

**ADQUISICIÓN DE DATOS GRAVIMÉTRICOS PARA ESTABLECER UNA
ESTACIÓN BASE DE GRAVEDAD EN LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL
DE SANTANDER, CAMPUS BUCARAMANGA**

Johana Katerine Sánchez Pinto

Director

JOSÉ DAVID SANABRIA GÓMEZ
PhD en Física

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
BUCARAMANGA
2018**

**ADQUISICIÓN DE DATOS GRAVIMÉTRICOS PARA ESTABLECER UNA
ESTACIÓN BASE DE GRAVEDAD EN LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL
DE SANTANDER, CAMPUS BUCARAMANGA**

Johana Katerine Sánchez Pinto

**Informe pasantía de investigación presentado para optar al título de
Física**

Director

**JOSÉ DAVID SANABRIA GÓMEZ
PhD en Física**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
BUCARAMANGA
2018**

Agradecimientos

A mi familia, a mi director, y a todas las personas que hicieron parte de este proceso de aprendizaje.

Índice general

Introducción	11
1. Objetivos	13
1.1. Objetivo General	13
1.2. Objetivos Específicos	13
2. Marco Teórico	14
2.1. Ley de Gavitación Universal	14
3. Métodos de medición de la gravedad	20
3.1. Medición absoluta de la gravedad	20
3.2. Medida relativa de la gravedad: El Gravímetro	21
3.3. Sistemas de referencia Gravimétricos	22
4. Marco metodológico	29
4.1. Búsqueda de puntos Geodésicos (Gravimetría) Bucaramanga	30
4.2. Adquisición	33
4.3. Interpretación	41
4.4. Ejecución	45
5. Conclusiones	46
Bibliografía	48

Índice de figuras

2.1. Comparación de las dimensiones del Elipsoide de referencia internacional con una esfera de igual volumen, figura tomada de [1].	15
2.2. La gravedad en la Tierra elipsoidal es la suma del vector de las aceleraciones gravitacionales y centrífugas; $\vec{g} = \vec{a}_G + \vec{a}_c$ en consecuencia, la latitud geográfica (λ) es ligeramente mayor que la latitud geocéntrica (λ'). [1]	16
2.3. Masa fuera del elipsoide (a), exceso de masa debajo del elipsoide eleva el geoide por encima del elipsoide (b). N es la ondulación del geoide.). [1]	17
3.1. Método de caída libre para medir la gravedad absoluta.	21
3.2. Principio del funcionamiento de un tipo de gravímetro inestable (estático).	22
3.3. Mapa de Colombia con las tres estaciones de gravedad absoluta.	24
3.4. SIGNAR: Estaciones Absolutas y redes gravimétricas de primer orden.	26
3.5. SIGNAR: Red gravimétrica de segundo orden	27
3.6. SIGNAR: Red gravimétrica de tercer orden	28
4.1. Puntos Geodésicos (Gravimetría) Bucaramanga	30
4.2. Punto gravimétrico Parque Turbay 1-TE-7	31
4.3. Punto gravimétrico Barrio la Pedregosa 151 CE-2	31
4.4. Punto gravimétrico vía Bucaramanga - La Mata A3-CE -3	32
4.5. Panel frontal del gravímetro, tomada del manual de CG-6.	34
4.6. Lectura del gravímetro.	35
4.7. Configuración de adquisición.	35
4.8. Menú principal del gravímetro.	36
4.9. Configuración en las correcciones del equipo.	36
4.10. Gravímetro CG-6 AUTOGRAV TM SCINTREX	37
4.11. Deriva del gravímetro en la Universidad Industrial de Santander	37
4.12. Test deriva Gravímetro AUTOGRAV TM SCINTREX. Se aprecia el tiempo en que se realizó la primera medición y el tiempo de la última medición, con sus respectivos valores de gravedad relativa. De las diferencias en los valores de la gravedad relativa y el tiempo de medición, se obtiene el valor de la deriva instrumental, que para este caso fue de 1.0475 mgal/día.	38
4.13. Punto gravimétrico Parque Turbay	39
4.14. Circuito AB. Tomada de Google Earth	40
4.15. Gravedad relativa (mgal) vs Número de datos	44
4.16. Punto gravimétrico UIS.	45

Índice de tablas

3.1. Valores de Gravedad y posición (WGS-84) de las estaciones absolutas	23
3.2. Precisión de los valores de gravedad y coordenadas de las estaciones gravimétricas.IGAC	25
4.1. Gravedad en el Parque Turbay	40
4.2. Estación 1 - punto A - Parque Turbay	41
4.3. Datos crudos de gravedad y correcciones en el punto A	42
4.4. Estación 2 - punto B - UIS	42
4.5. Datos crudos de gravedad y correcciones en el punto B	42
4.6. Cierre del circuito punto A - Parque Turbay	43
4.7. Datos crudos de gravedad y correcciones al cierre del circuito	43

Resumen

TÍTULO: ADQUISICIÓN DE DATOS GRAVIMÉTRICOS PARA ESTABLECER UNA ESTACIÓN BASE DE GRAVEDAD EN LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, CAMPUS BUCARAMANGA*

AUTOR: JOHANA KATERINE SÁNCHEZ PINTO**

PALABRAS CLAVE: IGAC, IHRF, IHRS, Gravimetría, Geofísica, Redes Absolutas de gravedad, Puntos geodésicos, Circuito ABA.

DESCRIPCIÓN: En este informe de investigación se ejecutó una metodología para implementar un punto de gravimetría relativa dentro de la Universidad Industrial de Santander, campus Bucaramanga. Este punto de gravedad se estableció, teniendo en cuenta la información y antecedentes que posee el IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi), entidad encargada de medir el campo gravitacional terrestre sobre los NP'S o líneas de nivelación geodésicas que pasan por las principales vías de Colombia.

Se realizó un circuito ABA para establecer el valor de gravedad relativa dentro del campus principal de la Universidad. Para el desarrollo de esta metodología se utilizó un gravímetro CG-6 AUTOGRAV SCINTREX, equipo adquirido por la Escuela de Física de la Universidad Industrial de Santander.

Este tipo de mediciones gravimétricas son importantes porque aportan en la definición y realización del Marco Internacional de Referencia de Altura (IHRF), Sistema Internacional de Referencia de altura (IHRS), como en la definición del modelo del geoide actualizado para Colombia. Los valores de gravedad están referidos al datum de IAGBN (International Absolute Gravity Basestation Network), el cual coincide con IGSN71 (International Gravity Standardization Net).

Como resultado de la investigación, se observó la importancia de tener un punto de gravedad dentro de la Universidad, permitiendo que las adquisiciones gravimétricas tengan un punto conocido, seguro, actualizado y de fácil acceso.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ciencias. Escuela de Física.

Director: PhD José David Sanabria Gómez

Abstract

TITLE: ACQUISITION OF GRAVIMETRIC DATA TO ESTABLISH A STATION BASED ON GRAVITY AT THE INDUSTRIAL UNIVERSITY OF SANTANDER, CAMPUS BUCARAMANGA^{***}

AUTHOR: JOHANA KATERINE SÁNCHEZ PINTO^{****}

KEYWORDS: IGAC, IHRF, IHRS, Gravimetry, Geophysics, Absolute gravity networks, Geodetic points, ABA circuit

DESCRIPTION: In this research report, a methodology was executed to implement a point of relative gravimetry within the Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga campus. This point of gravity was established, taking into account the information and background that the IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi) has, an entity in charge of measuring the gravitational land field on the NP'S or geodetic leveling lines that pass through the main roads of Colombia.

An ABA circuit was made to establish the relative gravity value within the main campus of the University. For the development of this methodology a CG-6 AUTOGRAV SCINTREX gravimeter was used, equipment acquired by the School of Physics of the Industrial University of Santander.

This type of gravimetric measurements are important because they contribute to the definition and realization of the International Height Reference Framework (IHRF), the International Height Reference System (IHRS), as in the definition of the updated geoid model for Colombia. The severity values are referred to the datum of IAGBN (International Absolute Gravity Bastion Network), which coincides with IGSN71 (International Gravity Standardization Net).

As a result of the research, the importance of having a point of gravity within the University was observed, allowing gravimetric acquisitions to have a known, safe, updated and easily accessible point.

^{***} Degree work

^{****} Science Faculty. School of Physics.

