



Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

Tesis de Grado en Geofísica

VARIACIÓN DE LA GRAVEDAD DURANTE EL
ECLIPSE DE SOL DEL 14 DE DICIEMBRE DEL
2020

María Juliana Toledo

Director: Luis Guarracino

LA PLATA, ARGENTINA

A mi abuela, Tita.

Agradecimientos

A mi director, Luis, que me acompañó hasta el final con todo el entusiasmo, paciencia y cariño.

A mi abuela Tita, que nos crió a Flor y a mí con el mayor amor y dedicación que una abuela puede tener. Este logro es tuyo.

A Flor, que me conoce más que yo misma y es mi persona en el mundo.

A mi mamá, que jamás dudó de mí y siempre me alentó a crecer con un amor incondicional.

A mi papá, que es mi gran maestro de vida.

A mi hermanito, Franquito, que cuando crezca va a decir con orgullo que tiene dos hermanas geofísicas.

A Romi, que es la guardiana de mi salud mental y ya es mi familia.

A Martín, que me ayuda en la vida entera desde mi primer día en la facultad, sos mi cable a tierra.

A Pipi, Lali y Cami, que me alentaron siempre que mis metas se veían lejos.

A Alesti y Calvet, mis amigos preciados con los que no sólo aprendí finales sino también lo que son los buenos amigos.

A Viqui, que me llamaba desde Bariloche para tomarme oral antes de rendir y tranquilizarme siempre.

A Manu, que es la voz de la razón en mi cabeza, sos mi Pepe grillo.

A Debo, Valen, Sol, Soly y Bren que siempre están ahí para despejar mi cabeza y hacerme reír con ganas.

Al Puma, Feli, Tomi, Marco y Humo, con los que compartí incontables asados y todos estos años de amistad.

A Juli Godoy que me solucionó la vida más de una vez en la facultad, siempre dispuesta y con amor y dedicación.

A todas las personas de la FCAGLP, profesores, alumnos, no docentes, con los que pasé años inolvidables y me acompañaron en este camino tan lindo.

Resumen

El tránsito astronómico es un fenómeno durante el cual un astro pasa por delante de otro más grande, bloqueando en cierta medida su visión. El tipo de tránsito más conocido, por su espectacularidad, es el eclipse solar, donde es la Luna la que cubre la vista del Sol.

El objetivo de este trabajo es analizar, desde un punto de vista teórico y observacional, el efecto del eclipse solar que tuvo lugar el 14 de diciembre del 2020 sobre la gravedad terrestre en las localidades de La Plata y Berazategui para obtener registros del evento y sumar a la comunidad geofísica información de utilidad para el estudio de los parámetros elásticos del planeta.

El estudio se realizó a partir de la recopilación de dos series de datos temporales de gravedad independientes, siendo la primera serie los datos del gravímetro relativo superconductor SG038 del Observatorio Argentino Alemán de Geodesia (AGGO) y la segunda serie los datos obtenidos con un gravímetro relativo Lacoste & Romberg Modelo D. Los datos fueron comparados entre si y contrastados con estimaciones teóricas de un modelo gravimétrico basado en las fórmulas clásicas de Longman para modelos de Tierra rígida y elástica.

Los resultados obtenidos no solo contribuyen al conocimiento de las anomalías de gravedad asociadas a un eclipse, sino también a determinar el rol que juegan los parámetros elásticos en las variaciones locales de gravedad. El rango de variación máxima del evento fue de aproximadamente 307 microgales.

Índice general

1. Introducción	9
1.1. Objetivos de la tesis	9
1.2. Eclipses	10
1.3. Eclipse del 14 de diciembre del 2020	11
1.4. Gravedad	13
1.5. Mareas	14
2. Modelos teóricos	18
2.1. Modelo para una Tierra rígida	18
2.2. Modelo para una Tierra elástica	20
2.3. Parámetros elásticos	23
3. Datos observacionales	25
3.1. Datos de variaciones de gravedad en La Plata	25
3.2. Corrección atmosférica (CA)	26
3.3. Datos del gravímetro superconductor SG038	27
4. Análisis de resultados y discusión	31
4.1. Eclipse en La Plata	31
4.2. Eclipse en AGGO	34
4.3. Parámetros elásticos	38
4.4. Relación con los datos de mareas	43
5. Conclusiones	44

Índice de figuras

1.1.	Figura 1.1: Esquema de la posición de los astros durante un eclipse.	11
1.2.	Figura 1.2: Imagen que muestra el área donde el eclipse del 14 de diciembre del 2020 fue visible. Esta fue tomada de la página "Time and Date", la cual permite modelar la visibilidad del eclipse para cualquier ciudad del mundo (ver https://www.timeanddate.com/eclipse/in/argentina/la-plata?iso=20201214). La posición resaltada en la imagen es la ciudad de La Plata, nuestro sitio de interés para el estudio. A izquierda abajo se observa una escala de colores con intención de graduar la visibilidad del eclipse, siendo el color más oscuro 100 % de ocultamiento solar.	12
1.3.	Figura 1.3: Foto tomada desde la ciudad de La Plata durante el evento por el fotógrafo Gerardo Páez en el momento del máximo ocultamiento solar.	12
1.4.	Figura 1.4: Fotos de las distintas etapas del evento tomadas desde la ciudad de La Plata por el fotógrafo Gerardo Páez.	13
1.5.	Figura 1.5: Aceleraciones implicadas en la señal de mareas.	15
1.6.	Figura 1.6: Aceleraciones implicadas en el sistema Tierra-Luna.	16
1.7.	Figura 1.7: Datos de mareas del Río de La Plata durante el día 14/12/2020.	17
2.1.	Figura 2.1: Modelo para una Tierra rígida en la ubicación de AGGO ($L^{AGGO,rig}$).	20
2.2.	Figura 2.2: Modelo para una Tierra elástica en la ubicación de AGGO ($L^{AGGO,def}$) junto con el modelo para Tierra rígida ($L^{AGGO,rig}$).	22
2.3.	Figura 2.3: Comparación entre los modelos de AGGO ($L^{AGGO,def}$) y Ramos Mexía ($L^{RM,def}$) para una Tierra elástica para el día del eclipse.	23

3.1.	Figura 3.1: Datos de gravedad muestreados por el gravímetro relativo Lacoste & Romberg modelo D (DLR).	26
3.2.	Figura 3.2: Variaciones de gravedad producidas por los cambios de presión atmosférica.	27
3.3.	Figura 3.3: En celeste, datos crudos de la estación gravimétrica. En violeta, datos filtrados por un promedio móvil, corregidos por su valor medio y por las variaciones de presión atmosférica.	29
3.4.	Figura 3.4: Gráfico tomado del Marduk Atronomía 2010.	30
4.1.	Figura 4.1: Comparación entre el modelo de Longman para una Tierra rígida en la ubicación de la ciudad de La Plata ($L^{LP,rig}$) y las observaciones del gravímetro relativo Lacoste & Romberg (DLR).	31
4.2.	Figura 4.2: Diferencia entre los datos observacionales y el modelo de Tierra rígida.	32
4.3.	Figura 4.3: Comparación entre el modelo de Tierra elástica en la ubicación de la ciudad de La Plata ($L^{LP,def}$) y las observaciones del gravímetro relativo Lacoste & Romberg (DLR).	33
4.4.	Figura 4.4: Diferencia entre el modelo para una Tierra elástica y las mediciones en la ciudad de La Plata.	34
4.5.	Figura 4.5: Comparación entre los datos de AGGO corregidos (en violeta) y el modelo de Longman para una Tierra rígida (en naranja).	35
4.6.	Figura 4.6: Diferencia entre los datos de AGGO corregidos y el modelo de Longman para una Tierra rígida.	35
4.7.	Figura 4.7: Comparación entre los datos de AGGO corregidos (en violeta) y el modelo para una Tierra elástica con los parámetros elásticos de Longman (1963) (en verde).	36
4.8.	Figura 4.8: Diferencias entre el modelo de Longman para una Tierra elástica y los datos corregidos de AGGO.	37
4.9.	Figura 4.9: Comparación entre los datos de LP (DLR) y el modelo de Longman para una Tierra elástica mejorada por los nuevos parámetros de Love (L_{defm}).	38
4.10.	Figura 4.10: Diferencia entre los datos de LP (DLR) y el modelo de Longman para una Tierra elástica mejorada por los nuevos parámetros de Love (L_{defm}).	39
4.11.	Figura 4.11: Modelo de Tierra elástica con mejores parámetros elásticos para la ubicación de AGGO (L^{defm}) vs datos del gravímetro Superconductor SG038 (DGS_{corr}).	40

4.12. Figura 4.12: Diferencias entre el modelo de Longman para una Tierra elástica con los números de Love calculados por Rutkowska y Jagoda (2010) y los datos corregidos de AGGO.	41
4.13. Figura 4.13: Diferencias entre los modelos de TR, TD y TD mejorada.	42
4.14. Figura 4.14: Diferencias entre los modelos de TD y TD mejorada. . .	42
4.15. Figura 4.15: Datos de mareas contrastados con las diferencias del gravímetro superconductor SG038 de AGGO y el modelo mejorado a partir de los números de Love calculados por Rutowska y Jagoda (2010).	43

Capítulo 1

Introducción

Las mediciones del campo de gravedad terrestre han constituido una fuente de información fundamental para el estudio de la forma del planeta Tierra y su estructura interna.

Con el avance del conocimiento del campo de gravedad se empezaron a identificar los elementos que influenciaban al mismo, y de este modo, los modelos de gravedad del planeta se volvieron más exactos. Esto permitió llegar a resultados de mayor exactitud y confiabilidad en cuanto a la predicción de valores de gravedad en función de la ubicación y el momento en el que desee medirse. Los modelos permitieron obtener un dato confiable sin la necesidad de medir de manera observacional cada área en el cual se aspire a conocer el valor de gravedad; esto por supuesto será válido en estudios de carácter global y no local.

La aceleración de mareas tiene una importante influencia en el campo de gravedad del planeta. Esta aceleración es causada por la atracción gravitacional de los astros Sol y Luna mayoritariamente y depende de la masa de los cuerpos implicados y de su ubicación espacial. Durante un eclipse este efecto es máximo.

En el año 1959, Longman (1959) presenta detalladas fórmulas para describir el campo de gravedad a partir de las cuales se pueden calcular las aceleraciones de las mareas debidas a la Luna y al Sol en un momento dado para cualquier punto de la superficie terrestre sin hacer referencia a tablas. El modelo propuesto por Longman es el primero en utilizar sólo efemérides para predecir valores de gravedad.

1.1. Objetivos de la tesis

En este trabajo se busca analizar de forma teórica y observacional el efecto que tuvo el eclipse producido el 14 de diciembre del 2020 sobre la gravedad terrestre. Con este fin, se analizaron mediciones de gravedad en dos puntos de medición ubicados en La Plata, y Berazategui (Provincia de Buenos Aires). Para este análisis se

cuenta con dos series de datos observacionales de gravedad que fueron adquiridos de manera independiente utilizando instrumental de distinta resolución. Los datos en la ciudad de La Plata fueron tomados con un gravímetro Lacoste Romberg Modelo D y los datos de Berazategui son registros del gravímetro superconductor SG038 del Observatorio Argentino Alemán de Geodesia. Ambas series serán presentadas con mayor detalle en el Capítulo 3. Estos datos se busca contrastarlos con estimaciones teóricas de variaciones de gravedad para modelos de Tierra rígida y elástica para interpretar las señales observadas.

Durante el desarrollo de este trabajo se hace hincapié en los tratamientos que tuvieron cada una de las mediciones de gravedad mencionadas, para llegar finalmente a obtener resultados notorios en cuanto a la variación gravimétrica obtenida con respecto a los datos de gravedad de un día promedio en las ciudades de interés.

Además, se busca mejorar los resultados obtenidos en el modelo de Tierra elástica a partir de la implementación de distintos números de Love. Cabe destacar que todos los gráficos y tablas, se refieren al sistema local UTC-3 h.

1.2. Eclipses

Llamamos eclipse a la interposición del paso de la luz de un cuerpo celeste por otro cuerpo eclipsante. Existen eclipses tanto de Sol como de Luna, ambos se dan cuando el Sol y la Luna se alinean con la Tierra y se puede apreciar una zona de sombra en algún punto del planeta (ver Figura 1.1).

Durante un eclipse total de Sol se produce una situación particularmente interesante, donde los tres cuerpos (Tierra, Luna y Sol) se encuentran alineados. Esto no ocurre con mucha frecuencia debido a que la órbita de la Luna está inclinada aproximadamente 5 grados respecto de la eclíptica. Si durante la luna nueva esta cruza la eclíptica, se produce un eclipse de Sol. Desde un punto de vista geofísico, este fenómeno astronómico produce una disminución local de la gravedad terrestre, ya que la atracción del Sol y la Luna actúan en la misma dirección pero en sentido opuesto a la atracción gravitacional de la Tierra. La magnitud de las variaciones de gravedad por el efecto de marea lunisolar puede llegar a los 250 microgales ($2,5 \times 10^{-6} \frac{m}{s^2}$). Un factor que se mide durante un eclipse es la **magnitud**, esta es la fracción del diámetro oculto por la sombra respecto al diámetro total del astro eclipsado.

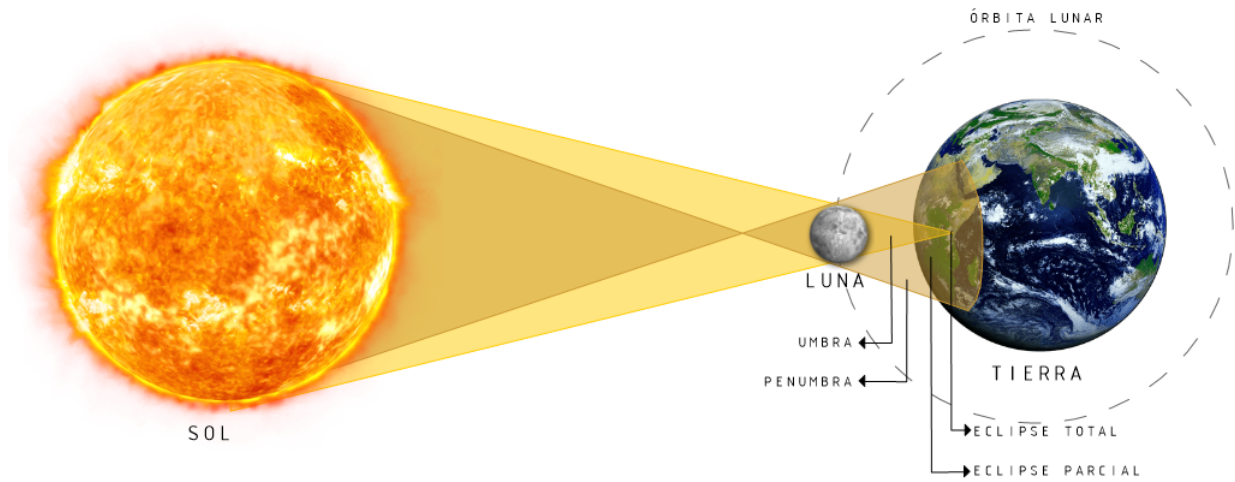


Figura 1.1: Esquema de la posición de los astros durante un eclipse.

