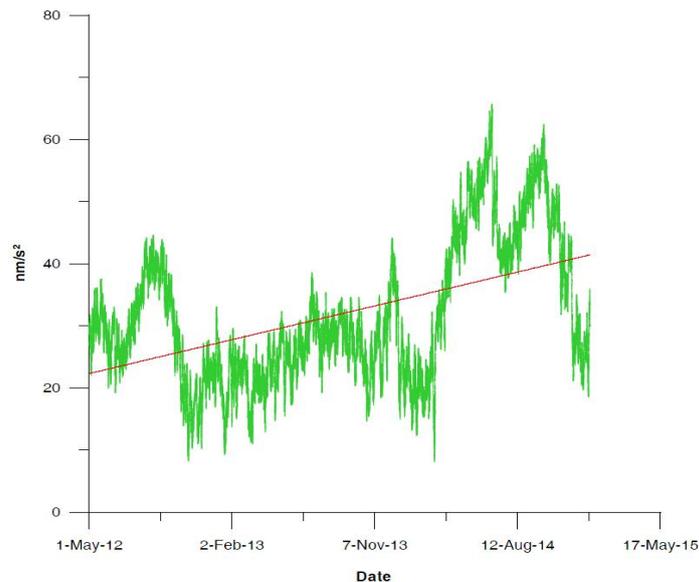


Figura 3.6

Se puede observar que la deriva estimada una vez eliminados todos los efectos conocidos es inferior a $2\mu Gal$ en más de 2 años, esto es menos de $1\mu Gal/año$ lo que está por debajo de los límites de la deriva normal que pueda tener un gravímetro superconductor ($6\mu Gal/año$). Viendo la gráfica podemos preguntarnos si realmente la deriva estimada es deriva o simplemente algún efecto que no ha sido bien eliminado de los residuales, sobre todo durante 2014 donde parece existir algún fenómeno hidrológico que no haya sido bien eliminado. La forma correcta de clarificar dicha deriva hubiese sido comparando los datos del superconductor con medidas absolutas de gravedad a partir, por ejemplo, de un gravímetro absoluto FG5. Sin embargo esto no ha sido posible debido a diversos problemas que han surgido con dicho instrumento a lo largo de todo este tiempo, siendo las medidas realizadas poco fiables.

Finalmente si eliminamos esta supuesta deriva lineal obtenemos los siguientes residuales finales de gravedad:

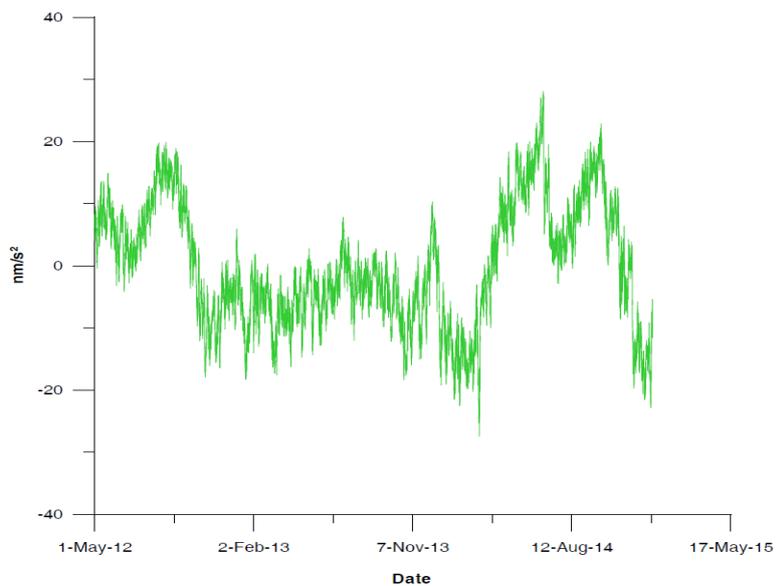


Figura 3.7

4. Estimación del modelo de marea en el pabellón de gravimetría de Yebes

Obtener un modelo de mareas preciso es uno de los principales objetivos de la gravimetría en un observatorio geodésico. A partir de él se puede proceder al cálculo de unos buenos residuales y a partir de ahí realizar estudios sobre nuevas señales de amplitud muy pequeña como son los Modos Normales Sísmicos, el Triplete de Slichter, la Nutación del Núcleo o los Modos del Núcleo llamadas también ondas inercia-gravitacionales. Además también es importante para realizar estudios sobre la interacción de entre la atmósfera y la Tierra sólida, así como en estudios de hidrología.