Director: PhD José David Sanabria Gómez

Introducción

La gravimetría es uno de los métodos Geofísicos más importantes en la definición de un sistema físico dependiente del campo de gravedad, dicho sistema permite el análisis de fenómenos globales asociados al campo terrestre como lo son, las variaciones del nivel medio del mar, redistribución de masas entre océanos, continentes, el interior terrestre y la deformación de la corteza vertical entre otros. [1]

La forma elipsoidal de la Tierra generada por su rotación tiene importantes consecuencias, no sólo por la variación con la latitud de la gravedad en la superficie de la Tierra, sino también por la velocidad de rotación y la orientación de su eje. [2]

El valor medio de la gravedad en la superficie de la Tierra es de aproximadamente 980,000 mgal. La rotación y el aplanamiento de la Tierra hacen que la gravedad aumente en 5300 mgal desde el ecuador hasta el polo, que es una variación del 0.5%. En consecuencia, las mediciones de la gravedad son de dos tipos. El primero corresponde a la determinación de la magnitud absoluta de la gravedad en cualquier lugar; el segundo consiste en medir el cambio en la gravedad de un lugar a otro [3]. En los estudios geofísicos, especialmente en la prospección por gravedad, es necesario medir con precisión los cambios en la gravedad causados por estructuras subterráneas, para esto se utilizan los gravímetros que son balanzas extremadamente sensibles, que evidencian las diferencias en el peso de una masa cuando ésta se sitúa en diferentes lugares, es decir mide los cambios de peso de una masa situada dentro del aparato. [3]

Las pequeñas variaciones o anomalías de la gravedad pueden ser detectados con instrumentos adecuados. La precisión de los gravímetros es muy alta, así son capaces de medir variaciones muy pequeñas de una estación a otra. Son tres los aparatos clásicos empleados en el método gravimétrico: la balanza de torsión que mide las derivadas de la gravedad, el péndulo que mide la gravedad absoluta o relativa, y el gravímetro que mide la gravedad relativa. Las unidades empleadas son unidades de aceleración de la gravedad o miligales. Siendo $1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2$. [2]

El método Gravimétrico se ha desarrollado en Colombia desde mediados del siglo pasado, está basado en el campo natural de la gravedad y estudia la variación de la componente vertical del campo gravífico terrestre. Sus avances se han realizado por la necesidad de determinar un sistema de referencia vertical para el país, su desarrollo ha sido principalmente impulsado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) ya que este es la autoridad encargada de su actualización. [2]

En el presente reporte de investigación se muestra la metodología que se utilizó para establecer una base de gravimetría en la Universidad Industrial de Santander. Esto se requiere porque cualquier adquisición que se haga de gravimetría necesita tener una base cercana de gravedad relativa, con el fin de “amarrar” el dato conocido al dato por adquirir. Para llevar

a cabo esta metodología se diseñó un circuito ABA, que consta de dos puntos de adquisición, finalizando el circuito en el punto de inicio, en el cuál se adquirió un conjunto de datos. Se espera obtener el valor de gravedad relativo dentro de la Universidad Industrial de Santander.

Capítulo 1

Objetivos

1.1. Objetivo General

Establecer una metodología para implementar una base de gravimetría relativa dentro del campus principal de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

1.2. Objetivos Específicos

- Proporcionar un punto de amarre con una estación de gravedad relativa cercana, con el fin de facilitar las adquisiciones gravimétricas que se realicen.
- Facilitar la toma de datos gravimétricos con la ayuda de la estación base dentro de la Universidad.
- Mantener una estación base de gravimetría actualizada.

Capítulo 2

Marco Teórico

En 1888 un Físico húngaro, el Barón von Eotvos construyó la primera balanza de torsión con fines científicos; en 1917 el Geólogo Hugo von Boeckh, director del Instituto Geológico de Hungría, sugirió la idea de emplear esta balanza de prospección Geológica. Dos años más tarde Schweydar determinó, con el mismo aparato, la forma del domo salino de Hanigsen (Alemania). A partir de esto, el método de prospección con la balanza se desarrolló rápidamente y prueba de ello es que, sólo en la costa del Golfo de México en 1925 funcionaban unos 40 equipos de prospección gravimétrica con la balanza. [4]

En 1918 el investigador sueco Ising propuso utilizar el gravímetro, cuyo empleo empezó a generalizarse hacia 1930. Como el gravímetro hacia el trabajo de la balanza de torsión a menos costo y mucho mas rápidamente, esta fue desplazada. Desde entonces el gravímetro ha ido mejorando. [5]

2.1. Ley de Gavitación Universal

El principio del método gravimétrico se basa en la ley de la gravitación universal de Isaac Newton, esta establece que la fuerza de atracción de dos cuerpos es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. Por lo tanto, si M es la masa de la Tierra y R su radio, la magnitud de la fuerza F existente sobre una masa m situada sobre la superficie de la Tierra es [1]

$$F_g = G \frac{mM}{R^2}, \quad (2.1)$$

donde G es la constante gravitacional universal, y su valor en unidades del SI es $G = 6,673 \times 10^{-11}$ N m²/kg² y R es la distancia entre los centros de las masas.

Considerando una masa en la superficie de la Tierra relativamente pequeña en comparación a la masa total del Geosistema, y dado que la fuerza es resultado del producto entre la masa y aceleración, a partir de la fórmula 2.1 se obtiene que la magnitud de la aceleración de la gravedad en cualquier punto en la superficie de la Tierra es

$$g = G \frac{M}{R^2}, \quad (2.2)$$

también se le conoce como atracción gravitacional. La aceleración de gravedad fue primero medida por Galileo en su famoso experimento en Pisa. El valor numérico de g sobre la super-

ficie de la Tierra es alrededor de 980 cm/s^2 . En honor a Galileo la unidad de aceleración de gravedad es llamada el Galileo ó $\text{Gal}=1 \text{ cm/s}^2$

El Geoide y elipsoide de referencia Internacional: El Geoide es una superficie equipotencial que coincide con el nivel medio del mar, esta superficie rodea a la Tierra y su forma está determinada por las capas de roca que se encuentran por encima o por debajo de este nivel, ya sea en un exceso o en un déficit de masa, además, se le considera la forma de la Tierra. La fuerza de gravedad en cualquier punto de la superficie Geoidal debe ser perpendicular a la superficie. El elipsoide es descrito por un factor de achatamiento, donde a es el: radio ecuatorial, c es el: radio polar

$$f = \frac{a - c}{a}. \quad (2.3)$$

Esta fórmula indica que la Tierra se aproxima a una forma de elipsoide de revolución con un factor de achatamiento o aplanamiento de $(1/298.257)$. [1] El Geoide presenta una compleja

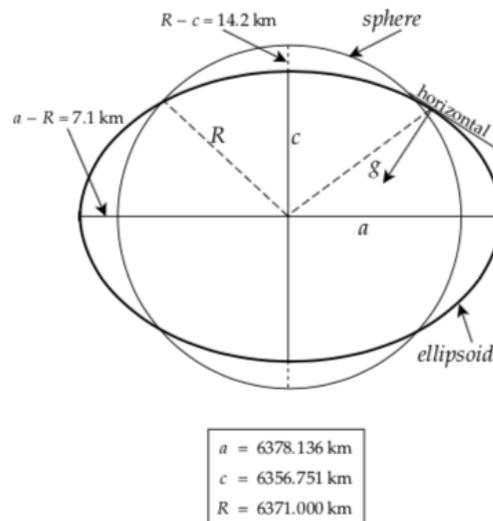


Figura 2.1: Comparación de las dimensiones del Elipsoide de referencia internacional con una esfera de igual volumen, figura tomada de [1].

variación interna de densidades, es por eso que el Geoide se lleva a una superficie lisa, la cual también es una superficie equipotencial que obedece a una rotación y que representa una densidad uniforme. Por la distribución de las fuerzas de gravedad, así como por la rotación, la forma de esta superficie se aproxima a un elipsoide de revolución, es por ello que se le llama elipsoide de referencia. A este elipsoide se le conoce como la forma geométrica de la Tierra, y sus principales aplicaciones son para referenciar valores de potencial gravitacional considerando una Tierra de densidad uniforme. [2]

La dirección de la gravedad en un punto se define perpendicular a la superficie equipotencial a través del un punto. Esto define la vertical en ese punto, mientras que el plano tangencial a la superficie equipotencial define la horizontal (ver Fig. 2.1). Una consecuencia de la forma esferoidal de la Tierra es que la dirección vertical generalmente no es radial, excepto en el ecuador y en los polos. [6]

El Elipsoide de Referencia Internacional es la figura de referencia estandarizada de la Tierra. La fórmula de gravedad normal para el elipsoide es

$$g_n = g_e(1 + \beta_1 \text{sen}^2 \lambda + \beta_2 \text{sen}^2 \lambda), \quad (2.4)$$

donde las constantes definidas en 1980 para el Sistema de Referencia Geodésico (GRS80) que aún se usan con frecuencia, son: $g_e = 9,780 \pm 327 \text{ m s}^2$ es la gravedad en el Ecuador, $\beta_1 = 5,30244 \times 10^{-3}$, $\beta_2 = -5,8 \times 10^{-6}$ y λ está relacionada con la latitud geográfica aunque difiere ligeramente de la misma (ver Fig. 2.2). Esta fórmula permite el cálculo de la gravedad normal en cualquier latitud con una precisión de 0.1 mgal. Los instrumentos modernos pueden medir las diferencias de gravedad con una precisión aún mayor, en cuyo caso se puede usar una fórmula más exacta, con una precisión de 0.0001 mgal. La fórmula de gravedad normal es muy importante en el análisis de las mediciones de la gravedad en la Tierra, ya que da la variación teórica de la gravedad normal g_n con la latitud en la superficie del elipsoide de referencia.

