




SIRGAS
sirgas.ipgh.org

Ref.: Guía 07
Rev.: 1.0
Fecha: 18.11.2024

Revisado: Noviembre 2024


GUÍA07 DIRECTRICES PARA TRABAJO DE CAMPO Y PROCESAMIENTO DE MEDICIONES GRAVIMÉTRICAS

Cita: Gabriel do Nascimento Guimarães, Ezequiel Darío Antokoletz, Carlos Alberto Correa e Castro Junior, Nilton de Souza Ribas Junior, Mauricio Varela Sanchez (2024).
GUÍA07 DIRECTRICES PARA TRABAJO DE CAMPO Y PROCESAMIENTO DE MEDICIONES GRAVIMÉTRICAS. GT III SIRGAS

	Directrices para Trabajo de Campo y Procesamiento de Mediciones Gravimétricas	Ref.	Guía07
		Rev.	1.0
		Fecha	18.11.2024


CONTENIDO

INDICE DE FIGURAS	2
REGISTRO DE CAMBIOS DEL DOCUMENTO	3
GENERALIDADES	3
INTRODUCCIÓN A LA GRAVIMETRÍA	3
1. LA GRAVIMETRÍA.....	3
1.1. LOS GRAVÍMETROS	4
1.2. MEDICIONES GRAVIMÉTRICAS MARINAS, AÉREAS Y SATELITALES	4
1.3. REPOSITORIOS DE DATOS GRAVIMÉTRICOS	4
2. PRINCIPALES APLICACIONES	5
3. IMPORTANCIA EN EL ESTABLECIMIENTO DE REDES VERTICALES.....	5
4. MARCO DE REFERENCIA INTERNACIONAL DE GRAVEDAD TERRESTRE (ITGRF)	5
5. REDES GRAVIMÉTRICAS TERRESTRES	8
5.1. RED DE GRAVEDAD ABSOLUTA.....	8
5.2. RED GRAVIMÉTRICA RELATIVA.....	9
5.3. RED GRAVIMÉTRICA DE DENSIFICACIÓN.....	9
5.4. LÍNEAS DE CALIBRACIÓN	9
6. BIBLIOGRAFÍA	10

	Directrices para Trabajo de Campo y Procesamiento de Mediciones Gravimétricas	Ref.	Guía07
		Rev.	1.0
		Fecha	18.11.2024

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Red IGSN71 (Morelli et al., 1972).	6
Figura 2 Componentes principales del Sistema y Marco de Referencia Internacional de Gravedad Terrestre (ITGRS/ITGRF). Modificada de Wziontek et al. (2021).....	7

	Directrices para Trabajo de Campo y Procesamiento de Mediciones Gravimétricas	Ref.	Guía07
		Rev.	1.0
		Fecha	18.11.2024

REGISTRO DE CAMBIOS DEL DOCUMENTO

Versión 1.0, 11.2024

Este documento se ha estructurado a partir de reuniones de los miembros del GT-III y de las referencias bibliográficas citadas en la sección “Referencias”.

Con el propósito de mantener al día el presente documento, le invitamos comedidamente a enviar sus comentarios, preguntas o sugerencias al Presidente del SIRGAS-GTIII, cuyos contactos se encuentran en <https://sirgas.ipgh.org/>.

GENERALIDADES

Este documento tiene como propósito orientar a los usuarios en las mediciones y el procesamiento de datos gravimétricos, especialmente aquellos que están empezando a trabajar con el tema. Se recomienda que además de leer esta guía, el usuario consulte siempre los documentos del instituto geográfico o responsable de la gravimetría en su país. El documento se divide en tres partes: “Introducción a la Gravimetría” que trata acerca de conceptos básicos sobre el tema; “Trabajo de campo” que aborda aspectos prácticos sobre el instrumental utilizado en campo y los métodos de medición; y por último, la sección de “Procesamiento de mediciones gravimétricas” que desarrolla un paso a paso de cómo se recomienda procesar a los datos medidos en campo.

INTRODUCCIÓN A LA GRAVIMETRÍA

I. LA GRAVIMETRÍA

El conjunto de técnicas y procedimientos destinados a medir la aceleración de la gravedad se denomina gravimetría, que etimológicamente significa medida de un peso (*gravis* es peso en latín y *metron* es medida en griego). En la práctica, cuando se realiza una medición gravimétrica, se mide usualmente la magnitud de la aceleración de la gravedad g ($g = |\vec{g}|$) sobre o cerca de la superficie terrestre.