1.3. Eclipse del 14 de diciembre del 2020

El eclipse solar producido el día 14 de diciembre del año 2020 en una franja estrecha entre Chile y Argentina (siendo en Argentina el país en el que tuvo lugar el mayor tiempo de sombra del eclipse), logró observarse de carácter total en una franja que recorrió de oeste a este la zona central de las provincias de Neuquén y Río Negro, en el norte de la Patagonia Argentina. En la ciudad de La Plata, nuestro lugar de estudio, el ocultamiento solar fue de manera parcial, llegando a ocultarse hasta un 74,76 % de la superficie del astro solar. En la ciudad se percibió con instrumental gravimétrico una variación de gravedad significativa, la cual estudiamos en detalle a partir de datos de dos gravímetros relativos: el gravímetro superconductor SG038 del Observatorio Argentino Alemán de Geodesia (AGGO) de resolución de lectura de ± 0.001 microgales y el gravímetro Lacoste Romberg de resolución de lectura de ± 1 microgal. Tales datos fueron comparados con modelos que permitieron el cálculo de la gravedad para las coordenadas de ambas estaciones de medición. En la Figura 1.2 se muestra la ubicación espacial donde fueron tomados los datos observacionales e incluye también la visibilidad del evento en todo Argentina y los países limítrofes.

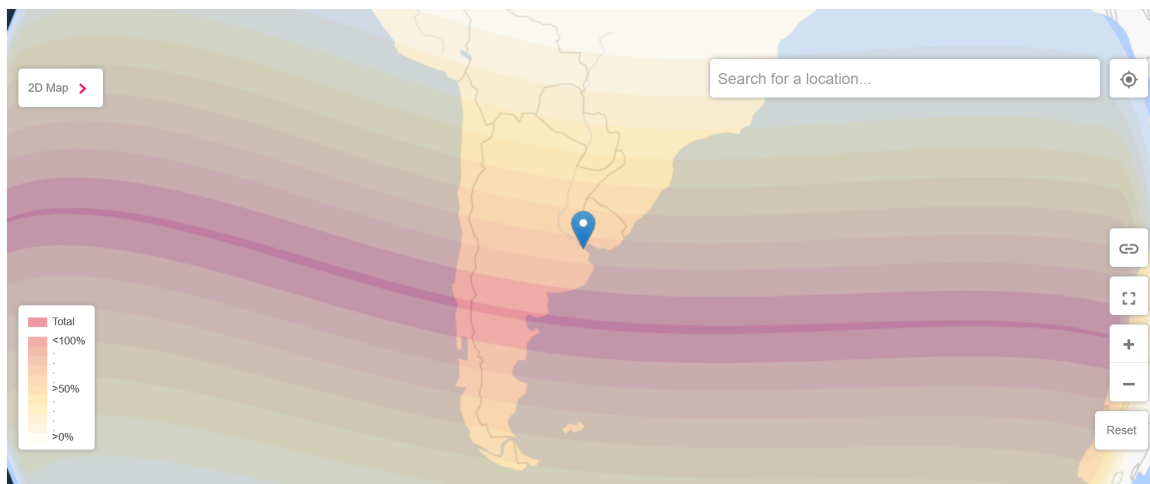


Figura 1.2: Imagen que muestra el área donde el eclipse del 14 de diciembre del 2020 fue visible. Esta fue tomada de la página "Time and Date", la cual permite modelar la visibilidad del eclipse para cualquier ciudad del mundo (ver <https://www.timeanddate.com/eclipse/in/argentina/la-plata?iso=20201214>). La posición resaltada en la imagen es la ciudad de La Plata, nuestro sitio de interés para el estudio. A izquierda abajo se observa una escala de colores con intención de graduar la visibilidad del eclipse, siendo el color más oscuro 100 % de ocultamiento solar.

En la ciudad de La Plata, el evento tuvo una duración de 2 horas 55 minutos 8 segundos, produciéndose el máximo ocultamiento solar a las 13:33:36. La magnitud del mismo fue de 0,7956. En las Figuras 1.3 y 1.4 pueden observarse distintas fases del ocultamiento fotografiadas por el geólogo Gerardo Páez en la ciudad donde se estudia el evento.



Figura 1.3: Foto tomada desde la ciudad de La Plata durante el evento por el fotógrafo Gerardo Páez en el momento del máximo ocultamiento solar.



Figura 1.4: Fotos de las distintas etapas del evento tomadas desde la ciudad de La Plata por el fotógrafo Gerardo Páez.

1.4. *Gravedad*

La gravedad terrestre está compuesta por la aceleración Newtoniana originada por la masa misma del planeta Tierra y la aceleración centrífuga generada por la rotación. Otra importante influencia en la gravedad terrestre es la atracción gravitacional del Sol y la Luna que genera el fenómeno de mareas. Este fenómeno no solamente afecta a los océanos sino también a la tierra sólida produciendo una deformación elástica del planeta. En menor medida, el movimiento de las masas atmosféricas y oceánicas y el movimiento de los polos, también afecta a la gravedad.

La gravedad, entonces, es una función que depende de la constante de Gravitación Universal μ , de la velocidad angular ω , de la posición del punto P, de la distribución de densidad en el interior terrestre $\rho(r)$ y del tiempo t :

$$g = g(\mu, \omega^2, P, \rho, t) \quad (1.1)$$

En la práctica se mide la magnitud de la aceleración de la gravedad sobre la superficie de la Tierra. Esta medición se realiza en el Sistema Internacional de medidas (SI) en la unidad de gravedad $\frac{m}{s^2}$ o en el sistema Cegesimal de Unidades (CGS) en gales $\frac{cm}{s^2}$. Para fines prácticos se utiliza la unidad de microgales, donde 1 Gal = 1.000.000 microgales.

La magnitud de la aceleración de gravedad se mide utilizando instrumental denominado en forma genérica como gravímetros. Desde el punto de vista de la toma del dato, se los puede clasificar en absolutos o relativos. Los primeros proveen el valor real de la gravedad, mientras que los relativos datan la diferencia de gravedad entre una estación base o un cero relativo y el punto en el que se pretende conocer la gravedad. Los gravímetros relativos manuales cuentan con una aceptable resolución de lectura debido a la robustez del aparato por su constante traslado (este es el caso del Lacoste & Romberg utilizado durante este trabajo), mientras que otros gravímetros relativos fijos, como el gravímetro superconductor SG038 de AGGO, mejoran notablemente su resolución generando volúmenes de datos más certeros y de gran utilidad para estudios que requieran mayores exactitudes por su minuciosidad.

1.5. *Mareas*

La posición de los astros tienen una importante influencia en la gravedad del planeta. Todos los planetas del sistema solar, la Luna y el Sol tienen su aporte a la atracción gravitacional ejercida sobre la Tierra, siendo los que cuentan con más masa y cercanía los que mayor influencia tienen. La Luna por su cercanía ejerce el mayor efecto en la gravedad causado por mareas, siendo el rango de aproximadamente 168 microgales. El Sol por su masa ejerce la segunda mayor influencia en la gravedad, siendo el rango de aproximadamente de 63 microgales. Juntos, estos dos astros generan lo que conocemos como mareas, las cuales varían según la posición de los mismos en el espacio con respecto a la Tierra.

Luego de estos astros, el siguiente planeta que genera mayor atracción gravimétrica es Venus, con 0,00861 microgales de atracción gravitatoria. A este lo siguen Júpiter con 0,00092 microgales y Marte con 0,00037 microgales. Vemos que hay una gran diferencia entre los órdenes de magnitud de la atracción gravitatoria de la Luna y el Sol, por lo que no son considerados significativos para los cálculos de mareas.

La aceleración de mareas en un punto P de la superficie terrestre, es el resultado de la suma de la atracción gravitacional generada por un cuerpo celeste en el punto

P y la aceleración orbital debido al movimiento de la Tierra alrededor del baricentro del sistema de dos cuerpos (la Tierra y el cuerpo celeste; Wenzel, (1997a)). Este efecto es conocido como marea terrestre y estaría presente aún si la Tierra fuera rígida y no tuviera océanos.

En la realidad, la Tierra no es rígida y posee océanos, por lo que las fuerzas de marea actúan sobre el sistema Tierra, simbolizado en la Figura 1.5 como el rectángulo de línea punteada. Dentro del rectángulo tenemos la respuesta de la Tierra al efecto de mareas terrestres.

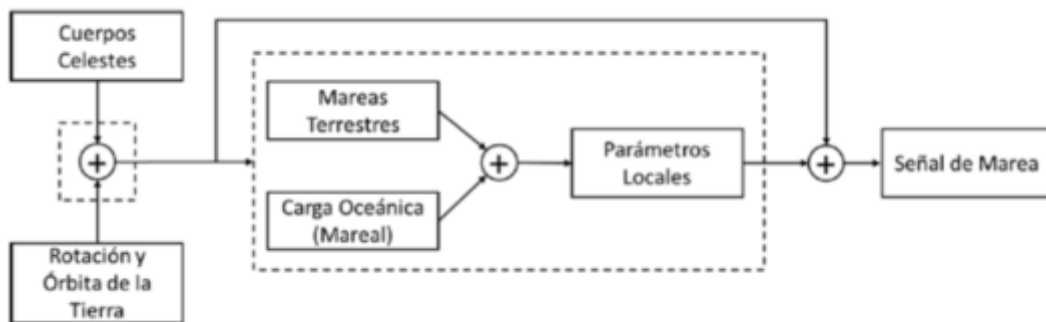


Figura 1.5: Aceleraciones implicadas en la señal de mareas.

Además del efecto de marea terrestre, la presencia de océanos da origen a un efecto adicional: las fuerzas de marea generan variaciones en la distribución de masas de agua. Al colocar una masa de agua sobre la superficie terrestre, ésta produce deformaciones llamadas efectos de carga. Dado que la Tierra responde en forma elástica a estas deformaciones, los períodos con los que se generan efectos de carga asociados a las mareas oceánicas son coincidentes a los de las mareas terrestres, ya que las fuerzas que las derivan tienen las mismas frecuencias, es decir, los efectos de carga producidos por mareas oceánicas contienen el mismo espectro de frecuencias que las mareas terrestres pero distintas amplitudes y fases.

Por otra parte, la respuesta de la Tierra a las mareas terrestres y a la carga oceánica se ve también afectada por variaciones locales en las propiedades elásticas de la Tierra (Parámetros Locales).

Los fenómenos de mareas terrestres y carga oceánica mareal involucran no sólo la dinámica de los cuerpos celestes y las fuerzas involucradas, sino también la respuesta de la Tierra a dichas fuerzas, lo cual puede explicarse mediante números adimensionales que describen cómo ésta se deforma. Estos son los números de Love que fueron introducidos por Love en 1911, para un modelo de Tierra esférica y homogénea.

Para ilustrar el efecto gravimétrico causado por estos cuerpos sobre el planeta, se muestran en la Figura 1.6 las aceleraciones implicadas en el caso del sistema Tierra-Luna. Ambos cuerpos giran uno respecto del otro en torno a su baricentro

y, debido a esto, tienen una aceleración centrífuga asociada junto con la atracción gravitacional entre ambos.

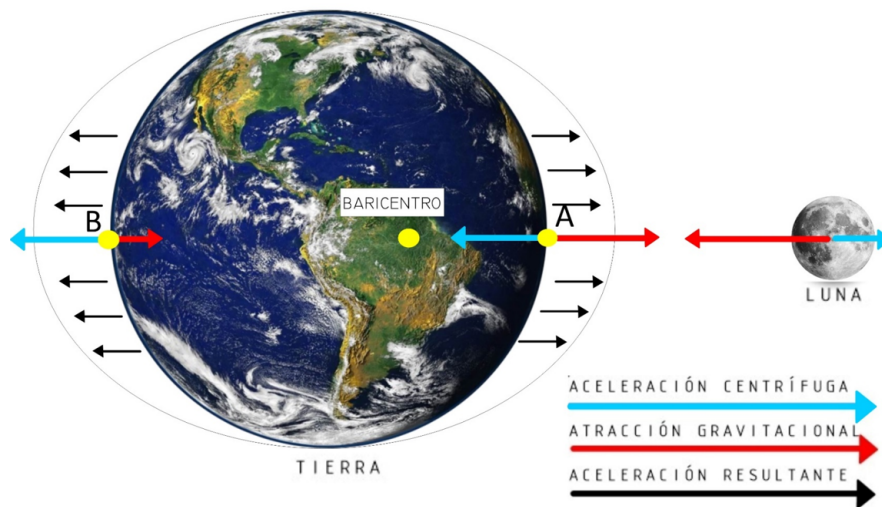


Figura 1.6: Aceleraciones implicadas en el sistema Tierra-Luna.

Considerando el punto A en la Figura 1.6, la Luna tiene una mayor atracción gravitacional, excediendo la aceleración centrífuga. En este lado del planeta, la marea se encontrará en dirección de la Luna. En el punto B, la Luna tiene menor atracción gravitacional y no excede la aceleración centrífuga, por lo que las mareas de tal lado del planeta serán en dirección opuesta a la Luna.

Teniendo en cuenta sus amplitudes, las mareas se clasifican en dos grandes grupos: **mareas muertas** y **mareas vivas**, los cuales se describen brevemente a continuación:

1. **Mareas muertas:** tienen lugar cuando el Sol y la Luna se ubican en una posición de cuadratura respecto del planeta. Se clasifican a su vez como “Luna Creciente” y “Luna Decreciente” y es cuando se produce la mínima aceleración gravitacional posible dada por los astros en conjunto y por lo tanto el menor efecto de mareas conocido.
2. **Mareas vivas:** tienen lugar cuando el Sol y la Luna están alineadas con la Tierra y es cuando hay mayor atracción gravitacional debido a que la atracción de ambos astros se complementan produciendo un mayor efecto de mareas. Este fenómeno es conocido como el fenómeno de Syzygy y a su vez puede clasificarse en los casos de “Luna Llena” y “Luna Nueva”, según la ubicación relativa del planeta con los astros. Para el primer caso, la Tierra está entre el Sol y la Luna y para el segundo caso, la Luna está entre el Sol y la Tierra. En este último caso es cuando se da nuestro foco de estudio: el eclipse.

Los datos de mareas son de suma utilidad para conocer la deformación elástica del planeta. Modelos de los mismos pueden ser usados para remover variaciones gravimétricas causadas por las mareas y también esos mismos modelos pueden usarse para examinar la influencia de las mareas en algún fenómeno en particular.

Para el día del eclipse (14 de diciembre del 2020), se obtuvo información de la variación de altura en el mareógrafo de la ciudad de La Plata, aportados por el Servicio de Hidrografía Naval. Los mismos fueron tomados con una frecuencia de muestreo de una hora, desde las 23 hs del 13 de diciembre del 2020 hasta las 24 hs del 14 de diciembre del 2020. En la Figura 1.7, los datos se presentan en unidad de centímetros y están datados en huso horario local, el cual corresponde a UTC-3 h. Las alturas se refieren al cero del mareógrafo de la estación de la ciudad de La Plata.