En una Tierra esférica no hay ambigüedad en cómo se define la latitud. Es el ángulo en el centro de la Tierra entre el radio y el ecuador, el complemento al ángulo polar θ . Esto define la latitud geocéntrica λ' . Sin embargo, la latitud geográfica en uso común no está definida de esta manera. Se encuentra por medición geodésica del ángulo de elevación de una estrella fija sobre el horizonte. Pero el plano horizontal es tangente al elipsoide, no a una esfera (ver Fig. 2.2), y la dirección vertical (es decir, la dirección de gravedad local) corta el ecuador en un ángulo λ que es ligeramente mayor que la latitud geocéntrica λ' . La diferencia $\lambda - \lambda'$ es cero en el Ecuador y en los polos, y alcanza un máximo a una latitud de 45° , donde solo asciende a 0.19° (aproximadamente $12'$). [7]

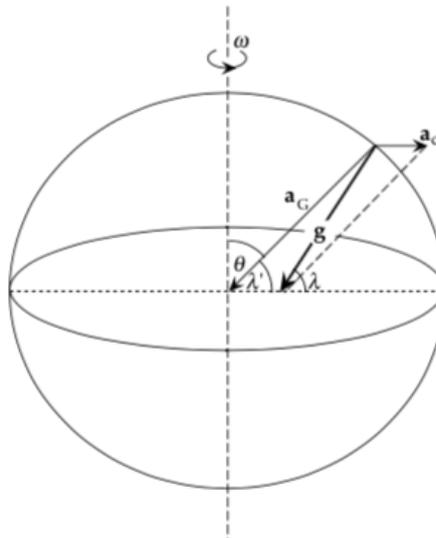


Figura 2.2: La gravedad en la Tierra elipsoidal es la suma del vector de las aceleraciones gravitacionales y centrífugas; $\vec{g} = \vec{a}_G + \vec{a}_c$ en consecuencia, la latitud geográfica (λ) es ligeramente mayor que la latitud geocéntrica (λ'). [1]

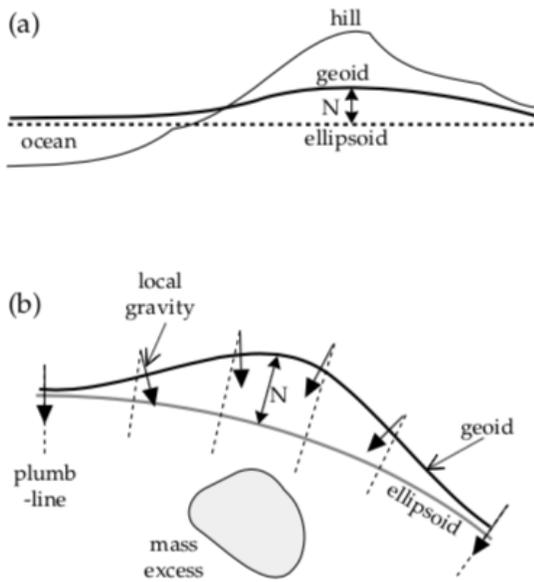


Figura 2.3: Masa fuera del elipsoide (a), exceso de masa debajo del elipsoide eleva el geoid por encima del elipsoide (b). N es la ondulación del geoid.). [1]

Geoide: El elipsoide de referencia internacional es una aproximación a la superficie equipotencial de la gravedad, pero es realmente una convención matemática. La superficie física de la gravedad se llama geoid. Refleja la verdadera distribución de la masa dentro de la Tierra y difiere del elipsoide teórico en pequeñas cantidades. El geoid está de acuerdo con la superficie libre del océano, excluyendo los efectos perturbadores temporales de las mareas y los vientos. Sobre los continentes, el geoid se ve afectado por la masa de tierra sobre el nivel medio del mar (ver Fig. 2.3a). La masa dentro del elipsoide causa una atracción gravitacional hacia abajo hacia el centro de la Tierra, pero una colina o montaña cuyo centro de gravedad está fuera del elipsoide provoca una atracción hacia arriba. Esto provoca una elevación local del geoid por encima del elipsoide. El desplazamiento entre el geoid y el elipsoide se llama ondulación geoidal; la elevación causada por la masa sobre el elipsoide es una ondulación positiva.

Al calcular la forma teórica de la Tierra, se supone que la distribución de la masa debajo del elipsoide es homogénea. Un exceso local de masa debajo del elipsoide desviará y aumentará la gravedad localmente. Esto da una ondulación geoidal positiva sobre un exceso de masa debajo del elipsoide (ver Fig. 2.3b). Por el contrario, un déficit de masa debajo del elipsoide desviará el geoid debajo de él, causando una ondulación negativa del geoid. Como resultado de la topografía desigual y la distribución de masa interna heterogénea de la Tierra, el geoid es una superficie equipotencial con desviaciones de la forma de un elipsoide [8]

Reducciones de Gravedad: Sobre la superficie de la Tierra se tienen diferentes factores que afectan los valores de gravedad medidos en el gravímetro, vinculadas con la fuerza de mareas, la rotación de la Tierra, la superficie topográfica irregular, la altura de la estación que tiene que ver con la influencia de la masa bajo el punto de medición, etc; por lo tanto estos valores deben ser corregidos para obtener el resultado real causado por el contraste de densidad existente en el subsuelo. Pedraza & Tocho (2011) describen que tradicionalmente se pensó en trasladar los valores observados mediante adecuadas reducciones a una misma superficie de referencia para hacerlos comparables, donde la superficie de referencia que se utilizaba es el geoide [9]. Las reducciones al geoide requieren el conocimiento del gradiente del campo de gravedad real, difícil de determinar en la práctica, por lo que se reemplaza por el del gradiente del campo de gravedad normal; el mismo se calcula a través de los nuevos estándares para reducir datos de gravedad. En los nuevos estándares se recomienda utilizar un único elipsoide, el del Sistema de Referencia Geodésico de 1980 (GRS80), recomendado por la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica (IUGG). Para fines prácticos GRS80, WGS84 e International Terrestrial Reference Frame 21 (ITRF), no producen diferencias significativas en los cálculos de la anomalía de gravedad [8].

A continuación las correcciones que se realizan a los datos de gravedad medidos con el gravímetro.

Corrección por deriva Instrumental: La deriva instrumental corresponde a las variaciones de gravedad en función del tiempo que hay entre las lecturas repetidas en un mismo lugar, causadas por la fatiga del sistema de muelles del instrumento de medición [1]. Para compensar esta variación la adquisición de datos gravimétricos se realiza a través de la apertura y cierre de circuitos, para así poder calcular el valor de la deriva instrumental del equipo en cada estación a través de la siguiente fórmula:

$$Deriva_{ins} = \frac{tiempo_{est}(lectura_{fin} - lectura_{inic})}{tiempo_{Total}}, \quad (2.5)$$

donde $Deriva_{ins}$ es la deriva instrumental del gravímetro, $tiempo_{est}$ es el tiempo en minutos de la medición en la estación con respecto al circuito, $lectura_{fin}$ es la lectura del gravímetro al cierre del circuito, $lectura_{inic}$ es la lectura del gravímetro en la apertura del circuito y $tiempo_{tot}$ es el tiempo total en minutos del circuito.

Corrección por Mareas: Las atracciones gravitatorias del Sol y de la Luna causan el efecto de las mareas en los océanos, la atmósfera y el cuerpo sólido de la Tierra, donde se produce una pequeña deformación de la superficie. Esta variación influye sobre los gravímetros, sin embargo los de última generación son capaces de registrar los efectos y corregirlo con un rango de hasta 0,3 mGal, así mismo, también existen distintos algoritmos computacionales que calculan la corrección por mareas tomando en cuenta la latitud, fecha y hora de adquisición [4].

Corrección por Temperatura: Las propiedades mecánicas del sistema elástico que forma parte del sensor interno del gravímetro, son afectadas por la temperatura. Las propiedades elásticas debieran ser invariables con la temperatura, el gravímetro Scintrex CG-6 posee protecciones a los cambios de temperatura ambiente localizando el sistema elástico de cuarzo, el conversor analógico digital, los componentes electrónicos de sensibilidad y los sensores de inclinación en un ambiente controlado por un termostato de alta estabilidad que mantiene la

temperatura del resorte constante en un rango de $0,5^{\circ}$ mK. En estos gravímetros el rango estándar de termostatación es de -40° C y 45° C, y el coeficiente termal del resorte principal es de aproximadamente -130 mGal/ $^{\circ}$ K [10].