La unidad de medida de la gravedad en el Sistema Internacional de Medidas (SI) es m/s^2 . Por otro lado, en Geodesia, la unidad más comúnmente utilizada es el *Gal* (en honor a Galileo Galilei) y las subunidades, el *mGal* y el μGal . El *mGal* se define como:


$$1 \text{ mGal} = 10^{-3} \text{ Gal} = 0,001 \text{ cm/s}^2 = 10^{-5} \text{ m/s}^2$$

y el μGal como:

$$1 \mu Gal = 10^{-6} \text{ Gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2.$$

En Geodesia, la Gravimetría tiene como objetivo determinar el campo de gravedad terrestre como una función de la posición y del tiempo mediante mediciones de gravedad realizadas sobre o cerca de la superficie de la Tierra. Las mediciones gravimétricas realizadas sobre la superficie terrestre se clasifican en absolutas y relativas.

En las mediciones absolutas de la gravedad, el valor de g en un punto es determinado por medio de la observación directa de las dos cantidades fundamentales de la aceleración: distancia y tiempo (Torge, 1989). En los gravímetros absolutos más utilizados, g se determina a través del experimento de caída libre de una masa de prueba. En las mediciones relativas de gravedad, sólo una cantidad fundamental de la aceleración es observada: la distancia. En este caso, las variaciones de esta cantidad se miden a partir del principio masa-resorte, ya sea entre dos estaciones (A y B) o bien sus variaciones en el tiempo en una estación determinada. En el primer caso, para conocer la aceleración de gravedad en una estación B, la estación A debe contar con el valor de la aceleración de gravedad establecido con un gravímetro absoluto. Con gravímetros relativos solo se puede conocer la diferencia de

	Directrices para Trabajo de Campo y Procesamiento de Mediciones Gravimétricas	Ref.	Guía07
		Rev.	1.0
		Fecha	18.11.2024

gravedad entre ambas estaciones. En el segundo caso, se estudian variaciones temporales del campo de gravedad de la tierra en una estación determinada.

1.1. LOS GRAVÍMETROS

Los gravímetros son los instrumentos que permiten medir la gravedad. Para la medición absoluta de la gravedad se utilizan equipamientos de caída libre y tiro vertical (los péndulos actualmente se encuentran en desuso). Hoy en día, los **gravímetros absolutos** más empleados son del tipo caída libre, y corresponden a las series A10 y FG5 fabricados por Micro-g LaCoste™. Estos dispositivos son sensibles y voluminosos, lo que dificulta su transporte. En los laboratorios las mediciones se realizan en lugares muy estables, en condiciones especiales de temperatura y humedad y, preferentemente, sobre pilares bien monumentados. En el campo se eligen ubicaciones con cierta estabilidad, de fácil acceso al vehículo, resguardadas del sol, la lluvia y el viento. Por lo general, se realizan cientos de mediciones para obtener el valor absoluto de la aceleración de la gravedad, realizando previamente un procesamiento de las observaciones. Los **gravímetros relativos** de campo son menos precisos que los absolutos, por regla general son más ligeros, portátiles y considerablemente más económicos. Los gravímetros relativos modernos emplean el principio masa-resorte. La fuerza de gravedad provoca una variación en la elongación del resorte y midiendo las variaciones en la elongación del resorte es posible deducir la variación de g . Esta variación de gravedad Δg se obtiene a partir del cómputo de las diferencias de longitud entre las estaciones (Tocho et al., 2020). Para estudios de variaciones temporales de la gravedad en una estación determinada, los gravímetros superconductores son gravímetros muy sensibles y de alta estabilidad. Estos son del tipo masa-resorte, pero no poseen resorte ya que este es reemplazado por un resorte virtual que emplea el principio de levitación magnética de la masa de prueba. En general, estos gravímetros encuentran en laboratorios y observatorios geodésicos.

En el caso de los gravímetros relativos, algunas definiciones son importantes. El **factor de escala instrumental** de un equipo es el factor de transformación que permite pasar de una lectura instrumental a unidades de $mGal$. La **deriva instrumental** es un fenómeno relacionado al propio desgaste de los componentes que integran el gravímetro, además de otros factores como el transporte, cambios en la temperatura y su edad, que influyen directamente en la lectura. La deriva se ve como una variación de corto plazo (horas) en las observaciones de un gravímetro si se observa en una estación fija. Existen dos tipos de deriva. La **deriva estática** es aquella en la que existe aun cuando el gravímetro permanece inmóvil durante un período de tiempo. En general, en un circuito, cuando el gravímetro se queda inmóvil por más de dos horas, la deriva estática se vuelve significativa y debe corregirse. La **deriva dinámica** ocurre cuando el gravímetro se está moviendo como, por ejemplo, en el transporte de una estación para otra. La manera en cómo las la deriva instrumental puede ser corregida y una descripción detallada al respecto de los gravímetros más utilizados es presentada en la Guía 2 - Trabajo de campo.