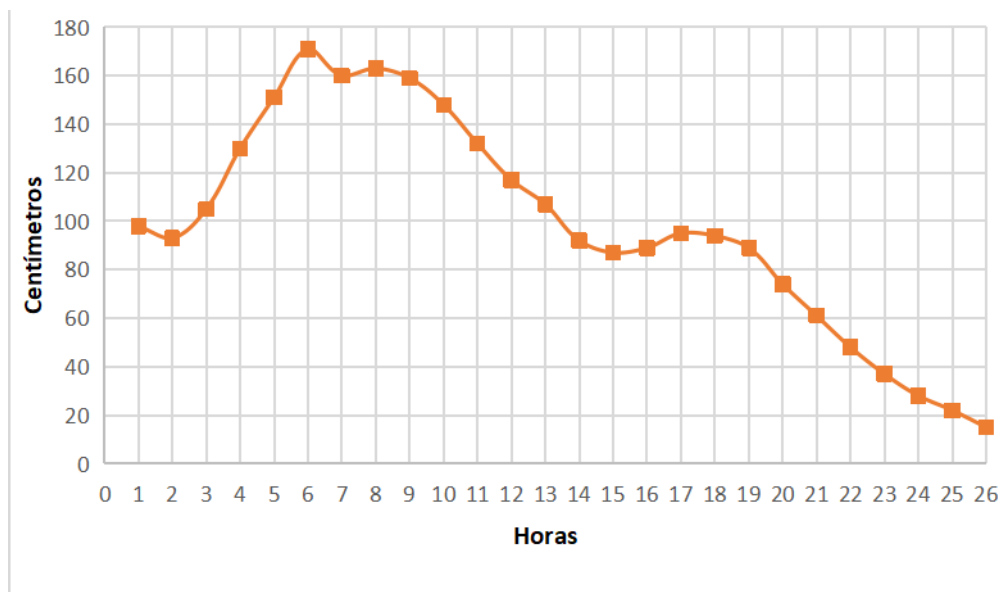


Figura 1.7: Datos de mareas del Río de La Plata durante el día 14/12/2020.

Es importante destacar que el ocultamiento máximo del eclipse en La Plata fue a las 13:33:36 horas y que se encuentra desfasado en tiempo con el máximo relativo de la señal del mareógrafo. Esto se debe a que la onda de mareas se propaga con una velocidad de $30 \frac{km}{h}$ en el río, lo que produce el desfase con la marea astronómica.

Capítulo 2

Modelos teóricos

En este capítulo se presentan los modelos teóricos a utilizarse durante el transcurso de este trabajo. Los mismos son modelos para el caso de una Tierra rígida, para una Tierra elástica y una versión mejorada de este último a partir de la variación de los parámetros elásticos implicados.

2.1. Modelo para una Tierra rígida

En esta sección se presentan las fórmulas clásicas de Longman (1959) para modelar el efecto del eclipse sobre la gravedad. Estas son fórmulas básicas para el cálculo de las componentes verticales y horizontales de la aceleración de marea para una Tierra rígida y sin océanos. Las mismas calculan en base a efemérides astronómicas la aceleración debida a la marea del Sol y la Luna.

Las fórmulas básicas para el cálculo de la componente vertical y horizontal de la aceleración de mareas, g_0 y h_0 , fueron dadas por distintos autores, los cuales tomaron como inicio la expresión de la aceleración de marea efectiva en términos del ángulo cenital y la distancia del cuerpo productor de marea. En consecuencia, se pueden desarrollar las mareas lunares en las componentes de mareas (como lo hicieron Doodson (1921), Schureman (1941) y Barrels (1957)), mientras que Pettit (1954) presentó fórmulas para calcular las fuerzas de mareas con ayuda de tablas.

Longman (1959), en cambio, estimó g_0 en función del tiempo, permitiendo ser calculado en cualquier punto en la superficie de la Tierra para una época determinada, evitando el utilizar su desarrollo armónico y el uso de tablas de cálculo para su obtención.

Las ecuaciones propuestas son funciones del ángulo cenital y de la distancia entre un punto de la Tierra y el cuerpo generador de mareas. La precisión alcanzada por este modelo es de la fracción del microgal.

De acuerdo con Schureman (1941), la componente vertical (hacia arriba) de la

fuerza de marea lunar g_M por unidad de masa en un punto P en la superficie de la Tierra puede expresarse:

$$g_M = \frac{\mu M r}{d^3} (3 \cos^2 \theta - 1) + \frac{3 \mu M r^2}{2 d^4} (5 \cos^3 \theta - 3 \cos \theta) \quad (2.1)$$

siendo μ la constante gravitacional de Newton ($6,670 \times 10^{-11} \frac{N^2 \cdot m^2}{kg^2}$), M la masa de la Luna ($M = 7,3537 \times 10^{25}$ gramos), r la distancia entre un punto P en superficie y el centro de la Tierra, d la distancia entre los centros de la Tierra y de la Luna y θ el ángulo cenital de la Luna.

Con igual precisión se puede expresar la componente horizontal h_M :

$$h_M = \frac{3 \mu M r}{2 d^3} \sin 2\theta + \frac{3 \mu M r^2}{2 d^4} (5 \cos^3 \theta - 1) \sin \theta \quad (2.2)$$

Las fórmulas para representar las componentes vertical (g_S) y horizontal (h_S) de marea solar son similares:

$$g_S = \frac{\mu S r}{D^3} (3 \cos^2 \phi - 1) \quad (2.3)$$

$$h_S = \frac{3 \mu S r}{2 D^3} \sin 2\phi \quad (2.4)$$

siendo S la masa del Sol ($S = 1,993 \times 10^{33}$ gr.), D la distancia entre el centro de la Tierra y del Sol y ϕ el ángulo zenital del Sol.

Llamaremos g_0 y h_0 entonces a la aceleración de marea resultante de los astros sumados:

$$g_0 = g_M + g_S \quad (2.5)$$

$$h_0 = h_M + h_S \quad (2.6)$$

Notar que g_0 y h_0 dependen del tiempo para cualquier punto P dado, porque los valores de θ , ϕ , d y D son funciones de tiempo.

Reemplazando (2.1), (2.2), (2.3) y (2.4) en (2.5) y (2.6) se obtienen las ecuaciones para el cálculo de la variación de gravedad producida por el Sol y la Luna en conjunto:

$$g_0 = \frac{3 \mu M r}{2 d^3} \left(\sin 2\theta + \frac{r}{d} (5 \cos^3 \theta - 1) \sin \theta \right) + \frac{\mu S r}{D^3} (3 \cos^2 \phi - 1) \quad (2.7)$$

$$h_0 = \frac{3 \mu M r}{2 d^3} \sin 2\theta + \frac{3 \mu M r^2}{2 d^4} (5 \cos^3 \theta - 1) \sin \theta + \frac{3 \mu S r}{2 D^3} \sin 2\phi \quad (2.8)$$

Para completar el cálculo de las variaciones de gravedad en un punto sobre la Tierra es necesario conocer la ubicación del Sol y de la Luna en coordenadas celestes

para todo tiempo (θ , ϕ , D y d). Esto se realiza utilizando efemérides analíticas que permiten calcular la posición de los cuerpos celestes para cada momento. En el trabajo de Longman (1959) se propone un algoritmo que permite calcular las efemérides para cualquier punto de la Tierra con buena precisión.

En este trabajo se utiliza el modelo para la componente vertical, g_0 , ya que los gravímetros miden esta componente. Teniendo en cuenta las coordenadas geográficas de la estación de La Plata y AGGO se calcularon los valores del modelo de gravedad para el día del eclipse. Para el cálculo se utilizó un código de libre acceso en lenguaje FORTRAN desarrollado por investigadores del Black Forest Observatory (Alemania). Dadas las cercanías entre las estaciones, las series presentan características similares por lo que sólo se grafica en la Figura 2.1 los valores correspondientes a AGGO (serie $L^{AGGO,rig}$).

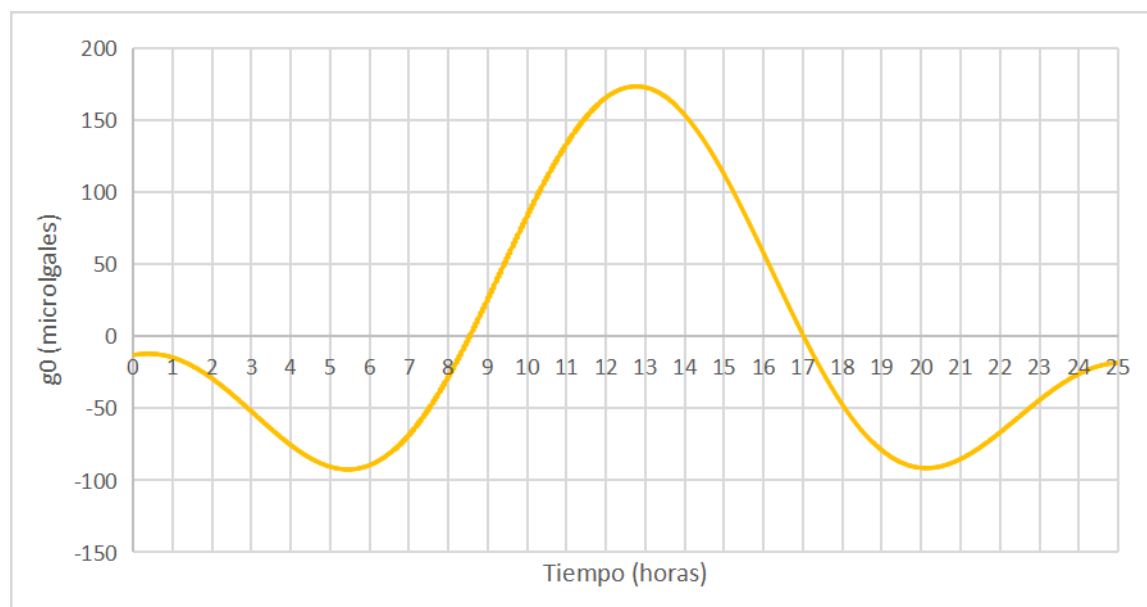


Figura 2.1: Modelo para una Tierra rígida en la ubicación de AGGO ($L^{AGGO,rig}$).

En la Figura 2.1, se observa que los máximos y mínimos de la serie son -91,50, 174,57 y -90,52 microgales, por lo que el rango máximo del modelo es de **266,07** microgales. Es importante destacar que estos valores representan el efecto gravimétrico del Sol y la Luna y que deben ser restados al valor de gravedad en la Tierra.

2.2. Modelo para una Tierra elástica

En esta sección se presenta un modelo que tiene en cuenta el comportamiento elástico del planeta, este es el modelo de Tierra elástica, descrito por Agnew (2009) quien desarrolla las fórmulas. La estrategia para modelar las mareas en una Tierra elástica es utilizar los parámetros adimensionales elásticos de Love para modificar la respuesta determinada para una Tierra rígida. Con este fin se expande el potencial de mareas V en armónicos esféricos de grado n y se definen los números de Love

k_n , h_n y l_n . Si el potencial de mareas en un punto de la superficie es $V(\theta, \phi)$, la distorsión del planeta por aceleración de mareas produce un potencial gravitacional adicional $k_n V(\theta, \phi)$, un desplazamiento vertical $h_n V(\theta, \phi)$ y un desplazamiento horizontal $l_n V(\Delta_1 V(\theta, \phi)/g)$.

Luego, la variación gravimétrica δg causada por un cuerpo celeste puede expresarse del siguiente modo (Agnew, 2015):

$$\delta g = \frac{g}{a} \sum_{n=2}^{\infty} \delta_n \sum_{m=0}^n N_n^m P_n^m(\cos \theta) [a_n^m(t) \cos(m\phi) + b_n^m(t) \sin(m\phi)] \quad (2.9)$$

donde g es la aceleración gravitacional de la Tierra, a la distancia entre el centro de la Tierra al punto P en superficie donde se mide la gravedad, θ y ϕ son la colatitud y la longitud (este) respectivamente del punto de observación P, $a_n^m(t)$ y $b_n^m(t)$ son coeficientes del desarrollo en armónicos esféricos del potencial de mareas. P_n^m son los polinomios de Legendre asociados de grado n y orden m y N_n^m es el factor de normalización.

Los primeros polinomios de Legendre tienen las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} P_0^2(\theta) &= \frac{1}{2}(3 \cos^2 \theta - 1) & P_3^0(\theta) &= \frac{1}{2}(5 \cos^2 \theta - 3 \cos \theta) \\ P_1^2(\theta) &= 3 \sin \theta \cos \theta & P_3^1(\theta) &= \frac{3}{2}(5 \cos^2 \theta - 1) \\ P_2^2(\theta) &= 3 \sin^2 \theta & P_3^2(\theta) &= 15 \sin^2 \theta \cos \theta \\ & & P_3^3(\theta) &= 15 \sin^3 \theta \end{aligned}$$

El factor de normalización N_n^m se calcula con la siguiente fórmula:

$$N_n^m = (-1)^m \left[\frac{2n+1}{4\pi} \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \right]^{\frac{1}{2}}$$

En la ecuación (2.9) δ_n es el factor gravimétrico que tiene en cuenta la deformación elástica de la Tierra y depende de los números de Love (h_n , k_n y n).

$$\delta_n = 1 + \frac{2h_n}{n} - \frac{(n+1)}{n} k_n \quad (2.10)$$

En la ecuación (2.10) se observa que si tuviéramos el caso de una Tierra rígida, $\delta_n = 1$ ya que los factores h_n y k_n serían iguales a cero. Para el caso del modelo de PREM, $\delta_2 = 1,1562$, por lo que la gravedad de mareas sería aproximadamente un 16 % más grande que el correspondiente a un modelo de Tierra completamente rígida.

La ecuación (2.9) es utilizada para calcular la variación gravimétrica producida por los astros en cuestión. Para la Luna, se consideró el desarrollo hasta el grado

$n=3$ y para el Sol, hasta un grado $n=2$. El grado hasta el cual se realiza el desarrollo depende de la distancia del cuerpo causante de mareas con respecto al punto de medición, donde una gran distancia es un factor de atenuación mayor para el cálculo de la aceleración de mareas.

En la Figura 2.2, se ilustra la variación de gravedad para una Tierra elástica el día del eclipse en la locación de AGGO. Además se agrega el modelo de Tierra rígida visto en la sección anterior para hacer notoria la diferencia entre ambos.

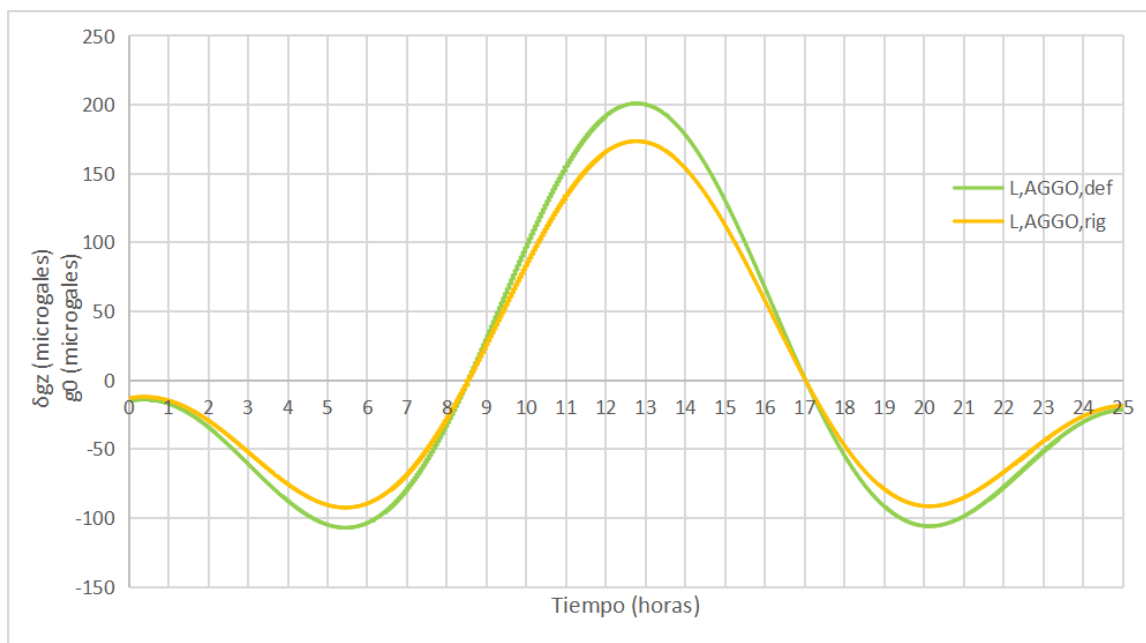


Figura 2.2: Modelo para una Tierra elástica en la ubicación de AGGO ($L^{AGGO,def}$) junto con el modelo para Tierra rígida ($L^{AGGO,rig}$).