Capítulo 3

Métodos de medición de la gravedad

3.1. Medición absoluta de la gravedad

Los métodos modernos para determinar la aceleración de la gravedad se basan en observaciones de objetos que caen. [11] Para un objeto que cae desde una posición inicial z_0 con velocidad inicial v la ecuación de movimiento da la posición z en el tiempo t . Esta expresión se mide sobre el eje Y , tomando el sentido positivo vertical hacia abajo

$$z = z_0 + vt + \frac{1}{2}gt^2 \quad (3.1)$$

El valor absoluto de la gravedad se obtiene ajustando una clasificación al registro de posición frente al tiempo. Un elemento importante en los experimentos modernos es la medición precisa del cambio de posición con un interferómetro de Michelson. En este dispositivo, un haz de luz monocromática pasa a través de un divisor de haces, que consiste en un espejo, que refleja la mitad de la luz que incide sobre él y transmite la otra mitad. Esto divide el rayo incidente en dos sub-rayos, que posteriormente viajan por diferentes caminos y luego se recombinan para dar un patrón de interferencia. Si las longitudes de camino difieren en una longitud de onda completa (o un número de longitudes de onda completas) de la luz monocromática, la interferencia es constructiva. La luz recombinada tiene la intensidad máxima, dando una franja de interferencia brillante. Si las longitudes de camino difieren en la mitad de una longitud de onda (o en un número impar de medias longitudes de onda) los haces recombinados interfieren de forma destructiva, dando un margen oscuro. En experimentos modernos, la fuente de luz monocromática es un rayo láser de longitud de onda exactamente conocida. [1]

En una medición absoluta de la gravedad, un rayo láser se divide a lo largo de dos caminos que forman un interferómetro de Michelson (ver Fig. 3.1). La trayectoria horizontal es de longitud fija, mientras que la trayectoria vertical se refleja en un retroreflector de cubo de esquina que se libera en un instante conocido y cae libremente. El camino de caída libre es de aproximadamente 0.5 m de largo. El cubo cae en una cámara de vacío para minimizar la resistencia del aire. Un foto-multiplicador y un contador permiten que las franjas dentro de cualquier intervalo de tiempo sean registradas y contadas [12]. La intensidad de la luz recombinada fluctúa sinusoidalmente a medida que aumenta la frecuencia cuanto más lejos y

más rápido cae el cubo. La distancia entre cada cruce por cero corresponde a la mitad de la longitud de onda de la luz láser, por lo que puede obtenerse la distancia recorrida por el cubo que cae en cualquier intervalo de tiempo. Los tiempos de los cruces por cero se deben medir con una precisión de 0.1 ns (10^{-10} s) para obtener una precisión de 1 μ gal en la medición de la gravedad. [2]

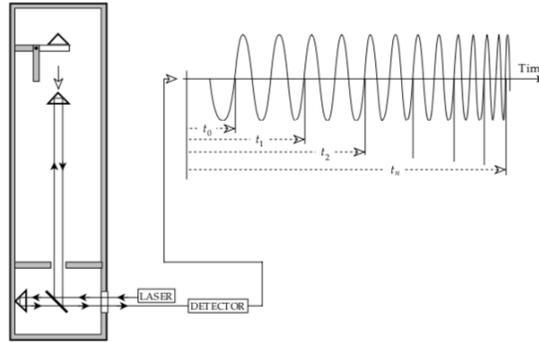


Figura 3.1: Método de caída libre para medir la gravedad absoluta.

3.2. Medida relativa de la gravedad: El Gravímetro

En principio, un medidor de gravedad, o gravímetro, es un instrumento muy sensible. Los primeros gravímetros se basaron en la aplicación directa de la ley de Hooke. Una masa m suspendida de un resorte de longitud s_0 hace que se estire a una nueva longitud s . La extensión o cambio de longitud del resorte es proporcional a la fuerza de recuperación del resorte y, por lo tanto, al valor de la gravedad, de acuerdo con

$$F = mg = -k(s - s_0), \quad (3.2)$$

donde k es la constante elástica del resorte. El gravímetro está calibrado en una ubicación conocida. Si la gravedad es diferente en otra ubicación, la extensión del resorte cambia, y a partir de esto se puede calcular el cambio en la gravedad. Este tipo de gravímetro, basado directamente en la ley de Hooke, se llama tipo estable. Ha sido reemplazado por equipos más sensibles, inestables o astatizados, que están contruidos de modo que una fuerza adicional actúa en la misma dirección que la gravedad y se opone a la fuerza de restauración del resorte. El instrumento está entonces en un estado de equilibrio inestable. [1]

Si la longitud natural s_0 se hace pequeña, idealmente cero, 3.2 muestra que la fuerza de restauración es entonces proporcional a la longitud física del resorte. El resorte de longitud cero, introducido por primera vez en el gravímetro LaCoste-Romberg, es ahora un elemento común en los gravímetros modernos. El muelle es generalmente del tipo helicoidal. Cuando se estira un resorte helicoidal, la fibra del resorte se retuerce; el giro total a lo largo de la fibra es igual a la extensión del resorte como un todo. Durante la fabricación de un resorte de longitud cero, al muelle helicoidal se le da un giro adicional, por lo que su tendencia es a desenrollarse. Un aumento en la gravedad estira el resorte contra su fuerza de restauración, aumentando

su extensión [13]. El funcionamiento de un gravímetro se ilustra (ver Fig. 3.2). Una masa es sostenida por una varilla horizontal a la que se une un espejo. La posición de la varilla se observa con un haz de luz reflejado en un microscopio. Si la gravedad cambia, el resorte de longitud cero se extiende o acorta y la posición de la varilla se altera, lo que desvía el rayo de luz. Se utiliza el principio de deflexión nula. Un tornillo de ajuste cambia la posición de la conexión superior del resorte, lo que altera su tensión y restaura la barra a su posición horizontal original detectada por el haz de luz y el microscopio. Las vueltas del tornillo de ajuste están calibradas en unidades del cambio en la gravedad, generalmente en mgal. El gravímetro es ligero, robusto y portátil. Después de nivelar inicialmente el instrumento, se puede realizar una medición precisa de la diferencia de gravedad en pocos minutos. El gravímetro tiene una sensibilidad de aproximadamente 0.01 mgal (10 gal). Esta alta sensibilidad lo hace susceptible a pequeños cambios en sus propiedades [2].

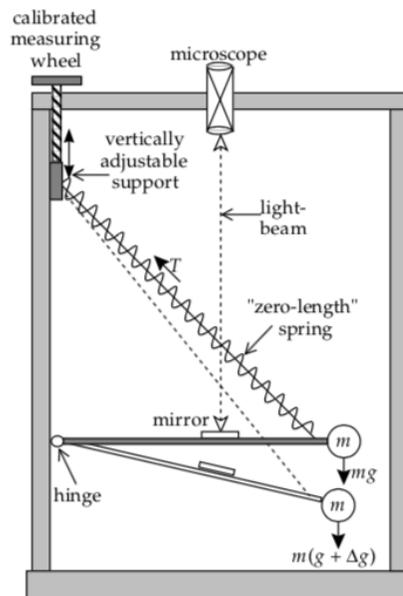


Figura 3.2: Principio del funcionamiento de un tipo de gravímetro inestable (estático).

3.3. Sistemas de referencia Gravimétricos

Un sistema de referencia gravimétrico se establece a partir de un conjunto de definiciones estándares y recomendaciones para realizar mediciones de Gravedad. La materialización de dicho sistema da origen al marco de referencia gravimétrico. Consiste en puntos con coordenadas y gravedades conocidas, medidas sobre la superficie terrestre. Las redes gravimétricas globales, continentales y/o nacionales forman parte de las densificaciones del marco de referencia gravimétrico. En la República de Colombia existen diversas redes gravimétricas que cubren gran parte del territorio nacional [14].

Antecedentes de Redes Gravimétricas en Colombia: En Colombia desde el año 1951 hasta el año 1997 se realizó el levantamiento de información geodésica respecto al datum

vertical en todo el territorio nacional a través de las líneas de nivelación que hacen parte de la Red Geodésica Nacional (RGN), la cuál está conformada por 20.087 puntos y tiene una distancia total de 25.778 kilómetros distribuidos por todo el país [15]. El Sistema Gravimétrico Nacional de Referencia inició en el año 1942, para establecer un sistema de referencia de gravedad, en 1970 y 1971 se estableció una estación de gravedad con valor absoluto en Bogotá y 70 estaciones relativas [6].

A través del tiempo se determinó como punto de partida para la nivelación geodésica en Colombia el mareógrafo de Buenaventura ampliando el control vertical en el país mediante líneas de nivelación a lo largo de las carreteras nacionales, adicionalmente se generó la red de primer orden gravimétrico, dónde se incluyeron tres estaciones con valor absoluto de gravedad (Bogotá-Honda-Cartagena), con dos estaciones intermedias (Albán-Villeta). Se observa el mapa de Colombia (ver Fig. 3.3) con las estaciones absolutas e intermedias de gravedad. Los triángulos de color rojo, representan las estaciones intermedias de gravedad, ubicadas en Albán-Villeta. Los de color verde representan las tres estaciones de gravedad absolutas: Bogota-honda-Cartagena-, que se encuentran ubicadas en el país [16].