1.2. MEDICIONES GRAVIMÉTRICAS MARINAS, AÉREAS Y SATELITALES

Además de medir la gravedad en la superficie terrestre, hay otras formas de obtener el valor de g . En el mar, existen dos formas de medir la gravedad. La primera consiste en bajar un gravímetro al fondo del mar dentro de un recipiente resistente al agua. Este proceso consume mucho tiempo, pero la medición es muy precisa (0,1 $mGal$) (MicrogLaCoste, 2024). La segunda manera es situar el gravímetro en un barco en movimiento, sobre una plataforma nivelada. En la Gravimetría aérea los instrumentos se sitúan en aviones o helicópteros, donde el gravímetro debe estar en una plataforma giroscópicamente estabilizada. Otra forma de conocer el campo de gravedad terrestre es por medio de mediciones satelitales. Desde el inicio de los años 2000, tres misiones satelitales del campo de gravedad se llevaron a cabo, CHAMP (Reigber et al., 1996), GRACE (GRACE, 2008) y GOCE (ESA, 2006). A partir del 2018, fue lanzada la misión GRACE-FO (Landerer et al., 2020) como continuación de GRACE.

1.3. REPOSITORIOS DE DATOS GRAVIMÉTRICOS

Se recomienda que los datos gravimétricos recabados en campo sean disponibles en repositorios abiertos a la comunidad. La Asociación Internacional de Geodesia pone a disposición de la comunidad el servicio del Bureau Gravimétrique International (BGI¹). El BGI está destinado a garantizar el inventario de datos y la disponibilidad a largo plazo de las mediciones de gravedad adquiridas sobre la superficie terrestre. Su tarea principal es la recopilación, validación y archivo de todo tipo de mediciones de gravedad adquiridas a partir de estudios

¹ <https://bgi.obs-mip.fr/>

	Directrices para Trabajo de Campo y Procesamiento de Mediciones Gravimétricas	Ref.	Guía07
		Rev.	1.0
		Fecha	18.11.2024

terrestres, marinos o aéreos y la difusión de los datos y productos derivados a una amplia variedad de usuarios con diversos fines. En complemento, el repositorio de AGrav (*Absolute Gravity Database*²) es el servicio de recopilación de datos de gravedad absoluta del Servicio Internacional de Campo de Gravedad (*International Gravity Field Service – IGFS*). Este repositorio fue oficializado como medio de documentación del Marco de Referencia Internacional de Gravedad Terrestre (ITGRF, ver Sección 4) y es mantenido de forma conjunta entre el BGI y la Agencia Federal de Cartografía y Geodesia de Alemania (BKG).

2. PRINCIPALES APLICACIONES

Las observaciones de gravedad se utilizan para una gran variedad de aplicaciones, desde el modelado de geoide hasta la prospección de recursos naturales. A grandes rasgos, estas aplicaciones se dividen en: aplicaciones geodésicas y aplicaciones geofísicas.

Las aplicaciones geodésicas se relacionan al estudio de la figura y forma física de la Tierra, la cual es modelada a partir del campo de gravedad. Por otra parte, la superficie de referencia más utilizada para la determinación de alturas, el geoide, únicamente puede ser determinada a partir de observaciones de gravedad, así como también la determinación de sistemas de referencia verticales.

En cuanto a las aplicaciones geofísicas, las observaciones de gravedad aportan información sobre la estructura interna de la Tierra, así como también sobre la distribución de densidades. En este sentido, el estudio del campo de gravedad contribuye a la prospección de recursos naturales y la descripción de estructuras geológicas debajo de la superficie terrestre. Además, el estudio de las variaciones temporales del campo de gravedad ha permitido contribuir al estudio de efectos hidrológicos, de las variaciones del nivel medio del mar, de efectos de ajuste glacio-isostático y geodinámicos, entre otros.