En la Figura 2.2 se observa que los máximos y mínimos para el modelo de Tierra elástica son -106,04, 202,08 y -104,92 microgales, por lo que se identifica una amplitud máxima en la serie de **308,12** microgales y además una diferencia máxima entre los modelos de Tierra rígida y Tierra elástica de **27,51** microgales.

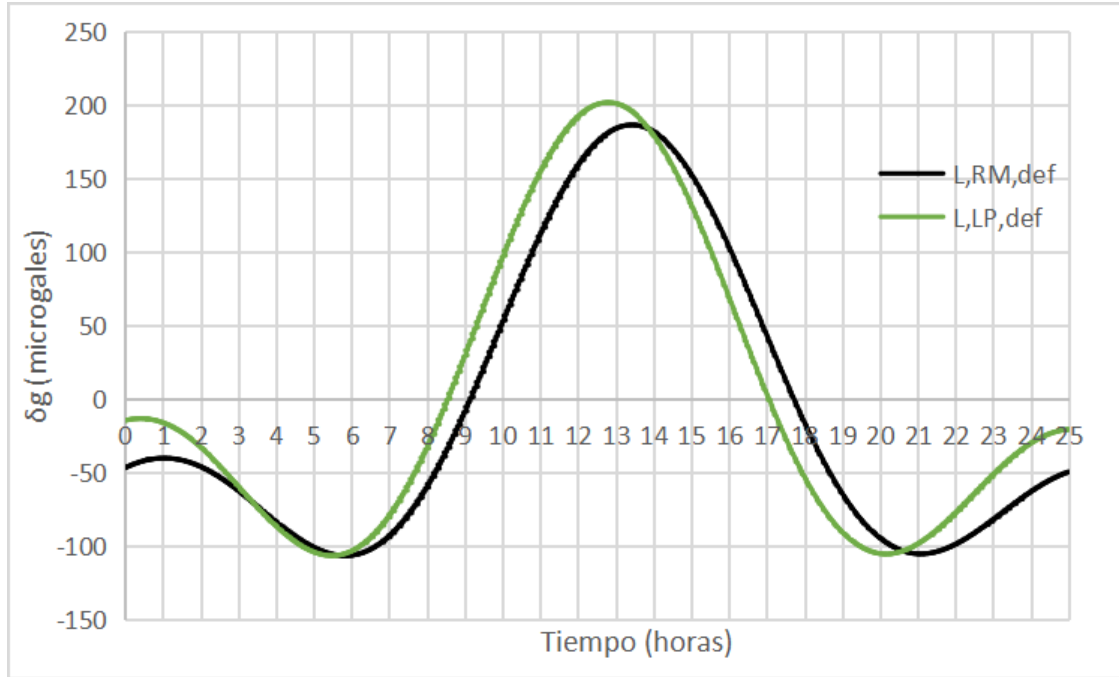


Figura 2.3: Comparación entre los modelos de AGGO ($L^{AGGO,def}$) y Ramos Mexía ($L^{RM,def}$) para una Tierra elástica para el día del eclipse.

En la Figura 2.3 se muestra la variación gravimétrica en la ciudad de Ramos Mexía de coordenadas ($\phi = -40,5^\circ$, $\lambda = -67,2833^\circ$), provincia de Río Negro. Allí se pudo apreciar un ocultamiento solar del 100% durante el eclipse. En la figura también se incluye la variación de gravedad en La Plata.

Se observan valores de mayor variación de gravedad en la ciudad de La Plata que en Ramos Mexía. Esto se atribuye a la ubicación más cercana de la ciudad de La Plata al plano de la eclíptica, lo que genera una mayor atracción gravitacional que se traduce en mayor variación gravimétrica.

2.3. Parámetros elásticos

El efecto de la deformación elástica de la Tierra en la gravedad se modela mediante el factor gravimétrico δ_n dado por la ecuación (2.10). Este factor depende de los números de Love k_n y h_n .

El programa original desarrollado por los investigadores del Black Forest Observatory utilizaron los números de Love estimados por Longman (1963). Longman estimó estos parámetros calculando la deformación de la Tierra y la perturbación del potencial de gravedad causado por la aplicación de una carga puntual sobre la superficie. El modelo de Tierra utilizado fue el de Gutenberg (Alterman et al; 1961).

Los números de Love fueron mejorados por Rutkowska y Jagoda (2010) mediante el análisis de mediciones láser satelitales (Satellite laser ranging, SLR). Los datos SLR de dos satélites, LAGEOS 1 y LAGEOS 2, fueron recopilados durante un pe-

río de dos años, del 1 de enero de 2005 al 1 de enero de 2007, de 18 estaciones terrestres distribuidas globalmente. Este análisis dió como resultado los valores que se listan en la Tabla 1 y que utilizaremos en este trabajo para mejorar las estimaciones de las variaciones de gravedad obtenidas con los parámetros de Longman (1963).

Parámetro	Longman (1963)	Rutkowska y Jagoda (2010)
k2	0.302	0.3011
k3	0.095	0.0896
h2	0.612	0.6146
h3	0.290	

Tabla 1: Números de Love.

El h3 utilizado es el mismo que el calculado por Longman (1963).

Capítulo 3

Datos observacionales

En este capítulo se presentan las series de datos observacionales utilizadas en este trabajo y las correcciones realizadas a las mismas.

3.1. Datos de variaciones de gravedad en La Plata

Esta serie de datos observacionales fue medida de forma manual con un gravímetro de resorte Lacoste & Romberg Modelo D (resolución de lectura de ± 1 microgal) de la Cátedra de Gravimetría de la FCAGLP (Universidad Nacional de La Plata) en una estación ubicada en la ciudad de La Plata ($\phi = -34,913714^\circ$, $\lambda = -57,939626^\circ$). Las mediciones se realizaron con una frecuencia de muestreo de aproximadamente 30 minutos abarcando las horas de interés del estudio. Las mismas comenzaron a las 7:21 hs del día del evento y finalizaron a las 22:30 hs de la misma fecha.

En la Figura 3.1 se muestran las mediciones de gravedad en microgales. El máximo ocultamiento solar según fuentes informativas ocurrió a las 13:33:36 horas, donde el valor de gravedad medido a tal hora fue de 245,14 microgales. Se observa que durante la hora donde tuvo lugar el máximo ocultamiento no concuerda con el punto donde mayor sea la variación gravimétrica. Esta inconsistencia será abordada en la siguiente sección.

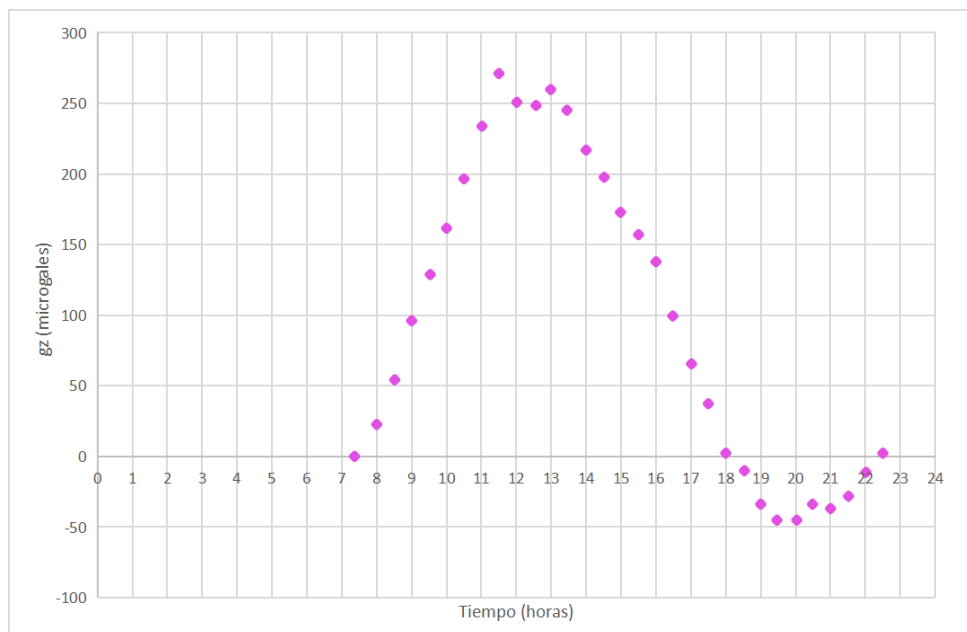


Figura 3.1: Datos de gravedad muestreados por el gravímetro relativo Lacoste & Romberg modelo D (DLR).

La falta de suavidad de los datos se asocia a errores en la estimación de los datos realizada por el observador y a la perturbación del punto de medición por ruidos antrópicos presentes en grandes ciudades. Además se asocian a la robustez del aparato y a la resolución de lectura con la que trabaja el mismo. Estos datos servirán como respaldo de los datos tomados por el gravímetro superconductor SG038 de AGGO, cuya resolución es mucho mayor.

Se observa que los datos tienen un rango máximo de **316,31** microgales que resulta similar a las estimaciones teóricas.

3.2. Corrección atmosférica (CA)

El Observatorio Argentino Alemán de Geodesia mide y facilita los datos atmosféricos para el día del evento. El efecto de la presión atmosférica sobre la gravedad se estima utilizando un factor estándar de -0.3 microgales por hPa.

En la Figura 3.2 se muestra la corrección gravimétrica en microgales originada por las variaciones de gravedad producto de la interacción atmosférica en la medición.

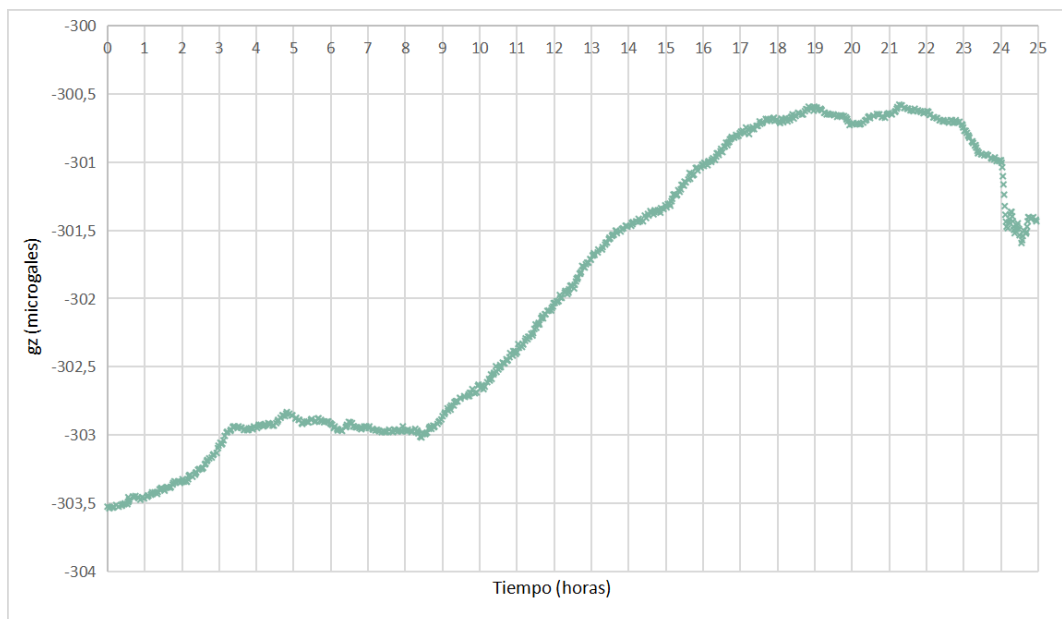


Figura 3.2: Variaciones de gravedad producidas por los cambios de presión atmosférica.

3.3. Datos del gravímetro superconductor SG038

En esta sección se presenta la serie de datos registrados por el gravímetro superconductor relativo SG038 (con una resolución de lectura de ± 0.001 microgales) en el Observatorio Argentino Alemán de Geodesia AGGO (CONICET-BKG) ubicado en la localidad de Berazategui ($\phi = -34,873295^\circ$, $\lambda = -58,139875^\circ$). El acceso a los datos del Nivel 1 del gravímetro SG038 (Wziontek et al., 2017) se realizó a través del International Geodynamics and Earth Tide Service (IGETS) y su base de datos <http://isdg.gfz-potsdam.de/ige>. Los datos de la estación se encontraban originalmente en unidades de Volts, por lo que para transformar las observaciones de voltaje a unidades de gravedad, $\frac{nm}{s^2}$, se realizó una transformación mediante un factor de calibración. Este factor de calibración es único para cada instrumento y debe ser determinado en forma empírica. Actualmente, la determinación más precisa del factor de calibración se realiza mediante mediciones en simultáneo con gravímetros absolutos (Antokoletz et al., 2017). Además, los datos se hallaban expresados en tiempo universal coordinado (UTC), por lo que fueron expresados en tiempo local con el objetivo de unificar y facilitar las lecturas de las mediciones (UTC+3).

Los datos originales fueron muestreados cada un minuto (1 muestra/minuto) ya que resulta suficiente para describir la variación gravimétrica originada por el eclipse. Como resultado, se trabajó con una serie de 1500 datos en total que representa 25 horas de registro.

Los datos del gravímetro superconductor se corrigieron del siguiente modo:

$$DGS^{CA} = DGS + CA \quad (3.1)$$

siendo DGS^{CA} los valores corregidos, DGS los datos del gravímetro superconductor SG038 y CA la corrección atmosférica.

Las mediciones de gravedad fueron filtradas con un promedio móvil para reducir los ruidos antrópicos presentes en el dato, y así conservar la tendencia del valor gravimétrico, la cual se conoce que actúa de forma suave. Tal ruido antrópico se entiende que fue generado debido a la presencia de algún miembro del observatorio cercano al equipo de medición durante el evento que interfirió con la toma de datos de la estación gravimétrica. El promedio móvil fue realizado promediando 5 muestras contiguas de datos de gravedad. En la Figura 3.3 puede observarse el ruido en la serie DGS^{CA} .

En adición a las correcciones realizadas, se le restó a los datos su valor medio, ya que lo que es interesante para el estudio es justamente las variaciones en los valores de gravedad durante el eclipse. El valor medio conseguido a partir de hacer la sumatoria de los 1500 valores de la serie de datos DGS^{CA} (corregidos por efectos atmosféricos) fue de $-80,079$ microgales, por lo que:

$$DGS_{Corr} = DGS^{CA} - (-80,079\mu Gal) \quad (3.2)$$

En la Figura 3.3 se muestra en color celeste el dato crudo DGS y en color violeta el dato resultante DGS_{corr} de todas las correcciones realizados al dato crudo. Se observa que los datos corregidos tienen una continuidad mayor. La serie corregida será comparada con los modelos teóricos de Tierra rígida (TR) y Tierra elástica (TD).