Las mediciones se realizaron en el lapso de una semana por cada estación, en las ciudades de Bogota, Honda y Cartagena. De esta forma, se estableció un circuito de calibración instrumental (Bogota-Honda) y se definió una estación para cubrimiento de la zona norte de Colombia (Cartagena). En la tabla 4.1 se especifican los valores de gravedad, latitud, longitud, altura y posición, asignados a cada estación absoluta de gravedad. [17]

Estación	Latitud	Longitud	Altura	Gravedad	Presición
Bogota 9801-95	4.620112	285.936949	2612.48	977,373.487	$\pm 2.031 \mu\text{Gal}$
Honda 9802-95	5.202412	285.265443	293.85	977,928.090	$\pm 14.900 \mu\text{Gal}$
Cartagena 9803-95	10.41970	284.474323	160.00	978,142.215	$\pm 33.110 \mu\text{Gal}$

Tabla 3.1: Valores de Gravedad y posición (WGS-84) de las estaciones absolutas

Clasificación de Redes Gravimétricas en Colombia: El territorio colombiano cuenta con la Red Gravimétrica Nacional, denominada SIGNAR (Sistema Gravimétrico Nacional de Referencia) administrada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Dicha red está clasificada en cuatro órdenes: red de orden 0; constituida por 3 estaciones absolutas de gravedad, red de primer y segundo orden: cuentan con estaciones con mediciones relativas, en total 60 estaciones, y por último la red de tercer orden: también estaciones con mediciones relativas. La red de tercer orden toma una importancia relevante, puesto que mediante esta, se densifican los valores de gravedad sobre el territorio, que corresponden a las estaciones de la red de nivelación, lo que permite procesar las mediciones, para la determinación de los valores de gravedad. Para llevar a cabo lo anterior se cuenta con información del Instituto Geográfico Agustín Codazzi. [16]

Se muestran las líneas de calibración (ver Fig. 3.3), para la red de orden cero, siendo esta las estaciones de gravedad absoluta y de primer orden, las que se desprenden de la red de orden cero.

Red de Orden Cero: Esta red muestra las estaciones Absolutas ubicadas en (Bogotá, Honda y Cartagena)

Red de Primer Orden: Estaciones de referencia establecidas a partir de las absolutas, con conexiones a los países vecinos entre 1995 y 1999. Estas conexiones se observan en (ver



Figura 3.3: Mapa de Colombia con las tres estaciones de gravedad absoluta.

Red Orden	Tipo de medida	Tipo de Gravímetro	Precisión de Gravedad	Precisión Altura	Precisión Coordenadas	Inter-Espaciado	Cantidades de Estaciones
0	Absoluta	JILA/AXIS	$\pm 0,010 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}$	$\pm 2,00 \text{ m}$	$\pm 20,00 \text{ m}$	500-1000 km	3 a 5 estaciones
1	Relativa	LaCoste&Romberg	$\pm 0,020 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}$	$\pm 2,00 \text{ m}$	$\pm 20,00 \text{ m}$	250 km	15 - 20
2	Relativa	LaCoste&Romberg Scintrex	$\pm 0,050 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}$	$\pm 2,00 \text{ m}$	$\pm 20,00 \text{ m}$	El necesario	El necesario
3	Relativa	LaCoste&Romberg Scintrex Worden	$\pm 0,100 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}$	$\pm 0,01 \text{ m}$	$\pm 20,00 \text{ m}$	10 km áreas planas	1000 - 12000

Tabla 3.2: Precisión de los valores de gravedad y coordenadas de las estaciones gravimétricas.IGAC

Fig. 3.4). La línea de color rojo muestra la calibración de las redes gravimétricas, a partir de las estaciones absolutas. Las demás líneas muestran, los enlaces de calibración que se hicieron en diferentes zonas del país.

Red de segundo orden: Contiene las estaciones determinadas con gravímetros LaCoste & Romberg en la red de 1958 y las estaciones RELANG e IGSN71 que no fueron materializadas, dado que la incertidumbre de su ubicación exacta desmejora la precisión de los valores de gravedad. Las estaciones de la red de 1958 determinadas con gravímetros Worden sólo se han utilizado para actualizar las líneas gravimétricas. En la actualidad esos valores no se utilizan dada su baja precisión. En (ver Fig. 3.5) se muestra la red de segundo orden representada por los círculos de color verde, los triángulos rojos representan las estaciones absolutas y los cuadros azules representan las estaciones de primer orden. Estas redes las trasladan a partir de las de primer orden, seguido de las redes absolutas. [18]



Figura 3.5: SIGNAR: Red gravimétrica de segundo orden

Red de tercer orden: Corresponde con las líneas gravimétricas, las cuales se han medido sobre los puntos de nivelación de primer orden, con el propósito de corregir la nivelación geométrica por efecto de la gravedad. Se muestra la ubicación las redes de tercer orden en Colombia (ver Fig. 3.6), denotadas por las cruces rojas, la red de segundo orden está representada por los círculos de color verde, los triángulos rojos representan las estaciones absolutas y los cuadros azules representan las estaciones de primer orden. [6]

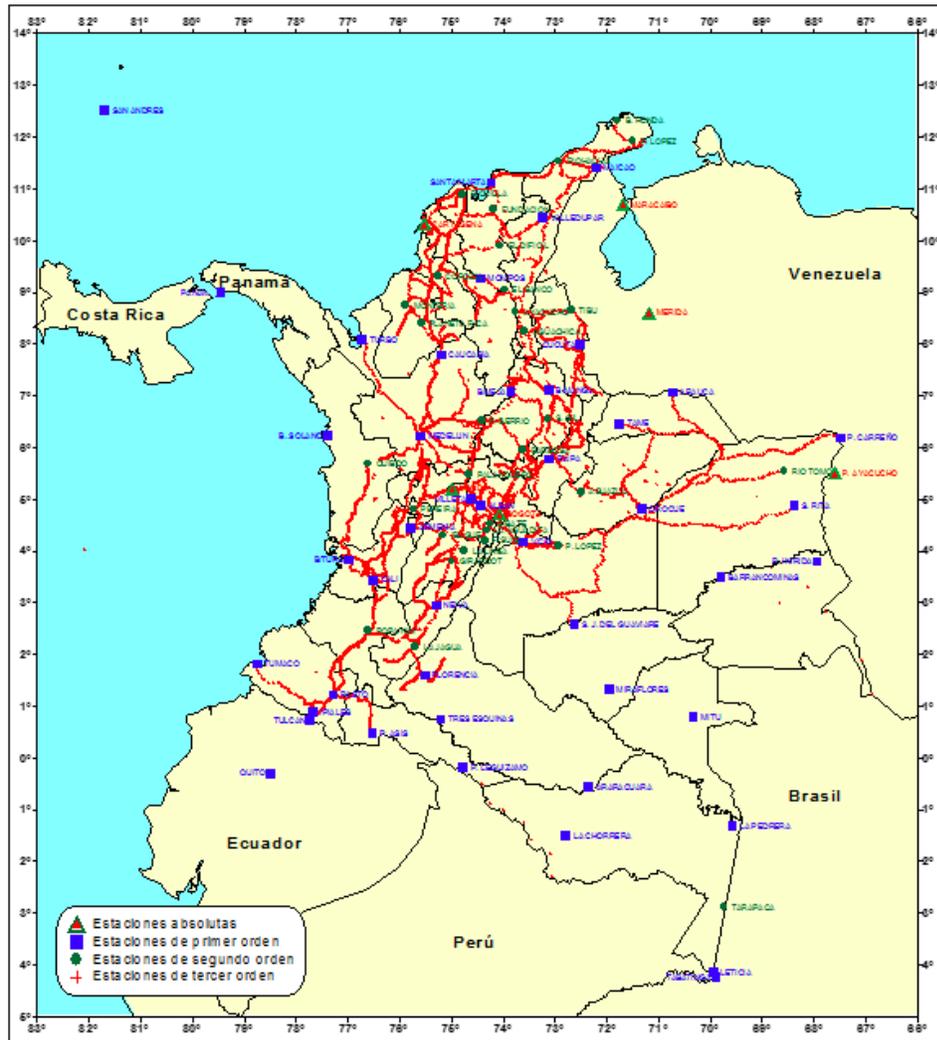


Figura 3.6: SIGNAR: Red gravimétrica de tercer orden

Capítulo 4

Marco metodológico

La metodología empleada para llevar a cabo la investigación consiste principalmente de cuatro fases:

Busqueda de puntos geodésicos (gravimetría) en Bucaramanga: Se inicia la búsqueda de las estaciones, según el registro del IGAC, escogiendo la más adecuada para el desarrollo del proyecto.