3. IMPORTANCIA EN EL ESTABLECIMIENTO DE REDES VERTICALES

La Gravimetría es importante para el establecimiento de las alturas vinculadas al *International Height Reference Frame* (IHRF). Los valores de gravedad medidos alrededor de una estación IHRF son los principales datos utilizados para calcular los valores de potencial de gravedad y como consecuencia las alturas. En este sentido, la calidad y los estándares de las mediciones deben ser tomados en cuenta. El GTIII ha preparado una guía técnica sobre la realización de mediciones gravimétricas alrededor de estaciones IHRF³. En este documento el usuario encontrará los aspectos generales e información sobre cómo proceder en las mediciones gravimétricas.

4. MARCO DE REFERENCIA INTERNACIONAL DE GRAVEDAD TERRESTRE (ITGRF)

Uno de los principales objetivos de la Asociación Internacional de Geodesia (IAG) actualmente es el establecimiento de un marco de referencia de gravedad que reemplace el actual, el *International Gravity Standardization Network 1971* (IGSN71). La red IGSN71 fue adoptada durante la XV Asamblea General de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica (IUGG) en 1971. Esta red global cuenta aproximadamente 1900 estaciones y surge a partir de un ajuste que incluía observaciones de gravedad relativa con gravímetros de masa-resorte y de péndulo, vinculadas a las primeras observaciones de gravedad absoluta realizadas con gravímetros de caída libre. El principal objetivo era contar con una cobertura global (Figura 1) y se obtuvo una precisión de 0,1 mGal (Morelli et al., 1972).

² <https://bgi.obs-mip.fr/data-products/gravity-databases/absolute-gravity-data/>
<https://agrav.bkg.bund.de/>

³ <https://sirgas.ipgh.org/recursos/guias/>



Figura 1 Red IGSN71 (Morelli et al., 1972).


Si bien la red IGSN71 proveyó una referencia a nivel global por mucho tiempo, el advenimiento y la disponibilidad de gravímetros absolutos que alcanzan precisiones de unos pocos μGal , provocó que la red cayera en desuso. Por otra parte, muchas de las estaciones ya no se encuentran disponibles, por lo que el marco de referencia en muchos casos no es accesible. Por esta razón, la IAG comenzó a trabajar en un nuevo marco basado en observaciones de gravedad absoluta y que permita el reemplazo de IGSN71. Esto queda establecido formalmente a través de la Resolución N° 2 de la IAG (Drewes et al., 2016) adoptada durante la XXVI Asamblea General de la IUGG en el año 2015 y la creación del *Joint Working Group JWG2.1.1: Establishment of the International Gravity Reference Frame*. Durante los primeros años, el JWG2.1.1 ha trabajado arduamente en la definición de un sistema de referencia gravimétrico y su materialización global y estable que permita el monitoreo del campo de gravedad y sus variaciones en el tiempo. Reconociendo que el establecimiento de dicho sistema y su correspondiente marco es únicamente posible a través de la cooperación entre instituciones que actualmente realizan observaciones de gravedad absoluta, la IAG establece en su Resolución N° 4 de la IAG del año 2019 (Poutanen y Rózsa, 2020) la necesidad de integrar instituciones a nivel nacional, regional e internacional para la realización de dicho sistema.

El Sistema de Referencia Internacional de Gravedad Terrestre (ITGRS) reúne un conjunto de principios fundamentales y convenciones que permiten la definición de la gravedad estable en el tiempo (Figura 2). Esta queda definida a través de la aceleración instantánea del experimento de caída libre, medida en el Sistema Internacional de Unidades (SI) y un conjunto de convenciones dadas por el *ITGRS Conventions* (Wziontek et al., 2021). Estas convenciones establecen una serie de correcciones independientes del tiempo:

- El concepto zero-tide (Mäkinen, 2021) para el tratamiento de la marea permanente;
- Una atmósfera estándar que sirva de referencia para las correcciones atmosféricas;
- La orientación del eje de rotación de la Tierra, definida por el *International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS)*.

Estas definiciones quedan oficialmente adoptadas por la IAG para la definición del ITGRS, a través de la Resolución N° 1, adoptada durante la XXVIII Asamblea General de la IUGG en el año 2023⁴.