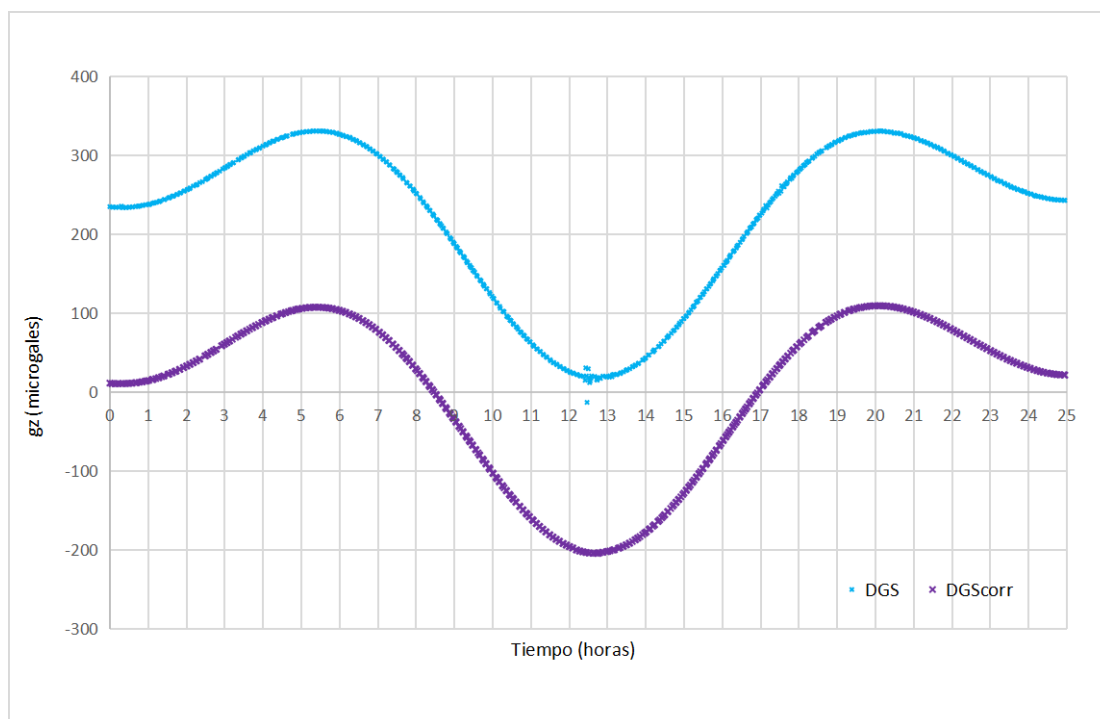


Figura 3.3: En celeste, datos crudos de la estación gravimétrica. En violeta, datos filtrados por un promedio móvil, corregidos por su valor medio y por las variaciones de presión atmosférica.

Se observa que en los datos ya corregidos tenemos dos máximos de valores 104,86 y 103,740 microgales de izquierda a derecha y el mínimo absoluto es de -203,26 microgales, por lo que el rango máximo es de **307** microgales. Este mínimo absoluto se produjo a las 12:48 hs del día del evento, sin embargo, como se señaló anteriormente, la hora en la que el ocultamiento solar fue máximo fue a las 13:33 horas. Este desfase puede atribuirse a la posición de los astros durante el evento. La sombra producida durante el eclipse en las localidades estudiadas no fue el punto en que los astros se hallaban más cercanos a la Tierra. Este sí hubiera sido el caso si el eclipse hubiera ocurrido al mismo tiempo que el Sol y la Luna atravesaban el meridiano local (ver Figura 3.4).

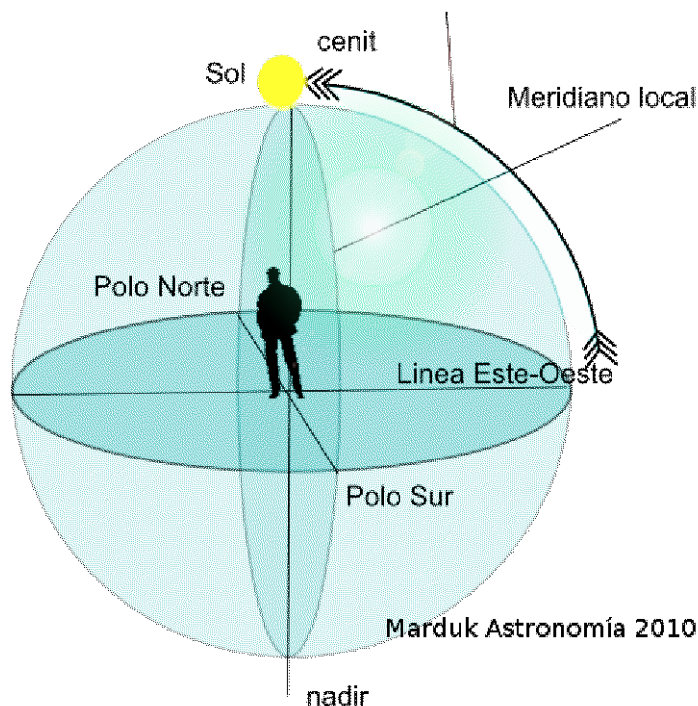


Figura 3.4: Gráfico tomado del Marduk Atronomía 2010.

En el momento en que ambos astros se encuentran a una distancia mínima del planeta, las distancias D y d de la ecuación (2.7) son menores, generando una mayor atracción gravitatoria. En el día del evento, la distancia del astro solar a la Tierra fue mínima a las 12 horas 52 minutos, 41 minutos antes del máximo ocultamiento, lo que, complementado con la información de la distancia óptima de la Luna al punto de medición, genera como resultado un menor valor de g_0 . Esta conclusión la observamos tanto en los modelos teóricos como en los observacionales en el desfase entre la hora de máximo ocultamiento y la hora de mínimo local de gravedad.

Capítulo 4

Análisis de resultados y discusión

En este capítulo se analizan individualmente cada uno de los datos de variación gravimétrica producida por mareas, comparándolos con los modelos de Tierra rígida, Tierra elástica y su versión mejorada a partir de la utilización de los parámetros elásticos calculados por Rutkowska y Jagoda (2010).

4.1. Eclipse en La Plata

Para el caso de La Plata, los datos observacionales se encuentran limitados por la resolución de los mismos. El primer modelo a analizar es el de **Tierra rígida**.

En la Figura 4.1 se muestran los datos observacionales de gravímetro relativo Lacoste & Romberg junto con el modelo de Tierra rígida propuesto por Longman (1959).

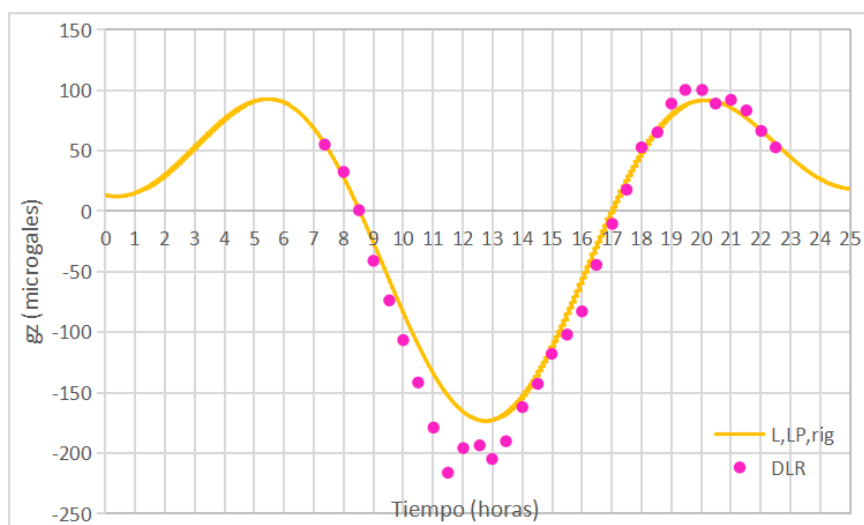


Figura 4.1: Comparación entre el modelo de Longman para una Tierra rígida en la ubicación de la ciudad de La Plata ($L^{LP,rig}$) y las observaciones del gravímetro relativo Lacoste & Romberg (DLR).

Se observa en la Figura 4.1 que los datos observacionales difieren del modelo en varios puntos. Para analizar qué tanto se aproximan uno con el otro, se calcula el desvío estándar entre la diferencia de ambas series a partir de la ecuación:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^N (X_i - \bar{X})^2}{N}} \quad (4.1)$$

siendo X_i la diferencia entre el modelo propuesto por Longman calculado en la ciudad de La Plata para el caso de una Tierra rígida, ($L^{LP,rig}$) y los datos observacionales del gravímetro relativo Lacoste & Romberg tomados en la ciudad de La Plata, DLR , y \bar{X} el valor promedio de la diferencia.

$$\sigma_{rig}^{LP} = \sqrt{\frac{\sum_i^{30} ((DLR - L^{LP,rig})_i - (-4,3677))^2}{30}} = 17,2296 \quad (4.2)$$

Para este modelo, $\sigma_{rig}^{LP} = 17,2296$ microgales.

En la Figura 4.2 se observa la diferencia entre el modelo para una Tierra rígida y los datos observacionales DLR .

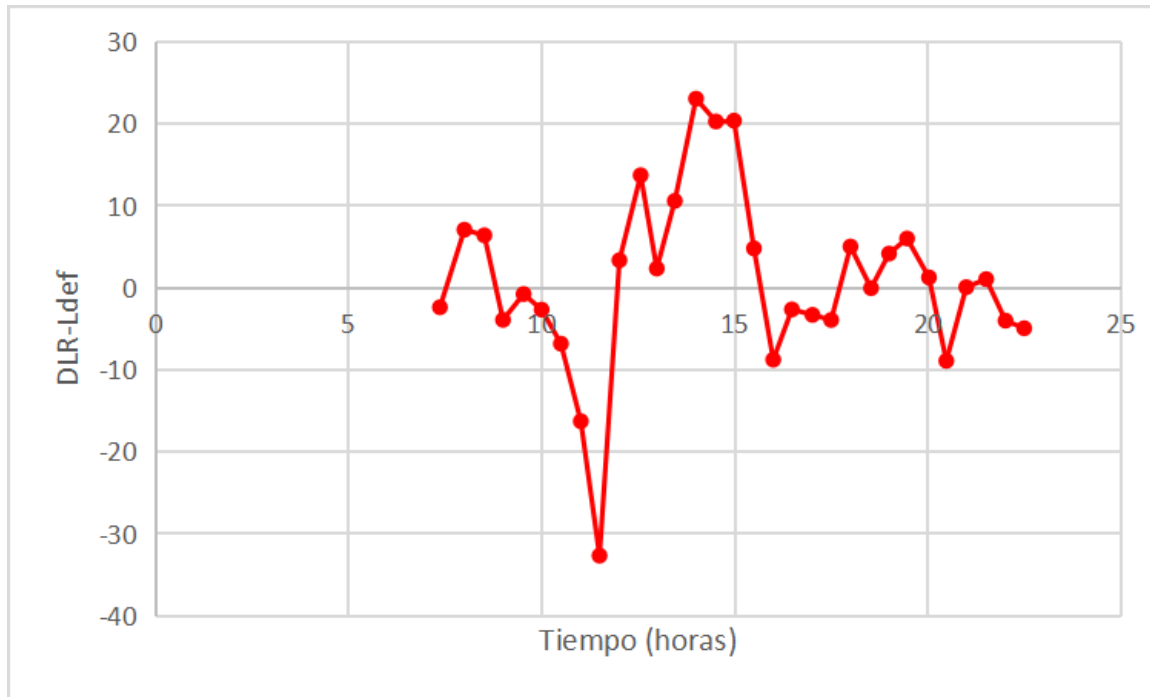


Figura 4.2: Diferencia entre los datos observacionales y el modelo de Tierra rígida.

Se observa que el valor de máximo apartamiento entre el modelo y la observación es de 56,741 microgales a las 11:30 hs.

Para el modelo de **Tierra elástica**, el análisis de datos también fue restringido al horario en el que se cuenta con datos observacionales por lo que fue limitada la cantidad de datos proporcionados por el modelo a los datos de medición. Para el

cálculo de las variaciones de gravedad teóricas se utilizaron los valores clásicos de los parámetros de Love estimados por Longman (1963).

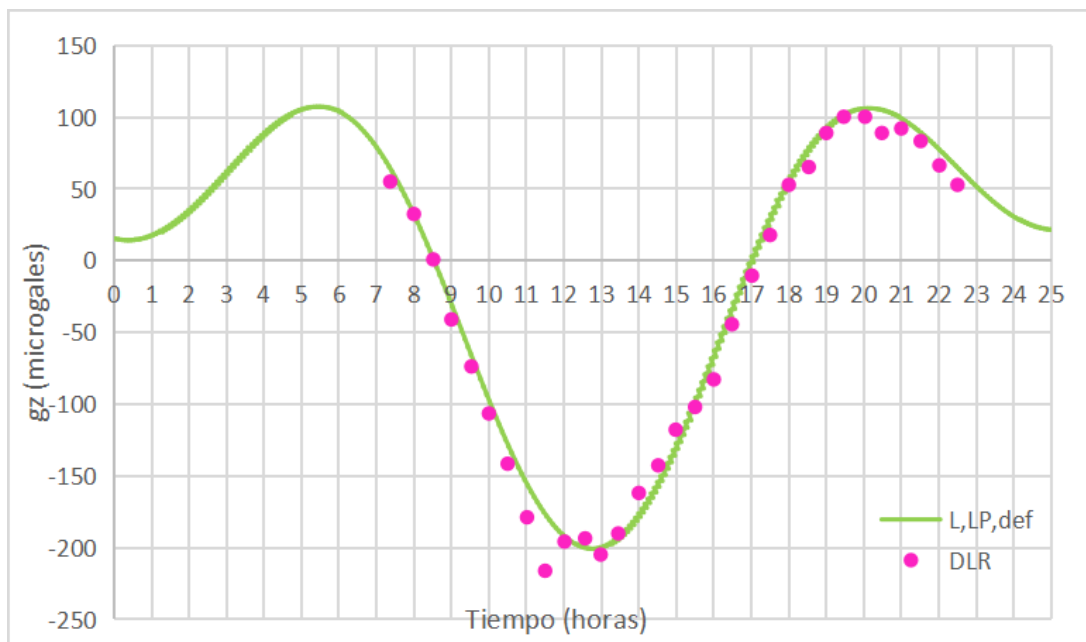


Figura 4.3: Comparación entre el modelo de Tierra elástica en la ubicación de la ciudad de La Plata ($L^{LP,def}$) y las observaciones del gravímetro relativo Lacoste & Romberg (DLR).

En la Figura 4.3 se grafican los datos de gravedad del gravímetro Lacoste & Romberg junto con el modelo de Tierra elástica.

En la Figura 4.4 se muestra la diferencia entre el modelo de Tierra elástica y las mediciones de gravedad del aparato Lacoste & Romberg. Se observa que la máxima diferencia entre el modelo y la observación es de 32,660 microgales.