Adquisición: Consiste en llevar a cabo la toma de datos gravimétricos haciendo un circuito ABA, el cuál consta de un punto de gravedad conocido, y un punto donde se trasladará el dato adquirido de gravedad para la ejecución de la estación base de gravedad relativa dentro del campus principal de la Universidad Industrial de Santander.

Interpretación: Se realiza el análisis de los datos adquiridos, verificando que el dato de gravedad corregido, tenga las tres correcciones (marea, temperatura y deriva) y que la desviación y el error estándar de los datos, sea el adecuado para una buena interpretación.

Ejecución: Se deja ubicado el punto gravimétrico en la Universidad Industrial de Santander, al lado del Auditorio Luis A. Calvo.

El interés de establecer una base de gravimetría en el interior de la Universidad Industrial de Santander, surgió a raíz de los inconvenientes presentados al momento de hacer adquisiciones de datos gravimétricos, debido a que toda adquisición debe iniciar en un punto de gravedad conocido, registrado por el IGAC y debe estar a menos de 2 horas su ubicación para que el equipo no se descalibre al transcurrir el tiempo. Es por esto que se quiere dejar un punto en el interior de la Universidad para facilitar el desarrollo de futuros proyectos e investigaciones afines con el área de la Gravimetría. Para el desarrollo de esta metodología Se buscaron en Bucaramanga y sus alrededores las estaciones gravimétricas que aparecen registradas en la página del IGAC, la mayoría han sido removidas de su ubicación debido a que su implementación fue hace mas de 80 años. En Bucaramanga- Santander, hay registrados tres puntos gravimétricos, de los cuales solo uno se logró encontrar e identificar de acuerdo a las coordenadas que aparecen en el mapa de cada estación, encontrados en la base de datos del IGAC. A partir de este punto gravimétrico se inició la adquisición para ejecutar la estación de gravedad relativa en la Universidad [19].

4.1. Búsqueda de puntos Geodésicos (Gravimetría) Bucaramanga

Según la base de datos del IGAC, en Bucaramanga hay tres puntos gravimétricos (ver Fig. 4.1), se observa la nomenclatura asignada para cada estación, su valor de gravedad, desviación estándar y el archivo PDF que contiene el mapa de ubicación del punto.

The screenshot shows a web application titled "Puntos geodésicos" with a search interface for geodetic points in Bucaramanga. The "Municipio" dropdown is set to "BUCARAMANGA". There are three tabs: "Planimetría", "Altimetría", and "Gravimetría", with "Gravimetría" selected. Below the tabs are two search sections: "Búsqueda por localización" and "Búsqueda por Nomenclatura Estandarizada". The "Búsqueda por localización" section has "Consultar" and "Limpiar consulta" buttons. Below the search sections is a red PDF icon and the text "Resultados de la consulta: Número de Puntos:3". A table displays the search results:

Nomenclatura ▲	Gravedad	Desviación	pdf
1-TE-7	977819.39	0.026	
151-CE-2	977828.1	0.045	
A3-CE-3	977846.35	0.027	

Figura 4.1: Puntos Geodésicos (Gravimetría) Bucaramanga

1-TE-7 es el punto gravimétrico (ver Fig. 4.2) escogido para iniciar el desarrollo del circuito ABA, este se encuentra ubicado en el Parque Turbay, detrás del monumento principal. El punto no cuenta con la placa en bronce certificada por el IGAC. Su ubicación se dio gracias a las indicaciones que registra el mapa de acuerdo con su elaboración en el año 1953. Este mojón es uno de los pocos que no han sido removidos desde la fecha de elaboración.

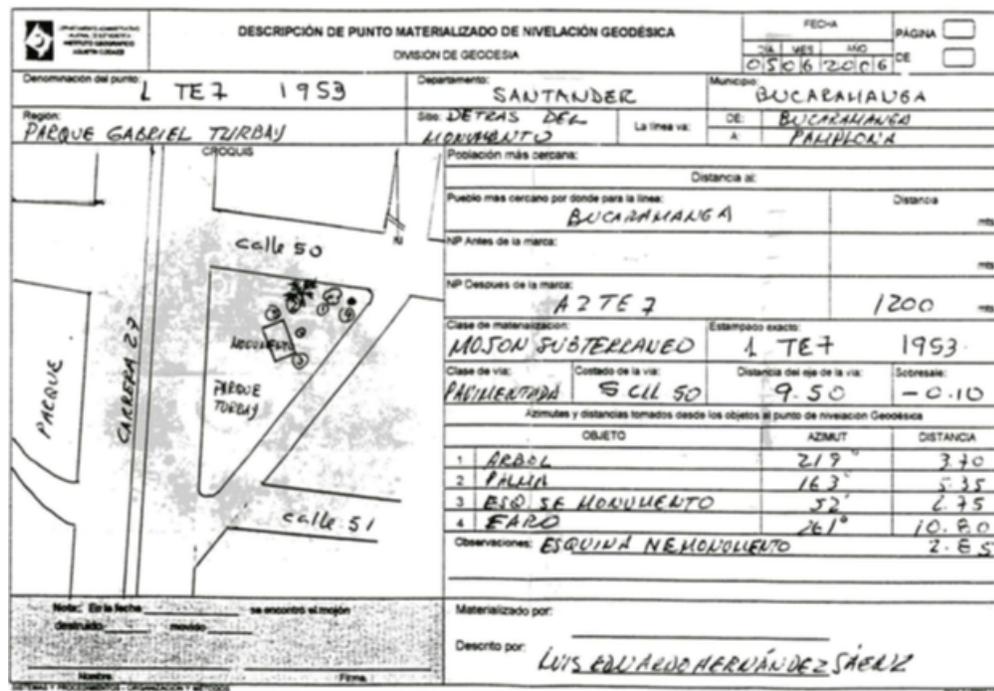


Figura 4.2: Punto gravimétrico Parque Turbay 1-TE-7

Se observa el mapa del segundo punto gravimétrico (ver Fig. 4.3) ubicado en el barrio la Pedregosa Bucaramanga.

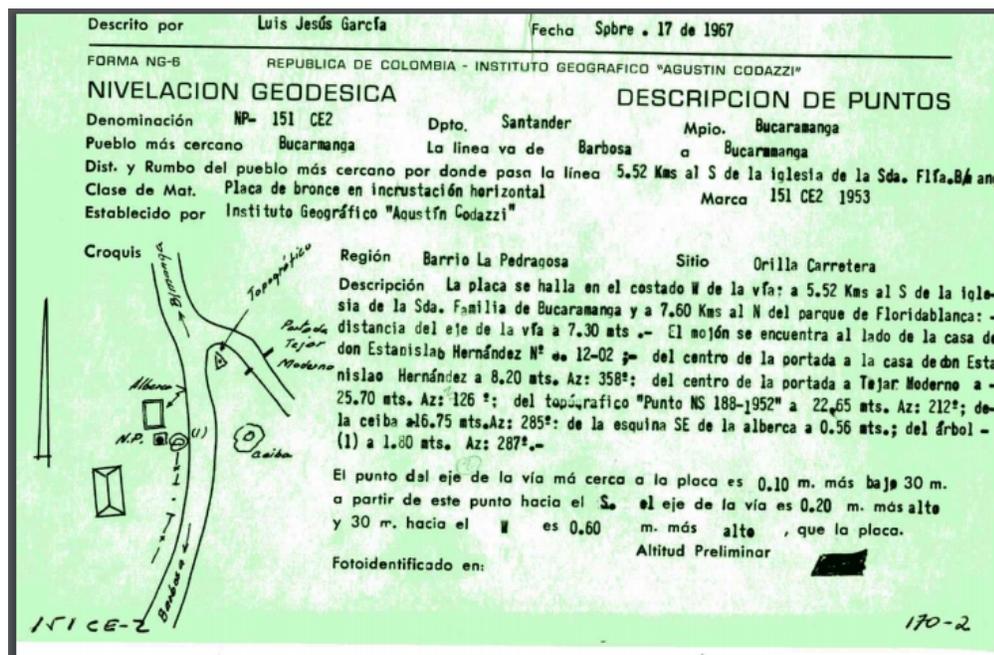


Figura 4.3: Punto gravimétrico Barrio la Pedregosa 151 CE-2

Este punto gravimétrico no fue encontrado, su ubicación y descripción no coincide con lo que ahora es este sector, debido a esto se cuenta con muy poca información de puntos gravimétricos relativos en Bucaramanga.

Se observa el último punto gravimétrico en Bucaramanga asignado por el IGAC (ver Fig. 4.4).