⁴ <https://www.iag-aig.org/doc/651bd7f2e3cbf.pdf>

	Directrices para Trabajo de Campo y Procesamiento de Mediciones Gravimétricas	Ref.	Guía07
		Rev.	1.0
		Fecha	18.11.2024

Sistema de Referencia Principios fundamentales	Marco de Referencia Realización del Sistema
Definición de gravedad estable en el tiempo	Mediciones
<ul style="list-style-type: none"> • Aceleración instantánea de la caída-libre, medida en el Sistema Internacional de Unidades (SI) • Conjunto de correcciones convencionales independientes del tiempo: <ul style="list-style-type: none"> ➤ Marea permanente (zero-tide concept); ➤ Atmósfera estándar; ➤ Eje de rotación de la Tierra definido por el IERS. 	<ul style="list-style-type: none"> • Observaciones con gravímetros absolutos (época, gravedad, gradiente, altura de referencia) • Comparación entre gravímetros absolutos (nivel común, compatibilidad entre observaciones y procesamientos, detección de errores sistemáticos) • Conjunto de correcciones convencionales para las variaciones temporales (mareas, carga oceánica, atmósfera, movimiento del polo) • Infraestructura y documentación (marcas, base de datos)

Figura 2 Componentes principales del Sistema y Marco de Referencia Internacional de Gravedad Terrestre (ITGRS/ITGRF). Modificada de Wziontek et al. (2021).


El Marco de Referencia Internacional de Gravedad Terrestre (ITGRF), como materialización del ITGRS queda establecido a partir de mediciones realizadas con gravímetros absolutos en estaciones de referencia (Figura 2) y con una exactitud relativa de 10^{-8} o mejor (Wziontek et al., 2021). Cada observación deberá ser debidamente referenciada con datos como la época de observación, valor de gravedad, correcciones aplicadas, altura de referencia y gradiente vertical de gravedad utilizado.

Dado que los gravímetros absolutos definen un nivel de referencia individual para cada instrumento, uno de los aspectos más importantes del Marco es la comparación entre gravímetros absolutos. Estas son campañas de medición donde participan distintos gravímetros absolutos que realizan el Marco a fin de establecer un nivel medio común entre los distintos instrumentos y asegurar la compatibilidad entre sus observaciones. Estas comparaciones son organizadas en forma periódica a nivel regional o internacional y son indispensables para que las observaciones de un dado instrumento estén integradas al ITGRF. Esto permite además compatibilizar el procesamiento y las correcciones aplicadas a las observaciones, y detectar errores sistemáticos.

Dentro del *ITGRS Conventions* se establecen también una serie de modelos y recomendaciones para las correcciones temporales (Wziontek et al., 2021). En el caso de las mareas terrestres, estas deben ser corregidas con un desarrollo en armónicos esféricos según el desarrollo de Tamura (1987) de 1200 coeficientes o mayor, y parámetros elásticos provistos por Dehant et al. (1999). En el caso de contar con un modelo local de mareas es posible utilizar este. Las correcciones por efectos de carga oceánica mareal deberán ser corregidas utilizando el modelo FES2004 (Lyard et al., 2006) u algún otro el cual provea una corrección más precisa en la región de medición. Los efectos por movimiento del polo se corrigen según Wahr (1985) y utilizando (como se establece para el ITGRS) las coordenadas del polo publicadas por el IERS. En cuanto a los efectos atmosféricos, estos se tienen en cuenta a través de la presión atmosférica en la estación y un factor de admitancia de $3 \mu\text{Gal}/\text{hPa}$. Además, las convenciones establecen recomendaciones acerca de la altura a la cual el valor de gravedad debe estar dado y la forma de medir el gradiente vertical de gravedad local. Para más detalles se recomienda la lectura de Wziontek et al. (2021).

La infraestructura del ITGRF está dividida en tres categorías, las cuales cuentan con distintas características:

- **Estaciones de referencia:** son aquellas que cuentan con una función de referencia de gravedad establecida a través de al menos una de las siguientes opciones: (a) observaciones periódicas de gravedad absoluta (al menos una cada dos meses); (b) la combinación de observaciones de gravedad absoluta y mediciones de un gravímetro superconductor que permite el monitoreo continuo de variaciones de gravedad; (c) mediciones continuas con un gravímetro cuántico. En cualquier caso, la función de referencia de gravedad debe permitir conocer el valor de gravedad y proveer un acceso al marco de referencia a cualquier tiempo.