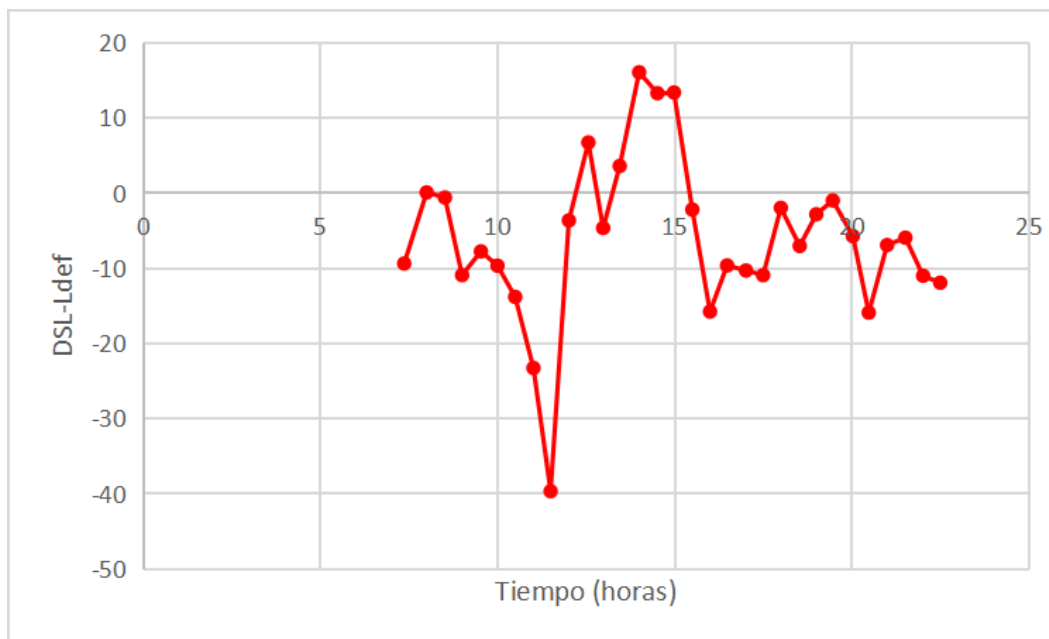


Figura 4.4: Diferencia entre el modelo para una Tierra elástica y las mediciones en la ciudad de La Plata.

Nuevamente se calculó la desviación estándar a partir de considerar en la ecuación (4.1) $X_i = L^{LP,def} - DLR$:

$$\sigma_{def}^{LP} = \sqrt{\frac{\sum_i^{30} ((DLR - L^{LP,def})_i - 0,9033)^2}{30}} = 10,7693 \quad (4.3)$$

En este caso, σ_{def}^{LP} fue de 10,7693 microgales. Si bien el error puede considerarse significativo, se redujo un 40%.

4.2. *Eclipse en AGGO*

Los datos de variación gravimétrica de AGGO DGS^{CA} fueron corregidos como se describió en la sección 3.3 y posteriormente se compararon con el modelo proporcionado por Longman para una Tierra rígida y para un Tierra elástica utilizando los números de Love estimados por Longman (1963).

En la Figura 4.5 se muestran los datos de gravedad de AGGO corregidos y los valores estimados con el modelo de Longman para la **Tierra rígida**.

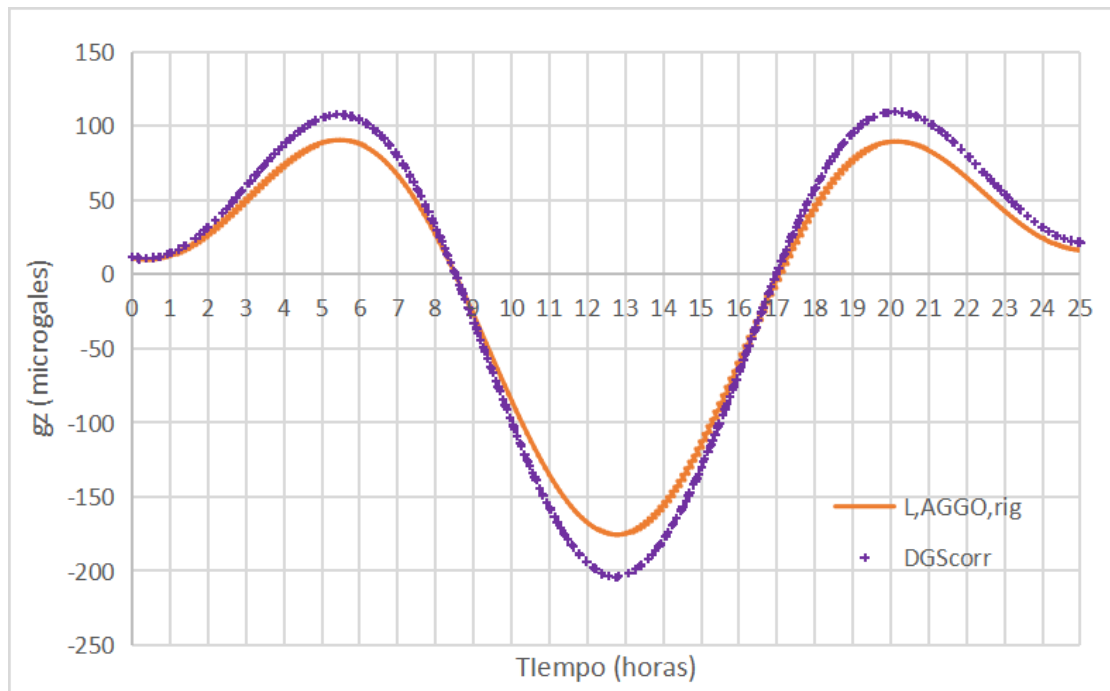


Figura 4.5: Comparación entre los datos de AGGO corregidos (en violeta) y el modelo de Longman para una Tierra rígida (en naranja).

En la Figura 4.6 se muestra el gráfico de la diferencia $L_i^{AGGO,rig} - DGS_i^{CA}$.

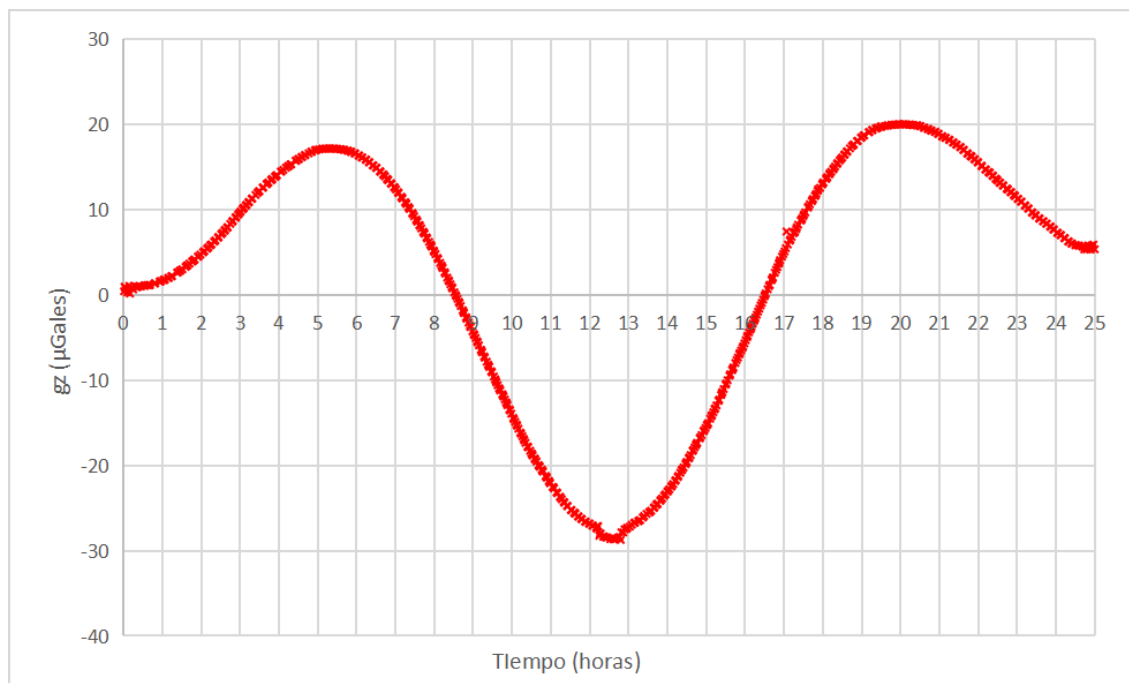


Figura 4.6: Diferencia entre los datos de AGGO corregidos y el modelo de Longman para una Tierra rígida.

Nuevamente se calculó la desviación estándar entre el dato observacional y el

modelo a partir de la siguiente ecuación:

$$\sigma_{rig}^{AGGO} = \sqrt{\frac{\sum_i^N ((DGS_{corr} - L_{rig})_i - 2,186)^2}{1500}} = 15,0750 \quad (4.4)$$

siendo $N=1500$, $L_i^{AGGO,rig}$ el i -ésimo término de la serie de datos del modelo de Longman para la Tierra rígida en la ubicación del observatorio de AGGO (Berazategui) y DGS^{CA} el i -ésimo término de los datos de AGGO corregidos. La desviación estándar en este caso es $\sigma_{def_m}^{LP} = 15,0750$ microgales.

Para el caso de la Tierra rígida la discrepancia entre ambas series es notoria. Se puede ver en dos puntos donde las funciones alcanzan su máximo una diferencia de 17,143 y 19,995 microgales y el mínimo absoluto de las funciones tiene una diferencia de 28,516 microgales. Esta serie temporal de las diferencias está dominada por un período semi-diurno, por lo que la discrepancia entre observación y modelo puede asumirse que es una señal residual de mareas. Además, la señal semi-diurna de diferencias está en fase con la señal observada, lo cual pone en evidencia que la discrepancia modelo-observación radica en un factor de escala entre ambos, el cual es el valor del factor gravimétrico δ_n adoptado en el modelado suponiendo una Tierra rígida.

Para el caso de una **Tierra elástica**, la diferencia entre el modelo y las observaciones es menor. Se grafica en la Figura 4.7 el modelo descrito en el Capítulo 2 junto con los datos del gravímetro superconductor.

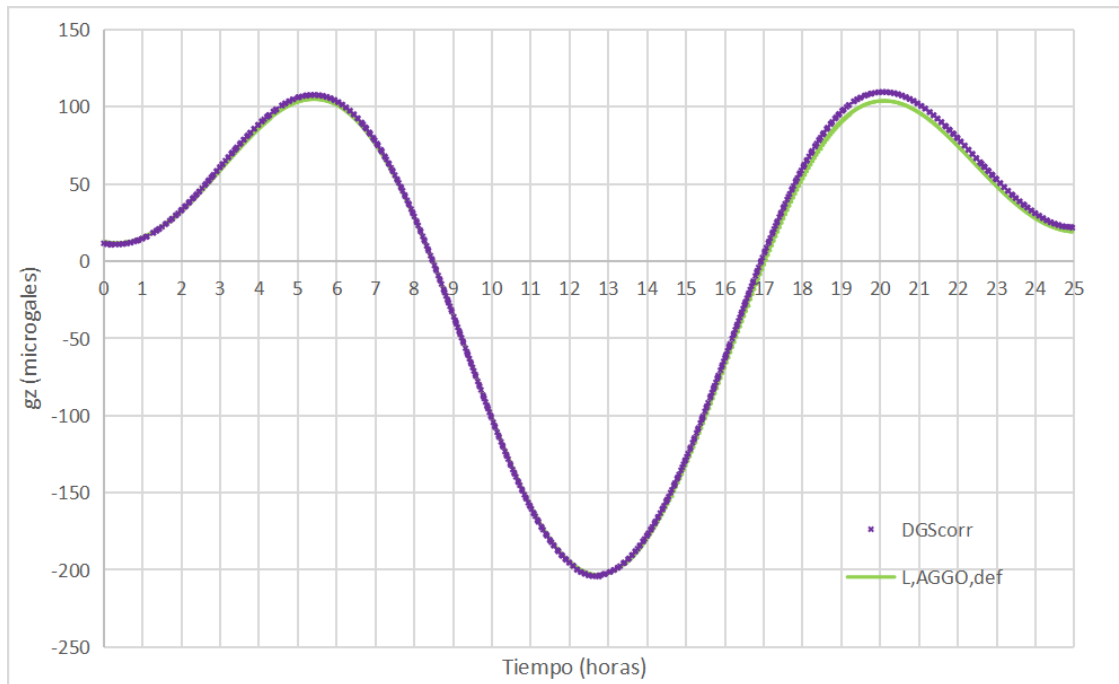


Figura 4.7: Comparación entre los datos de AGGO corregidos (en violeta) y el modelo para una Tierra elástica con los parámetros elásticos de Longman (1963) (en verde).

Para ver con más claridad el error entre ambos, se grafica en la Figura 4.8 la diferencia entre ambas series de datos.

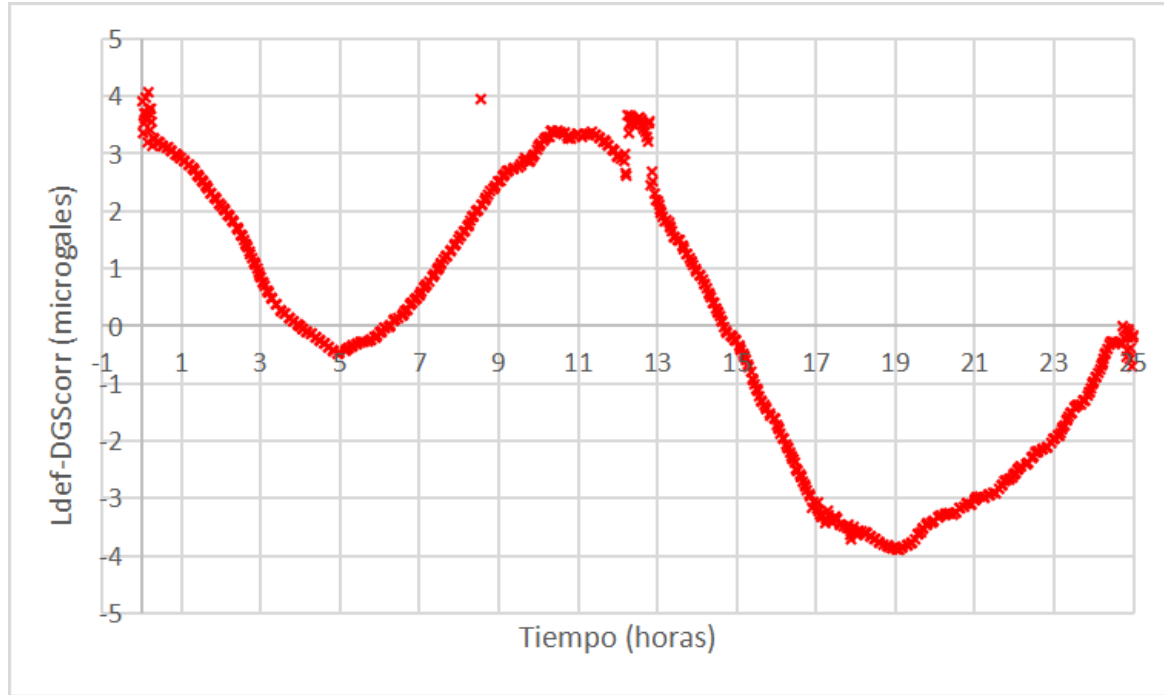


Figura 4.8: Diferencias entre el modelo de Longman para una Tierra elástica y los datos corregidos de AGGO.