Cuanto mayor es el registro ininterrumpido de una serie de datos de un gravímetro superconductor mejor será el modelo de marea estimado, pues la precisión de las ondas estimadas será mayor y se podrán separar más grupos de ondas.

En este apartado se muestran los resultados de los modelos de mareas estimados en el pabellón de gravimetría de Yebes a partir de la serie de datos del gravímetro superconductor SG064. Para ello se ha reconstruido la señal, a partir de los residuales corregidos y se ha hecho el cálculo de mareas con el programa Eterna. Para dicho cálculo se ha utilizado la señal de marea sin corregir de presión utilizando la corrección atmosférica que proporciona el propio programa. Se han realizado diversos análisis utilizando para ello distintos grupos de ondas. A continuación se muestran dos de dichos análisis de mareas con separaciones de grupos de ondas distintos:

Average noise level at frequency bands in nm/s**2
 0.1 cpd 0.241203 1.0 cpd 0.028934 2.0 cpd 0.021034
 3.0 cpd 0.008029 4.0 cpd 0.005238 white noise 0.015233

adjusted tidal parameters :

from [cpd]	to [cpd]	wave [nm/s**2]	theor. ampl.	ampl. fac.	stdv.	ph. lead [deg]	stdv. [deg]
0.000146	0.020884	SA	7.8325	0.96882	0.40359	-25.9554	18.2720
0.020885	0.054747	MM	8.8923	1.13869	0.04115	0.2428	2.0838
0.054748	0.091348	MF	16.8351	1.13066	0.02230	0.2139	1.1313
0.091349	0.501369	MTM	3.2234	1.11830	0.06892	5.5206	3.5363
0.501370	0.911390	Q1	58.7545	1.15452	0.00044	-0.9062	0.0218
0.911391	0.947991	O1	306.8689	1.14681	0.00009	-0.2424	0.0043
0.947992	0.981854	M1	24.1213	1.15511	0.00100	0.6537	0.0498
0.981855	0.998631	P1	142.7616	1.14666	0.00016	0.3265	0.0080
0.998632	1.023622	K1	431.3948	1.13417	0.00006	0.4105	0.0029
1.023623	1.057485	J1	24.1301	1.15892	0.00111	0.1280	0.0547
1.057486	1.470243	001	13.1996	1.15869	0.00272	-0.0257	0.1347
1.470244	1.880264	2N2	13.2819	1.07788	0.00100	3.8865	0.0530
1.880265	1.914128	N2	83.1615	1.11833	0.00021	4.9928	0.0105
1.914129	1.950419	M2	434.3410	1.15025	0.00004	4.4250	0.0019
1.950420	1.984282	L2	12.2779	1.17164	0.00088	2.3415	0.0429
1.984283	2.002736	S2	202.0597	1.18064	0.00008	2.7166	0.0041
2.002737	2.451943	K2	54.9064	1.17906	0.00037	2.9775	0.0181
2.451944	7.000000	M3M6	6.4912	1.06344	0.00091	-0.6079	0.0490

Adjusted meteorological or hydrological parameters:

no.	regr. coeff.	stdv.	parameter	unit
1	-2.91435	0.00151	airpress.	nm/s**2 / hPa

Adjusted TSCHEBYSCHIEFF polynomial bias parameters :

block	degree	bias	stdv.
-------	--------	------	-------

Standard deviation: 10.183 nm/s**2
 Degree of freedom: 1403949
 Maximum residual: 29.081 nm/s**2
 Maximum correlation: 0.368 Y-wave-SA with X-wave-SA
 Condition number of normal equ. 2.300

En ambos casos se puede observar que las ondas de largo periodo, estas son la SA, SSA, MM, MF y MTM no quedan estimadas realmente bien, de manera que en el caso de estas ondas seguiremos utilizaremos sus valores teóricos. Esto es debido a que necesitamos un registro más largo de datos para que estas ondas queden bien estimadas.