	Directrices para Trabajo de Campo y Procesamiento de Mediciones Gravimétricas	Ref.	Guía07
		Rev.	1.0
		Fecha	18.11.2024

- Estaciones de comparación: son estaciones de referencia, es decir, que cuentan con una función de referencia de gravedad pero que además cuentan con facilidades para llevar a cabo campañas de comparación entre gravímetros absolutos.
- Estaciones centrales o core-stations: son estaciones de referencia vinculadas al Marco de Referencia Internacional Terrestre (ITRF), al IHRF y al Sistema de Observación Geodésico Global (GGOS). En este sentido, las estaciones centrales del ITGRF son estaciones centrales de GGOS (GGOS core-sites) y se encuentran co-localizadas con otras técnicas geodésicas.

Por último, tanto las observaciones, las campañas de comparación y la infraestructura deben estar debidamente documentadas y la información debe estar disponible a los usuarios. Esto se hará a través de la Base de Datos de Gravedad Absoluta (AGrav) de la IAG (ver Sección 1.4).

En Sudamérica, actualmente se cuenta con dos estaciones propuestas para integrar el ITGRF: el Observatorio Argentino-Alemán de Geodesia (AGGO) y el Observatorio Nacional de Brasil. AGGO es una estación fundamental de Geodesia, la cual cuenta con el monitoreo continuo de variaciones de gravedad con un gravímetro superconductor y observaciones con un gravímetro absoluto FG5. Esto ha permitido establecer una función de referencia de gravedad continua y estable (Antokoletz et al., 2020) que, en combinación con la infraestructura necesaria para realizar comparaciones entre gravímetros absolutos, permitirá establecer a AGGO como una estación central del ITGRF, vinculada al ITRF y al IHRF (Tocho et al., 2020). Por otra parte, el Observatorio Nacional cuenta con observaciones periódicas realizadas con un gravímetro absoluto FG5 y cuenta además con varios pilares de gravedad que permitirán realizar campañas de comparación en la estación.

5. REDES GRAVIMÉTRICAS TERRESTRES

Tradicionalmente, el establecimiento de estaciones gravimétricas en un territorio se realiza a través de redes, las cuales pueden tener cobertura local, regional, nacional o global. En este contexto, en última instancia, es deseable adoptar una referencia única y suficientemente precisa que permita una adecuada interoperabilidad entre los distintos sistemas y redes existentes, como ocurre con otros marcos de referencia geodésicos. Esta referencia única con cobertura global será proporcionada por ITRF/ITGRF, como se mencionó en el capítulo anterior. Los crecientes esfuerzos de toda la comunidad geodésica global apuntan al establecimiento de este marco en los próximos años.


Para facilitar mejor la implementación de estas estaciones gravimétricas, cada país es responsable de establecer sus propias redes, dentro de las modalidades que le resulten más convenientes, y difundir los resultados de las respectivas estaciones, a través de las instituciones productoras de gravimetría. En una etapa posterior, es deseable que la información gravimétrica este centralizada en bases de datos gravimétricos nacionales. Cabe mencionar el interés del GTIII en apoyar este tipo de iniciativas, con sugerencias de procedimientos estandarizados y mediando en posibles intercambios entre organismos e instituciones internacionales que cuenten con tecnología e instrumentos apropiados para el establecimiento de estaciones gravimétricas.

Por lo tanto, dada la profusión de estaciones gravimétricas ya establecidas alrededor del mundo, provenientes de variados equipos y metodologías, el GTIII presenta una propuesta de clasificación simplificada de las redes gravimétricas, tomando en cuenta, básicamente, los instrumentos utilizados y las metodologías consideradas en las mediciones de las respectivas estaciones gravimétricas: red absoluta, red relativa y red de densificación. Obviamente, los países que ya utilizan sus propias nomenclaturas deben seguir utilizándola. El objetivo de esta sección es aclarar conceptos sobre los distintos tipos de redes gravimétricas con las que un país puede contar.

5.1. RED DE GRAVEDAD ABSOLUTA

Como su nombre indica, las estaciones gravimétricas que conforman la red absoluta se establecerían únicamente con gravímetros absolutos. Este tipo de estación ha ido ganando terreno gradualmente, dada la creciente disponibilidad de equipos de medición de la gravedad absoluta. La precisión de las estaciones depende de los instrumentos utilizados y la estabilidad de la estación, sin embargo, se espera algo mejor que 20 μ Gal.

Todas las estaciones absolutas deben instalarse en lugares estables, seguros y durables a lo largo del tiempo, materializados mediante placas o clavijas de identificación. Además de tener un nombre propio, a través de una

	Directrices para Trabajo de Campo y Procesamiento de Mediciones Gravimétricas	Ref.	Guía07
		Rev.	1.0
		Fecha	18.11.2024

sigla o registro numérico, cada estación debe tener una descripción que contenga la ubicación detallada y la información que se considere relevante.