MINISTERIO DE HACIENDA Y CREDITO PUBLICO INSTITUTO GEOGRAFICO "AGUSTIN CODAZZI"		NIVELACION GEODESICA		FECHA	
		(DESCRIPCION DEL PUNTO)		DIA	MES
DENOMINACION DEL PUNTO: A 3 CE 3 1.991		DEPARTAMENTO: SANTANDER		MUNICIPIO: BUCARAMANGA	
REGION: MIRAMAR		SITIO: A pie de puerta entrada semillas Zulia Km2		LA LINEA VA DE: BUCARAMANGA A: LA MATA	
CROQUIS RIVERADO ASERREJON CARBOLLI CENTRO TANTI RIBA RICO SEMILLAS ZULIA B/BRICA		DISTANCIA Y RUMBO DEL PUEBLO			
		ANTES DE LA MARCA: 1.03K DEL NP A2 CE3		DESPUES DE LA MARCA: 065 millas del anterior	
		CLASE DE MATERIALIZACION: Incrustación horizontal		ESTAMPADO EXACTO: A3 CE3 1.991	
		CLASE DE VIA: Pavimentada		COSTADO DE LA VIA: NE	
		DISTANCIA DEL EJE DE LA VIA: 14.30 mts		SOBRESALE: Ras	
4		REFERENCIAS			
		OBJETO: Del centro puerta de hierro semillas Z.		DISTANCIA: 3.85 mts	
		AZIMUT: 155°			
		OBJETO: Del poste Km 2		DISTANCIA: 6.80 mts	
		AZIMUT: 140°			
		OBJETO: Del poste de concreto		DISTANCIA: 8.00 mts	
		AZIMUT: 320°			
		OBJETO: Del muro de la puerta		DISTANCIA: 0.35 mts	
		AZIMUT: 155°			
EL PUNTO DEL EJE DE LA VIA MAS CERCA DE LA PLACA ES 0.10 m MAS Bajo					
30m A PARTIR DEL PUNTO HACIA EL NW EL EJE DE LAS VIAS ES 1.70 m MAS Bajo					
Y 30m HACIA EL SE ES 1.90 MAS Alto QUE LA PLACA.					
MATERIALIZADO POR: JUAN ACERO		DESCRITO POR:			

Figura 4.4: Punto gravimétrico vía Bucaramanga - La Mata A3-CE -3

Las indicaciones y puntos de referencia en el mapa, no fueron suficientes para encontrar este punto. Los postes que mencionan como referencia no se encontraron, y no coincidían con las distancias que tomaron el día de su elaboración en 1.991 a fecha de hoy 2018.

4.2. Adquisición

Se diseñó el circuito ABA que consta de dos puntos y dos recorridos. Uno es el punto de gravedad conocido y el otro es el punto donde se trasladó el nuevo valor de gravedad en la Universidad Industrial de Santander. La importancia de este circuito cerrado ABA es que el gravímetro debe coincidir con las mediciones al inicio y al final de la adquisición en ese punto. Se realizaron 20 ciclos en cada estación, cada ciclo se le asignó una duración de 60 s. Para cada punto del circuito se usaron los mismo parámetros en el gravímetro.

Gravímetro: A partir del año de 1932, se empezaron a utilizar instrumentos que se basan en el principio de las balanzas de resorte para medir la gravedad y sus variaciones, estos se conocen actualmente como gravímetros [4]. El gravímetro consiste de una masa suspendida en un resorte, el cual se deforma proporcionalmente a la fuerza de la gravedad que actúa en la masa. En condiciones de equilibrio estático se tiene que:

$$kd = mg, \quad (4.1)$$

en donde k es la constante del resorte, d es la elongación del resorte para contrarrestar la fuerza mg , por lo tanto

$$g = \frac{k}{m}d, \quad (4.2)$$

esto es, la aceleración de la gravedad sólo depende de la deformación d considerando que k y d son fijos. En la práctica el equilibrio estático es difícil de conseguir, puesto que la gravedad cambia constantemente. Por esta razón, que es necesario analizar el comportamiento del gravímetro en condiciones de equilibrio dinámico. [10]

Por su diseño, existen dos tipos de gravímetros:

- Los estables, estos instrumentos sólo tienen un elemento para equilibrar la fuerza gravitacional, es decir, la variación de la gravedad implica un desplazamiento lineal. Son sistemas muy sensibles con respecto a los cambios de temperatura, presión y pequeñas variaciones sísmicas y magnéticas.
- Los inestables, la fuerza gravitacional en estos sistemas se encuentra en un equilibrio inestable que posee una fuerza restauradora. Su inestabilidad es debida a una tercera fuerza que amplifica el efecto de cualquier variación en la gravedad con respecto al valor correspondiente a su equilibrio. Estos instrumentos poseen una mayor sensibilidad y una mejor resolución. La diferencia entre ambos gravímetros consiste en que el segundo tipo (inestables) en lugar de medir la deformación del resorte, aplica fuerzas externas para equilibrar la fuerza de gravedad, obteniendo de esta manera una mayor aproximación en las lecturas.

Además, por su función y el tipo de medida que realizan, existen igualmente dos tipos de gravímetros: gravímetros absolutos y relativos. Esto se explicará mas adelante.

Gravímetro CG-C Autograv TM Scintrex: El CG-6 AutogravTM es el gravímetro adquirido por la Universidad Industrial de Santander, con este equipo se hicieron las adquisiciones gravimétricas para esta pasantía de investigación. El CG-6 es un medidor de gravedad automático que tiene un rango de medición mundial de más de 8,000 mGals y una resolución

de lectura de 0.0001 mGal. Esto permite al usuario operar tanto en estudios detallados de microgravedad como en estudios regionales o geodésicos a gran escala [20]. Las mediciones precisas se toman simplemente presionando una tecla, y en la mayoría de las condiciones de campo se tarda menos de un minuto en realizar la nivelación del mismo. Se pueden seleccionar mediciones de 15s, 30s, 60s y 120s, y tantos ciclos de medición como sea necesario. El CG-6 Autograv™ obtiene una lectura procesando una serie continua de muestras de 0.1 segundos. La lectura, con las correcciones seleccionadas aplicadas, se muestra en la pantalla LCD directamente en mGals. Los datos adquiridos se almacenan y pueden descargarse más adelante. El sensor de gravedad, los componentes electrónicos y las baterías están integrados en una única carcasa de instrumento autónoma.

La protección contra los cambios en la temperatura ambiente y la presión atmosférica se logra sellando el elemento de detección CG-6 Autograv™ en una cámara sellada de temperatura estabilizada. El amplio rango de temperatura de funcionamiento de -40°C a $+45^{\circ}\text{C}$ permite al operador utilizar el CG-6 Autograv™ en la mayoría de los entornos. También está disponible una versión de alta temperatura del medidor con un rango de temperatura de funcionamiento de -40°C a $+55^{\circ}\text{C}$. Los sensores de inclinación internos suministran constantemente al CG-6 Autograv™ información de inclinación para corregir en tiempo real las mediciones realizadas en terreno inestable [21]. La nivelación del CG-6 Autograv™ se simplifica mediante dos flechas iluminadas con LED en la consola que muestran la dirección en la que el operador necesita girar los tornillos del trípode [22]. Las dos baterías internas recargables de iones de litio proporcionan suficiente potencia para operar el CG-6 Autograv™ a lo largo de un día de inspección normal. Las flechas de nivelación indican la dirección para

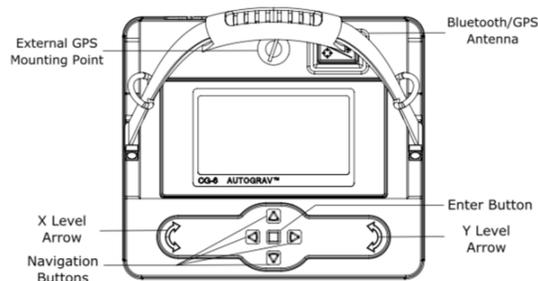


Figura 4.5: Panel frontal del gravímetro, tomada del manual de CG-6.

girar los tornillos de nivelación del trípode. La flecha del lado izquierdo se refiere al tornillo nivelador izquierdo y la flecha del lado derecho se refiere al tornillo nivelador derecho. El tornillo de la derecha ajusta los niveles de X e Y simultáneamente, mientras que el tornillo de la izquierda solo ajusta el nivel de X.

Abajo se muestran la línea horizontal, la estación actual y su secuencia en la lista de estaciones, el número de línea, y debajo están el valor de lectura en mGals, $SDev$ es la desviación estándar de las muestras utilizadas para calcular la lectura y $SErr$ es el error estándar que es igual a la desviación estándar dividida por la raíz cuadrada de la cantidad de muestras tomadas:

$$SErr = \frac{SDev}{\sqrt{N}} \quad (4.3)$$

Se muestra la información q al inicio de cada adquisición en el gravímetro,(ver Fig. 4.6) en la cuál se asigna, el nombre de la estación que se quiere adquirir, la secuencia de la misma, la desviación estandar y el error estandar, para el valor de gravedad en ese punto. El valor en X y Y, debe ser mínimo, para obtener una buena nivelación, antes de iniciar la adquisición.