La función diferencia representa la similitud entre los datos y el modelo, por lo que vemos que el máximo apartamiento del modelo con la realidad es de 6,321 microgales, a diferencia de los 28,516 microgales obtenidos para el modelo de Tierra rígida. Comparando las Figuras 4.8 y 4.10, se observa que el orden de magnitud de tal diferencia es menor en el caso de modelado para una Tierra elástica.

En la Figura 4.8 se percibe que la serie de diferencias representa un periodo semi-diurno y, por lo tanto, sugiere que está dominada por señales residuales de mareas. Sin embargo, en este caso esta señal diferencial periódica está desfasada respecto de la señal observada. Teniendo en cuenta la magnitud de esta diferencia periódica, se concluye que esto puede ser el efecto de la carga oceánica, la cual no fue corregida durante el acondicionamiento de los datos de gravedad.

Se calculó la desviación estándar a partir de la siguiente ecuación:

$$\sigma_{def}^{AGGO} = \sqrt{\frac{\sum_i^{1500} ((DGS - L_{def})_i - (2,415))^2}{1500}} = 2,3710 \quad (4.5)$$

siendo $L_i^{AGGO,def}$ el i -ésimo término de la serie de datos del modelo de Tierra elástica en la ubicación del observatorio de AGGO (Berazategui).

4.3. *Parámetros elásticos*

En esta sección se analiza el modelo generado a partir de los nuevos valores de parámetros elásticos calculados por Rutkowska y Jagoda (2010) utilizando datos de Distanciometría Láser a Satélite (SRL), mencionados en el Capítulo 2, sección 3. Los nuevos valores de los números de Love fueron introducidos en el código de Fortran de libre acceso para calcular las variaciones gravimétricas durante el día del eclipse en las posiciones de la ciudad de La Plata y AGGO.

Para las **observaciones en la ciudad de La Plata**, se modeló para tal ciudad la respuesta gravimétrica utilizando los números de Love calculados por Rutowska y Jagoda (2010). Tal modelo se compara con los datos de gravedad tomados por el gravímetro relativo Lacoste & Romberg en la Figura 4.9:

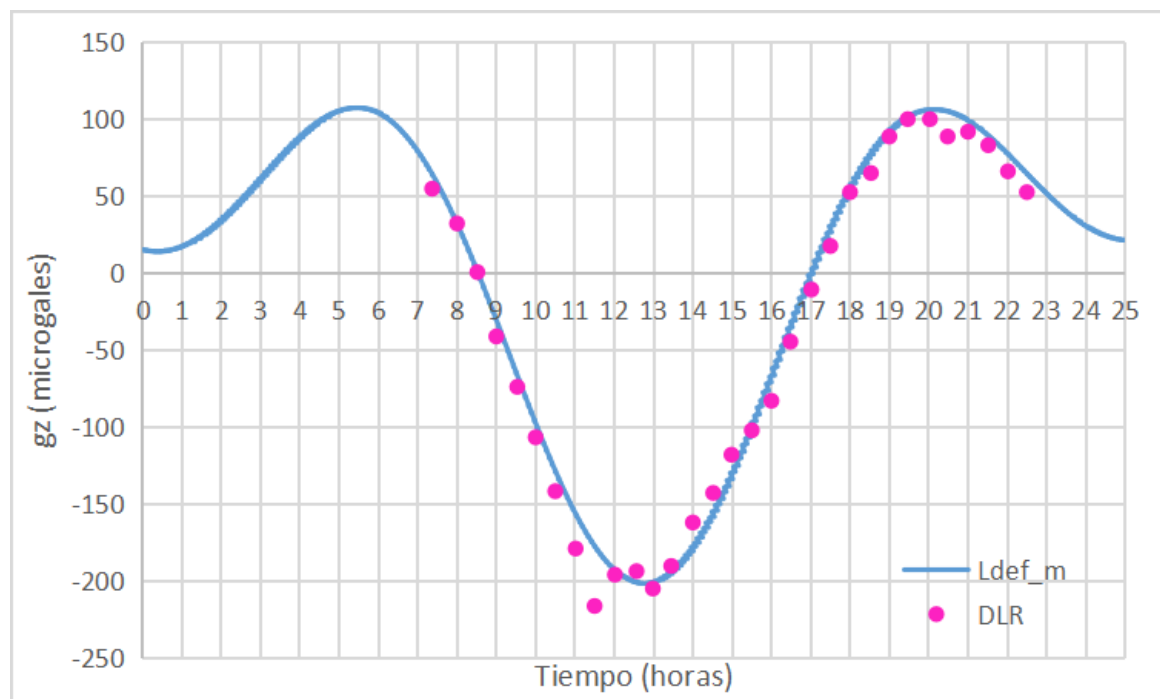


Figura 4.9: Comparación entre los datos de LP (*DLR*) y el modelo de Longman para una Tierra elástica mejorada por los nuevos parámetros de Love (L_{def_m}).

Gráficamente la diferencia puede observarse en la Figura 4.10. Se observa que el máximo apartamiento es de 36,056 microgales:

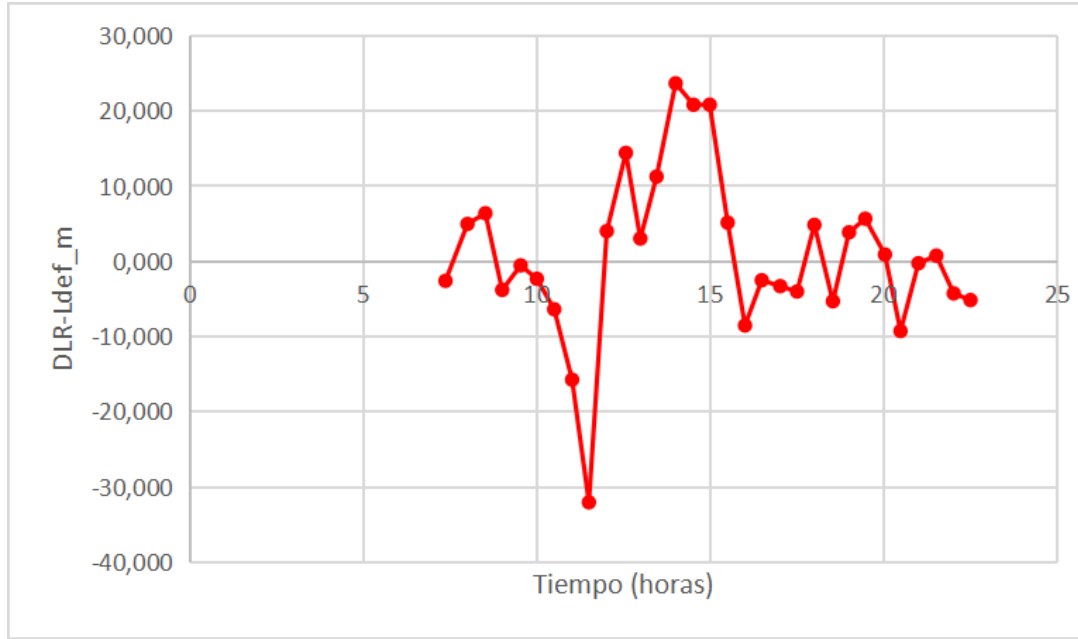


Figura 4.10: Diferencia entre los datos de LP (DLR) y el modelo de Longman para una Tierra elástica mejorada por los nuevos parámetros de Love (L_{def_m}).

Se calcula la desviación estándar:

$$\sigma_{def_m}^{LP} = \sqrt{\frac{\sum_i^{30} ((DLR - L_{def_m})_i - 0,7960)^2}{30}} = 10,8564 \quad (4.6)$$

Si bien según la desviación estándar entre los distintos modelos de Tierra elástica y la medición en la ciudad de La Plata, es ligeramente peor la versión mejorada, (con los números de Love calculados por Longman (1963), la desviación estándar es de 10,7693) debe considerarse que la resolución del aparato de medición Lacoste & Romberg es de 1 microgal, menor que la resolución del modelo presentado. En adición a lo anterior, los datos de tal gravímetro relativo se encuentran inmersos en errores de medición y ruidos antrópicos los cuales empobrecieron la calidad del dato, dando como resultado un sesgo de 10 microgales entre el modelo propuesto y las observaciones realizadas. Por ende, se realiza el mismo análisis para los datos de gravedad en la ciudad de Berazategui, los cuales cuentan con menores errores en la medición y mayor resolución en los datos.

Para el caso de las **observaciones en AGGO**, al calcular la desviación estándar entre la versión mejorada del modelo a partir de los nuevos parámetros (L_{def_m}), con respecto a los datos observacionales (DGS_{corr}), el resultado es:

$$\sigma_{def_m}^{AGGO} = \sqrt{\frac{\sum_i^{1500} ((DGS_{corr} - L_{def_m})_i - (-3,6033))^2}{1500}} = 2,1972 \quad (4.7)$$

microgales. Este resultado tiene menor desvío que el calculado entre el modelo que utilizaba los parámetros calculados por Longman (1963), por lo que el modelo con

los parámetros de Rutkowska y Jagoda (2010) es más fiel a la observación en la estación de AGGO.

En la Figura 4.11 se grafican los datos observacionales de la estación gravimétrica en AGGO junto con la versión mejorada del modelo a partir de la implementación de nuevos parámetros elásticos para la Tierra propuestos por Rutkowska y Jagoda (2010).

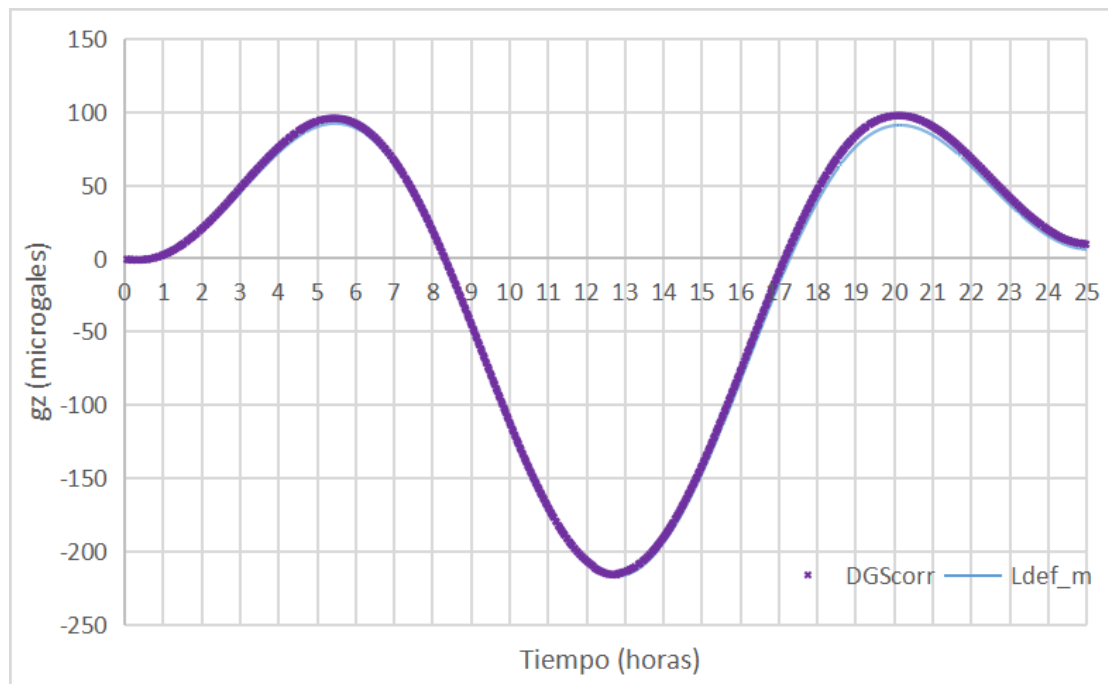


Figura 4.11: Modelo de Tierra elástica con mejores parámetros elásticos para la ubicación de AGGO (L^{def_m}) vs datos del gravímetro Superconductor SG038 (DGS_{corr}).

En la Figura 4.12 se observa la diferencia entre los datos observacionales y el modelo creado a partir de los datos de Rutkowska y Jagoda (2010) muy similar a la mostrada en la Figura 4.8. Se vuelve a apreciar una señal semi-diurna desfasada en tiempo pero de menor amplitud, con dos máximos en 3.974 y 3.289 microgales y dos mínimos en -0.484 y -3.906 microgales, con un rango máximo de 7.88 microgales. Al igual que en la Figura 4.8, esta señal se asocia al efecto de las cargas oceánicas presentes durante la medición y que generalmente para zonas costeras corresponden al 10% de las señales de marea registradas a partir de datos de gravedad.

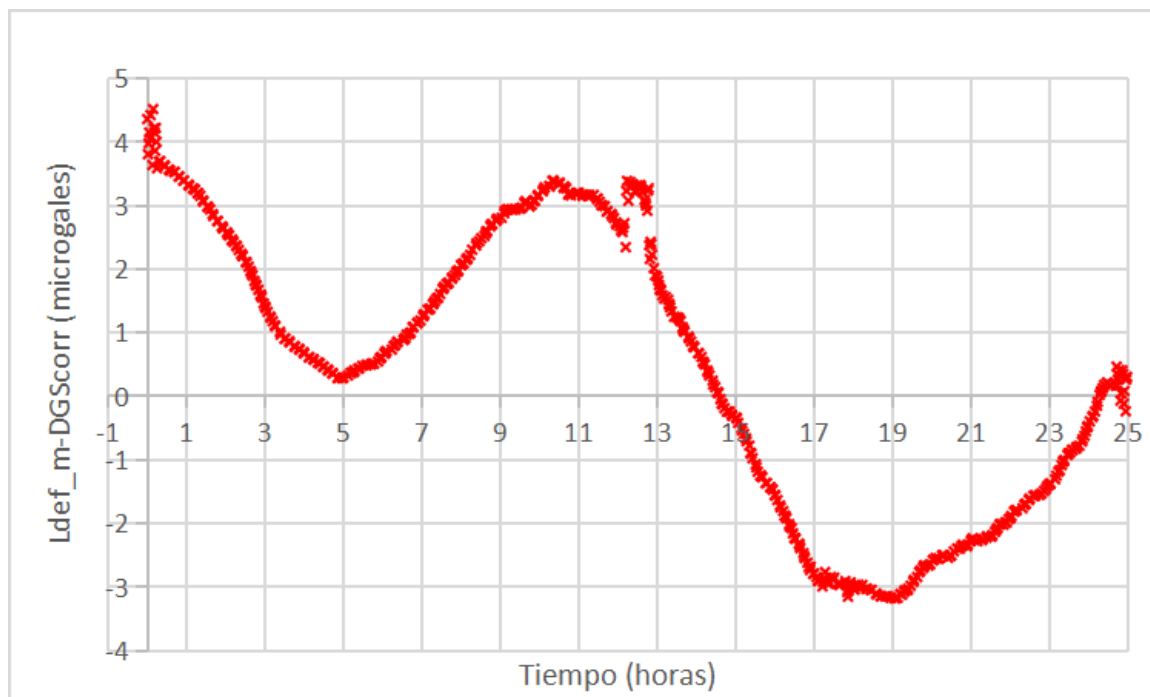


Figura 4.12: Diferencias entre el modelo de Longman para una Tierra elástica con los números de Love calculados por Rutkowska y Jagoda (2010) y los datos corregidos de AGGO.