Estas estaciones, en primera instancia, serán las encargadas de densificar el ITGRF para fungir como referencia de levantamientos gravimétricos locales.

5.2. RED GRAVIMÉTRICA RELATIVA

Durante décadas, las estaciones gravimétricas establecidas a partir de mediciones relativas de gravedad han sido la modalidad más utilizada para satisfacer las necesidades gravimétricas diarias de cada país. Esto se debe esencialmente a la difusión de los gravímetros mecánicos, desde los años 1930, que ofrecían perspectivas prometedoras a las técnicas e instrumentos utilizados hasta entonces para determinar la gravedad.

La red relativa debe estar vinculada a la red de gravedad absoluta y cumplir criterios específicos de precisión en su establecimiento. Este tipo de red está formada por estaciones que tienen precisiones en torno a los $50 \mu Gal$. Aparte de la precisión, la mayor diferencia con respecto a la red de gravedad absoluta serían los instrumentos utilizados. En este contexto, idealmente, las estaciones gravimétricas deben ser establecidas a través de observaciones con más de un gravímetro relativo, de manera de minimizar errores de observación, errores sistemáticos y evaluar la convergencia de los resultados.

De manera similar a lo recomendado para la red absoluta, las estaciones gravimétricas deberán contar con marcas, descripciones y estar monumentadas en ubicaciones estables y seguras.

Además, se debe considerar un aspecto importante en las redes relativas: la necesidad del re-ajuste a las estaciones gravimétricas existentes. Atendiendo a las mejores prácticas, se recomienda que estos ajustes sean efectuados periódicamente, dependiendo de las nuevas estaciones que eventualmente se agreguen a la red de gravedad absoluta. A partir de estos procedimientos, es posible proporcionar a los usuarios información sobre la precisión de cada estación, además de los valores de g .


5.3. RED GRAVIMÉTRICA DE DENSIFICACIÓN

Más densa que las redes absolutas y relativas, la red gravimétrica de densificación es lo que en última instancia genera el conocimiento detallado del campo de gravedad de la Tierra. Normalmente, las estaciones gravimétricas de densificación se establecen en circuitos o líneas, mediante jornadas de medición diarias, en base a la infraestructura proporcionada por las redes de referencia existentes. Aunque es deseable utilizar más de un gravímetro relativo simultáneamente en el establecimiento de redes de densificación, por regla general sólo se utiliza un equipo para determinar las respectivas estaciones gravimétricas. No es necesario materializar redes de densificación, por lo que la gran mayoría de las estaciones cuentan únicamente con identificación, a través de una matrícula, y no se materializan en el terreno.

Se estima que la precisión de cada estación densificada es superior a $0,1 mGal$. El espaciamiento entre estaciones de densificación puede variar dependiendo de los objetivos y la precisión requerida. Sin embargo, para efectos del cálculo de modelos de geoide/cuasi-geoide o cálculo de valores de potencial de gravedad (para alturas del IHRF) cuanto más densa y homogénea sea la distribución de las estaciones gravimétricas, mejor. Por ejemplo, en países de gran extensión como Canadá se ha generado un esquema de densificación de mínimo una observación en áreas de 5 minutos de arco, mientras que en algunos países Europeos se ha logrado llegar a contar con una observación a cada kilómetro de distancia. Es importante resaltar que en este tipo de red es necesario que cada estación sea geolocalizada con información de altura del terreno de la mayor precisión posible o viable (generalmente determinada a través de posicionamiento GNSS).

5.4. LÍNEAS DE CALIBRACIÓN

Las líneas de calibración tienen como propósito servir como estándar para calibrar los gravímetros relativos empleados en las mediciones. Se recomienda establecer líneas con gravímetros absolutos, en sitios estables, seguros, durables a lo largo del tiempo y que permitan rápido acceso y facilidad para realizar las observaciones. Una línea de calibración debe ser establecida con un criterio de cobertura en latitud geográfica y variación en altura. Mayores informaciones sobre las líneas de calibración se encuentran en Escobar et al., (1996), Pastorino et al., (2003), INEGI (2015) y Guimarães et al., (2020).