El ajuste con ETERNA también nos permite estimar el factor de admitancia estando en torno a $2.9 \frac{nm}{s^2} / hPa$. Dicho factor podrá ser utilizado en posteriores cálculos de residuales.

En resumen las amplitudes y las fases de las ondas principales de mareas con sus precisiones quedan expuestas en la siguiente tabla:

MODELO DE MAREAS ESTIMADO DE YEBES			
Wave Group	Amplitude (nm/s²)	δ	Phase lead (°)
O1	306.8689	1.14681 ± 0.00009	-0.2424 ± 0.0043
P1	142.7616	1.14666 ± 0.00016	-0.3265 ± 0.0080
M1	24.1213	1.15511 ± 0.00100	0.6537 ± 0.0498
K1	431.3948	1.13417 ± 0.00006	0.4105 ± 0.0029
M2	434.3410	1.15025 ± 0.00004	4.4250 ± 0.0019
S2	202.0597	1.18064 ± 0.00008	2.7166 ± 0.0041
K2	54.9064	1.17906 ± 0.00037	2.9775 ± 0.0181
M3	6.4912	1.06344 ± 0.00091	-0.6079 ± 0.0490

5. Conclusiones

En el presente informe se ha realizado un resumen del estado del gravímetro superconductor SG064, así como de sus características principales después de tres años de registro ininterrumpido. Se han analizado los residuales de los datos y se ha observado que el comportamiento de dichos residuales es bastante bueno. Sin embargo quedan preguntas abiertas sobre el comportamiento de la deriva y sobre posibles efectos que no hayan sido eliminados. En un futuro con la ayuda de un sensor de humedad y un sensor que mide el nivel de agua en un acuífero situado a unos 40 metros de profundidad del pabellón de gravimetría se intentará estudiar de una forma más exacta el efecto hidrológico sobre los residuales de gravedad. Del mismo modo para contrastar la deriva serán necesarias inter-comparaciones con gravímetros absolutos.

En cuanto a los modelos de marea obtenidos podemos concluir que las ondas diurnas y semidiurnas principales quedan muy bien estimadas al contrario de las ondas mensuales y anuales para lo que necesitaremos un registro más largo de datos.

6. Referencias

- Banka, D., Crossley, D., 1999. "Noise levels of superconducting gravimeters at seismic frequencies", *Geophys. J. Int.*, 139, 87-97.
- Córdoba, B., Serna, J.M., López-Fernández, J.A., Informe Técnico IT-CDT-2013-12, 2013, "Cálculo del nivel de ruido de la estación gravimétrica de Yebes a partir de los datos del gravímetro superconductor SG064".
- Córdoba, B., López, J., Informe Técnico IT-CDT-2013-10, 2013, "Primera aproximación a la eliminación del efecto hidrológico en los residuales de gravedad del gravímetro superconductor SG064".
- Córdoba, B., Calvo, M., Serna, J.M., López, J.A., Informe Técnico IT-CDT 2012-19, 2012, "Función de Transferencia del Gravímetro Superconductor SG064."
- Crossley, D.J., Xu, S., 1998, "Comprehensive Analysis of 2 years of SG Data from Table Mountain, Colorado", *Geophys. J. Int.*, 135, 835-844.
- Eaton, J., Bateman, D., Hauberg, S., 2008. "GNU Octave Manual, Version 3", Network Theory Limited.
- Peterson, J., 1993. "Observations and Modeling of Seismic Background Noise", U.S. Geol. Surv. Open-file Reot, 93-322, 1-45.
- Pillai, H., 2007. "Automated system for introducing step voltages in to the feedback loop circuit of a superconducting gravimeter sensors for the time lag calculations and spectrum analysis".
- Rosat, S., Hinderer, J., Crossley, D., Boy, J.P., 2004. "Performance of Superconducting gravimeters from long-period seismology to tides", *Journal of Geodynamics*, 38, 461-476.
- Van Camp, M., Wenzel, H., Schott, P., Vauterin, P., Francis, O., 2000. "Accurate transfer function determination for superconducting gravimeters", *Geophysical Research Letters*, Vol. 27, NO. 1, 37-40.
- Widmer-Schmidrig, R., 2003. "What Can Superconducting Gravimeters Contribute to Normal-Mode Seismology", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93, No. 3, 1370-1380.