En la Tabla 2 se muestra un resumen de todos los resultados obtenidos de la desviación estándar entre los modelos presentados y los datos observacionales.

Desviación estándar [microgales]			
	Tierra rígida	Tierra elástica	TD mejorado
La Plata	17,2296	10,7693	10,8564
AGGO	15,0750	2,3710	2,1972

Tabla 2: Resultados de la desviación estándar calculada para los distintos modelos.

Los resultados obtenidos para los nuevos parámetros elásticos conseguidos por SLR son mejores que los obtenidos al utilizar los parámetros de Longman (1963), mejorando un 10% la eficacia del modelado.

Por otro lado, en la Tabla 3 se muestran las amplitudes máximas del eclipse conseguidas para los modelos utilizados y los datos de los gravimétricos relativos:

Datos y modelos utilizados	Rango máximo [microgales]
DLR	316,31
DGS	307
L_{rig}	266,07
L_{def}	308,12
$L_{def.mejorada}$	309,08

Tabla 3: Rango máximo de los modelos y datos observacionales.

Se muestran gráficamente las diferencias de los tres modelados en las Figuras 4.13 y 4.14:

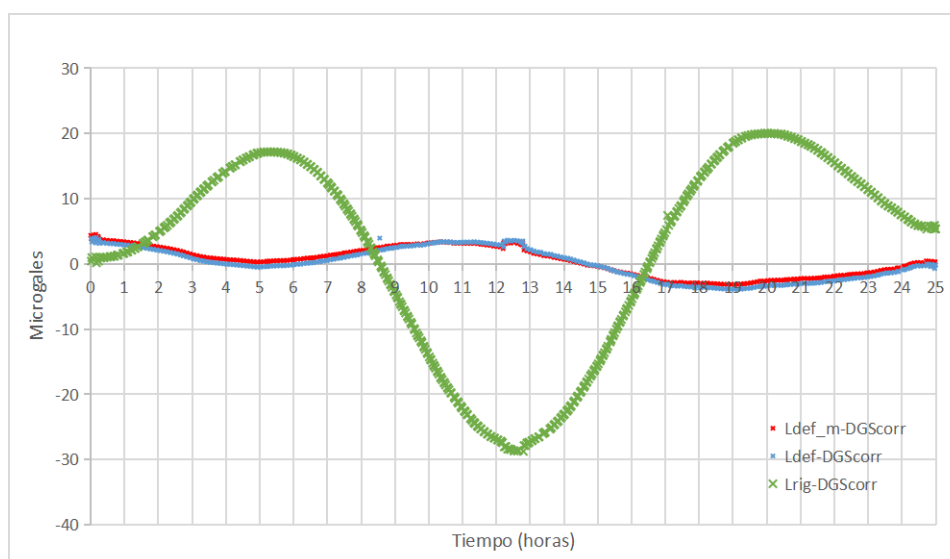


Figura 4.13: Diferencias entre los modelos de TR, TD y TD mejorada.

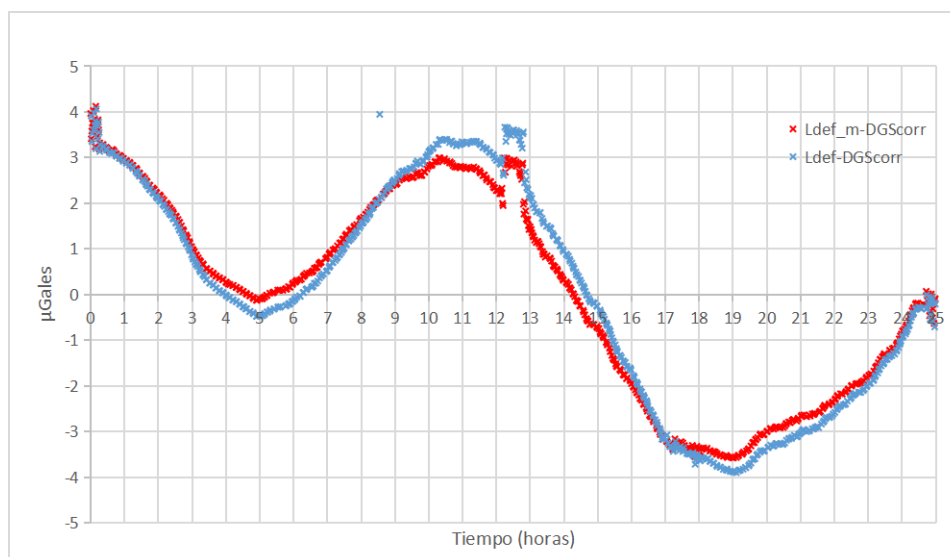


Figura 4.14: Diferencias entre los modelos de TD y TD mejorada.

4.4. Relación con los datos de mareas

El efecto de las cargas oceánicas superpone al efecto de mareas terrestres y, dependiendo de la distancia de la estación a la costa, la carga de marea oceánica puede variar entre el 1% y el 10% de la marea terrestre (Hinderer et al., 2007). Por esto, se contrastan los datos de mareas presentados en el capítulo 1.5 con el resultado de las diferencias entre el gravímetro superconductor SG038 de AGGO (DGS_{corr}) y el modelo mejorado a partir de los números de Love calculados por Rutowska y Jagoda (2010) (L^{def_m}), donde se puede observar una relación entre ambos. Hay una cierta similitud entre los máximos y mínimos de ambas series de datos, como se observa en la Figura 4.15. En la serie de datos de mareas pueden apreciarse 3 mínimos y 2 máximos, donde cada uno tiene una cierta correspondencia con los mínimos y máximos presentes en la serie de diferencias.

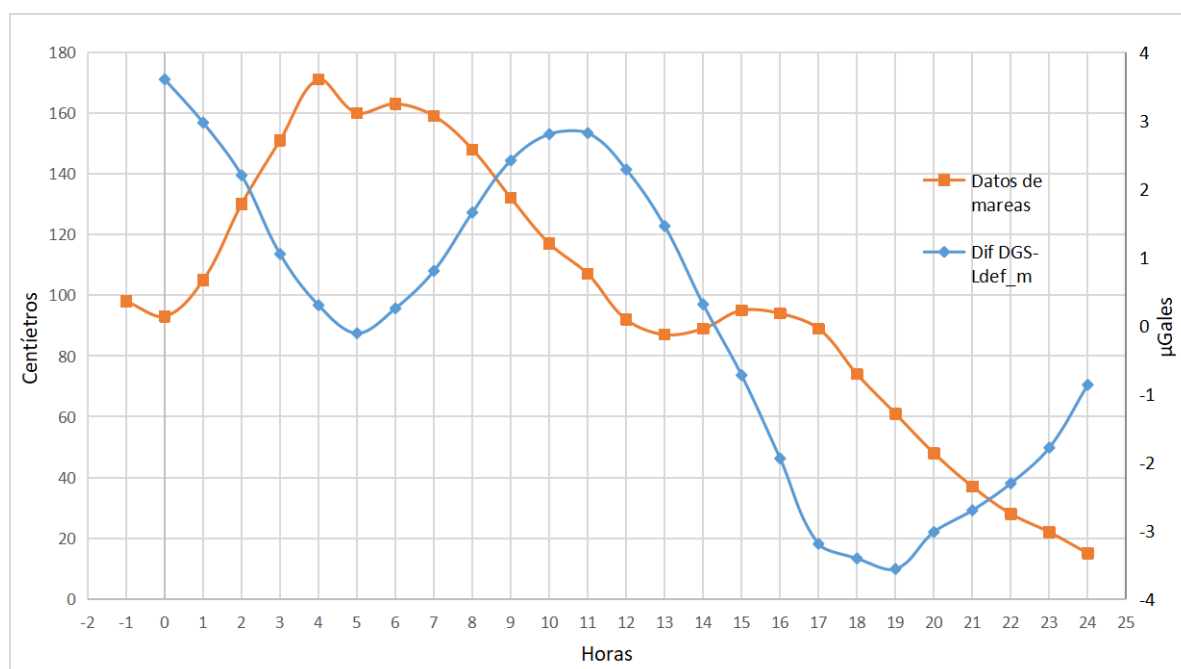


Figura 4.15: Datos de mareas contrastados con las diferencias del gravímetro superconductor SG038 de AGGO y el modelo mejorado a partir de los números de Love calculados por Rutowska y Jagoda (2010).

Esta similitud reafirma la hipótesis de que la diferencia entre el modelo y la observación no es solo producto de señales residuales de mareas que no pudieron ser descritas por el modelo propuesto, sino que además es debido a la influencia de las cargas oceánicas en la variación de la gravedad.

Capítulo 5

Conclusiones

El eclipse del día 14/12/2020 tuvo un efecto significativo sobre la gravedad en las localidades estudiadas, La Plata y Berazategui. Tal efecto fue medido tanto con un gravímetro relativo de carácter manual Lacoste & Romberg como por un gravímetro relativo superconductor SG038 perteneciente a AGGO. En ambos casos se observaron las mismas tendencias, con patrones similares, obteniéndose un mayor grado de resolución con el gravímetro superconductor.

Se observó durante el evento una variación gravimétrica máxima causada por la alineación de los cuerpos celestes Sol, Luna junto con la Tierra. Mientras que el efecto de marea máximo suele ser de 250 microgales, esta variación tuvo una amplitud de **307** microgales en la localidad de Berazategui, donde el ocultamiento solar fue de un 74,76 % por la interposición de la Luna. Esta significativa diferencia de gravedad se atribuye a que la fecha del evento fue próxima al Perihelio, punto en el que la Tierra está más cercana al Sol, lo cual amplifica el efecto de marea solar.

El máximo ocultamiento solar se encuentra desfasado del mínimo de la señal observada. Esta diferencia se atribuye a que el evento no coincide con las distancias mínimas de los astros a la estación de medición. Si el evento hubiera tenido lugar a la hora en la que ambos astros se encontraban a una distancia mínima del punto de observación, el horario en el que se produjo el mínimo valor de gravedad medido hubiera coincidido con el horario en el que ocurrió el máximo ocultamiento. Si además el evento hubiera coincidido con el punto en el que la Tierra se encontraba más cercana al Sol (perihelio), la variación gravimétrica producida por el evento hubiera sido aún mayor. En este caso hipotético, la aceleración de mareas (suma de la atracción gravitacional de un cuerpo celeste y la aceleración orbital debido al movimiento de la Tierra alrededor del baricentro del sistema Tierra-Sol-Luna) llegaría a alcanzar el máximo valor posible.

El fenómeno pudo modelarse a partir de la fórmula de Longman considerando un

modelo de Tierra rígida y otro de Tierra elástica, que aproxima mejor a la realidad al incluir los parámetros elásticos de la Tierra en las fórmulas utilizadas.

Se concluye que los parámetros elásticos de la Tierra calculados por Rutkowska y Jagoda (2010) a partir del análisis de mediciones con SLR representa una mejora en relación a los parámetros calculados por Longman (1963) y utilizados por Agnew (2009). La implementación de los mismos en las ecuaciones propuestas por Agnew (2015) para el cálculo de la variación gravimétrica producida por el Sol y la Luna presenta una mejora del 10% al modelo de Tierra elástica para la localidad de Berazategui y la época de estudio.

El resultado más desfavorable obtenido para el caso de La Plata se adjudica a la menor resolución de la medición y la presencia de ruidos antrópicos durante el proceso de medición. Si bien en el cálculo de la desviación estándar para el caso del modelo de Longman (1963) se obtuvo una mejora de aproximadamente el 1%, esto no refuta ni afirma que los parámetros elásticos calculados por Rutkowska y Jagoda (2010) puedan ser utilizados para mejorar el modelo de Longman (1963) para el cálculo de aceleración de mareas.

Si bien los modelos propuestos logran describir la mayor parte de la señal observada, el error residual excede la resolución de los gravímetros. Esto se asocia a errores del modelado y efectos no contemplados durante el desarrollo de este trabajo. Esto puede adjudicarse mayoritariamente a la carga oceánica, presente en las observaciones realizadas en las ciudades de La Plata y Berazategui, que cabe aclarar son ciudades cercanas a la costa.

En cuanto a la marea oceánica y la terrestre, no suele darse que coincidan los máximos y mínimos en tiempo debido a que la marea oceánica se genera en las grandes cuencas oceánicas y la onda se desplaza hasta la costa sufriendo muchos retrasos en tiempo debido a la variación de la batimetría y la forma de la costa.

Bibliografía

-Agnew, D. 2009. Earth tides. Treatise on Geophysics vol 3 de T Herring, Gen ed. G Schubert (Amsterdam: Elsevier) pp 163–195.

-Alterman, Z., H. Jarosch, and C. L. Pekeris, 1961. Propagation of Rayleigh waves in the earth, *Geophys J.*, (The Earth Today), 219-241.

-Alting, Leo Hauschild, Michael Wenzel, Henrik. (1997). Environmental Assessment in Product Development. Proceedings of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 355. 1373-1386. 10.1098/rsta.1997.0063.

-Antokoletz, E. D., Wziontek, H., Tocho, C. (2017). First six months of Superconducting Gravimetry in Argentina. In International Symposium on Gravity, Geoid and Height Systems 2016 (pp. 111-118). Springer, Cham.

-Bartels, J. 1957., *Gezeitenkräfte*, Handbuch der Physik, Vol. XLVIII, Geophysik II, Springer-Verlag, Berlin.

-Doodson, A. T. 1921. The harmonic development of the tide-generating potential, *Proc. Roy. Soc. London, A*, 100, 305.

-Doodson, A. T., and H. D. Warburg, 1941. Admiralty Manual of Tides, Her Majesty's Stationery Office, London.

-Hinderer, Jacques Crossley, David Warburton, Richard. (2007). Gravimetric Methods – Superconducting Gravity Meters. 10.1016/B978-044452748-6/00172-3.

-Longman, I. M. 1959. Formulas for computing the tidal accelerations due to the moon and the sun, *J. Geophys. Res.*, 64 (12), 2351– 2355, doi:10.1029/JZ064i012p02351.

-Longman. I. M. 1963. A Green's Function for Determining the Deformation of the Earth under Surface Mass Loads. *J. Geophys. Res.* <https://doi.org/10.1029/JZ067i002p00845>

-Petit, J. T., Tables for the computation of the tidal accelerations of the sun and moon, *Trans. Am. Geophys. Union*, 35, 193, 1954.

-Rutkowska, M. and Jagoda, M. 2010. Estimation of the Elastic Earth Parameters using the SLR LAGEOS 1 and LAGEOS 2 Data. *Acta Geophysica*. 58. 705-716. doi:10.2478/s11600-009-0062-1.

-Schureman, P. 1924. A manual of the harmonic analysis and prediction of tides, U.S. Coast and Geodetic Survey, Spec. Publ. 98.

-Schureman, P. Ed. 1941. A manual of the harmonic analysis and prediction of tides, U.S. Coast and Geodetic Survey, Spec. Publ. 98.

-Superconducting Gravimeter Data from AGGO/La Plata - Level 1, GFZ Data Services. <http://doi.org/10.5880/igets.lp.l1.001>

-Wziontek, H. 2017. Wolf, P.; Häfner, M.; Hase, H.; Nowak, I.; Rülke, A.; Wilmes, H. Brunini, C.