	Directrices para Trabajo de Campo y Procesamiento de Mediciones Gravimétricas	Ref.	Guía07
		Rev.	1.0
		Fecha	18.11.2024

6. BIBLIOGRAFÍA

Antokoletz, E. D., Wziontek, H., Tocho, C. N. et al. (2020). Gravity reference at the Argentinean–German Geodetic Observatory (AGGO) by co-location of superconducting and absolute gravity measurements. *Journal of Geodesy* 94, 81 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01402-7>

ESA – ESA’s gravity mission – GOCE. (2006). BR-2009. Revised June 2006. ESA Publications Division. ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 2006.

Escobar, I., de Sá, N., Dantas, J., Dias, F. (2018). Linha de Calibração Gravimétrica Observatório Nacional - Agulhas Negras. *Brazilian Journal of Geophysics*, 14(1), 59-66. <http://dx.doi.org/10.22564/rbgf.v14i1.1210>

Dehant, V., Defraigne, P., Wahr, J. M. (1999). Tides for a convective Earth, *Journal of Geophysics Research*, 104(B1): 1035-1058. <https://doi.org/10.1029/1998JB900051>

Drewes, H., Kuglitsch, F., Adám, J., Rózsa, S. The Geodesist’s Handbook 2016. *Journal of Geodesy*, v. 90, n. 10, p. 907–1205, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0948-z>

GRACE – Gravity recovery and climate experiment: Science and mission. (1998). Requirements document, revision A, JPLD-15928, NASA’s Earth System Science Pathfinder Program.

Guimarães, G. N., Blitzkow, D., Matos, A. C. O. C., Castro Junior, C. A. C., Inoue, M. E. B. (2020) 30 years of absolute gravity measurements in Brazil. *Revista Brasileira de Cartografia*, [S. l.], v. 72, n. 1, p. 159–176. <https://doi.org/10.14393/rbcv72n1-50229>

INEGI. (2015) Red geodésica gravimétrica: Guía metodológica. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825078799.pdf

Landerer, F. W., Flechtner, F. M., Save, H., Webb, F. H., Bandikova, T., Bertiger, W. I., et al. (2020). Extending the global mass change data record: GRACE Follow-On instrument and science data performance. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL088306. <https://doi.org/10.1029/2020GL088306>.

Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T., Francis, O. (2006) Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics*. 56(5– 6): 394–415. <https://doi.org/10.1007/s10236-006-0086-x>

Mäkinen, J. (2021). The permanent tide and the international height reference Frame IHRF. *J. Geodyn.* 95, 106. <https://doi.org/10.1007/s00190-021-01541-5>

Micro-g LaCoste. (2024). <http://microglacoste.com/>

Morelli, C., Gantar, C., McConnell, R., Szabo, B., & Uotila, U. (1972). The international gravity standardization net 1971 (IGSN71): DTIC Document

Moritz, H. (1979). Report of Special Study Group N° 539 of I.A.G., Fundamental Geodetic Constants, presented at XVII General Assembly of I.U.G.G., Canberra

Moritz, H. (2000). Geodetic Reference System 1980. *Journal of Geodesy*, 74(1), 128–133. <https://doi.org/10.1007/s001900050278>


Pastorino, M. I., Domínguez, P., I., L., Sokolowski, F., Lauría, E. (2019). Línea De Calibración Gravimétrica En La República Argentina: Metodología Y Resultados. *Revista Geofísica*, n.º 59 (octubre):79-98. <https://www.revistasipgh.org/index.php/regeofi/article/view/567>.

Poutanen, M., Rozsa, S. (eds) The geodesist’s handbook 2020. *Journal of Geodesy* 94 (11). <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01434-z>

Reigber, C. et al. (1996). CHAMP phase-B executive summary. GFZ, STR96/13.

Tamura, Y. (1987). A harmonic development of the tide-generating potential. *Bulletin d’Informations Mares Terrestres*, 99, 6813-6855.

Tocho, C. N., Späth, F. G. E., & Antokoletz, E. D. (2020). *Tópicos de gravimetría : primera parte* (1st ed.). Editorial de la Universidad de La Plata.

	Directrices para Trabajo de Campo y Procesamiento de Mediciones Gravimétricas	Ref.	Guía07
		Rev.	1.0
		Fecha	18.11.2024

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

Wahr, J. (1985). Deformation induced by polar motion, *Journal of Geophysics Research*, 90 (B11): 9363-9368. <https://doi.org/10.1029/JB090iB11p09363>

Wziontek, H., Bonvalot, S., Falk, R., et al. (2021) Status of the International Gravity Reference System and Frame. *Journal of Geodesy*, v. 95, n. 1, p. 7. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01438-9>