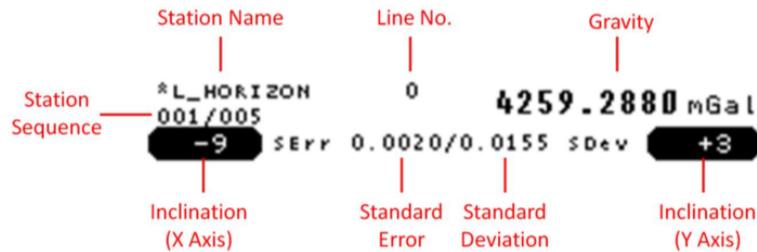


Figura 4.6: Lectura del gravímetro.

Para acceder a la configuración del sistema, y nombrar la estación y los ciclos que se desea adquirir, se hacen los siguientes pasos: Se elige primero la opción Survey, para asignar el

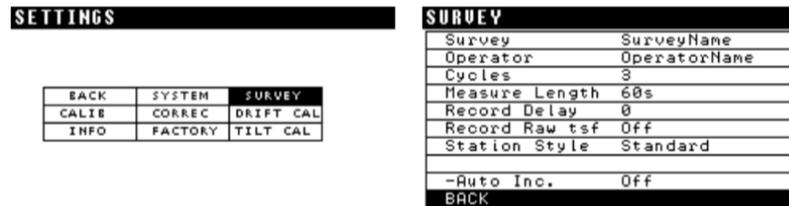


Figura 4.7: Configuración de adquisición.

nombre a la carpeta donde quedará guardada toda la información de la adquisición. Seguido a esto se asigna el nombre del operador (ver Fig. 4.7). Se asigna también el número de ciclos que desee adquirir, teniendo en cuenta que en la opción Measure length se escoge el intervalo de tiempo en segundos para cada ciclo. La opción Record Delay me muestra el tiempo en segundos que se requiere para dar el tiempo necesario al operador de alejarse del equipo una vez iniciada la toma de datos. Esta opción es importante, debido a que al inicar la adquisición, no debe haber personas ni ruido a mas o menos 20 m a la redonda del equipo. Otra opción que se modifica es Station Style, y se deja en modo numérico para la adquisición. Las otras opciones quedan sin modificar [21].

Se muestra las opciones necesarias para dar inicio a la adquisición.

Se oprime la opción GPS con el fin de posicionar el gravímetro en el punto exacto de medición. Seguido a esto se oprime la opción Record, y se inicia la adquisición. Al terminar se puede elegir la opción SLEEP, dejando en reposo el sistema operativo del gravímetro. Una vez terminada la adquisición se elige la opción USB y se extrae la información de cada estación adquirida. Las demas opciones no se modifican al momento de inicar la adquisición. (ver Fig. 4.8). El dato de gravedad relativo que arroja el gravímetro, al momento de terminar la adquisición, viene con las correcciones necesarias, como son: la corrección de deriva, corrección de marea y corrección de temperatura. En la opción configuración de correcciones se observa



Figura 4.8: Menú principal del gravímetro.

la opción de habilitar o deshabilitar estas correcciones, dependiendo de como se quiera obtener el dato de gravedad, (ver Fig. 4.9),. Este menú se encuentra en la opción Settings [23].

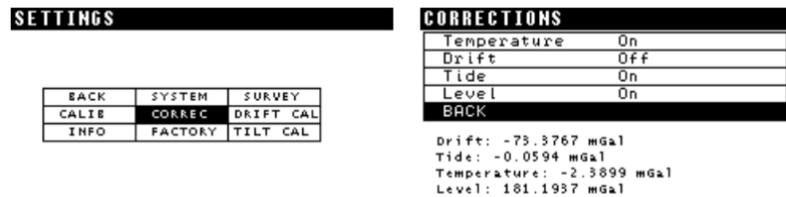


Figura 4.9: Configuración en las correcciones del equipo.

El equipo posee una precisión de 0.001 mGal, con un sistema automatizado mediante un sensor electrónico, en el cual el elemento de detección se basa en un sistema elástico donde la fuerza gravitacional sobre la masa de prueba es balanceada por un resorte y una fuerza de restauración electrostática relativamente pequeña [10]. Posee también un sistema de protección ante los cambios de temperatura ambiental y de la presión atmosférica, el cual consiste en una cámara que mantiene al sensor al vacío y a una temperatura estable. El sensor está hecho de cuarzo fundido no magnético que no se ve afectado por las variaciones del campo magnético terrestre.

El CG-6 AUTOGRAV TM SCINTREX se debe trasladar en la caja robusta con el fin de evitar una descalabración debido a fuertes movimientos (ver Fig. 4.10) [24].

Previamente a la adquisición, mediante el estudio de deriva diurna, se estableció el lapso de duración del circuito ABA en un rango aproximado de 4 horas para evitar que la deriva del instrumento afectara las mediciones. Se observa la gráfica de las deriva realizada en el banco óptico ubicado en el laboratorio de óptica (ver Fig. 4.11), en el Edificio de laboratorios livianos de la Universidad Industrial de Santander, permitiendo aplicar la corrección por deriva lineal en el rango de tiempo seleccionado.

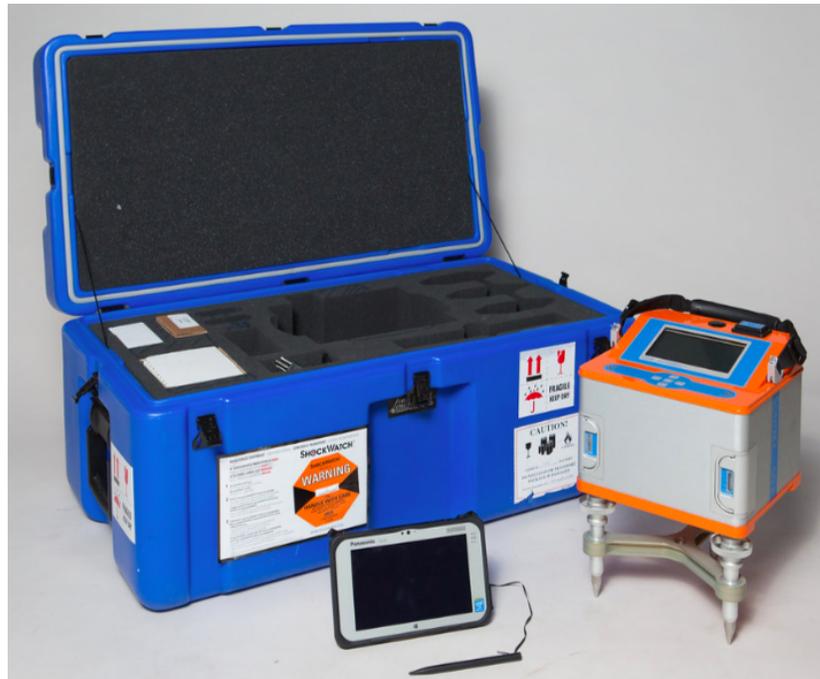


Figura 4.10: Gravímetro CG-6 AUTOGRAV TM SCINTREX

La deriva instrumental (drift) en estos equipos, debido al inevitable estiramiento del resorte bajo tensión y su imperfecta recuperación, alcanza algunas décimas de miligal por día. Esta deriva es en general lineal en el intervalo de unas pocas horas siempre y cuando el transporte donde se lleve el equipo sea cuidadoso, este valor puede ser removido de las lecturas realizando medidas frecuentes en las estaciones; esto es una característica propia de cada equipo, y en muchos casos su magnitud es variable en el tiempo.

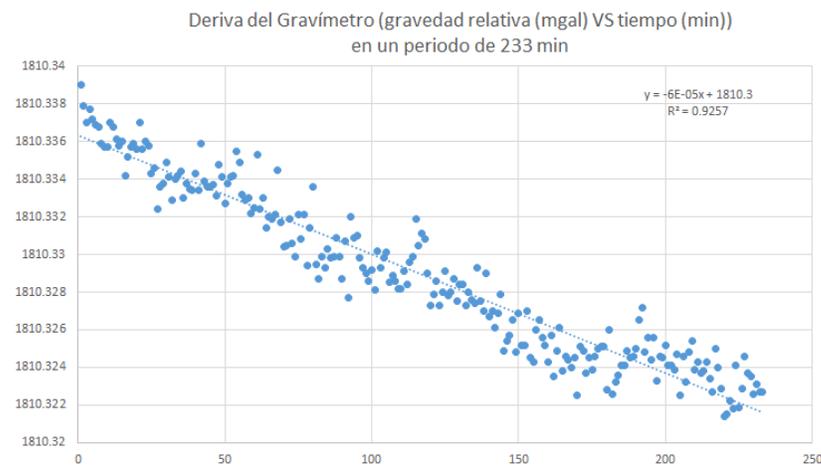


Figura 4.11: Deriva del gravímetro en la Universidad Industrial de Santander

Se muestra el resultado de calibración de deriva en la pantalla del Autograv TM, previo a la adquisición (ver Fig. 4.12).

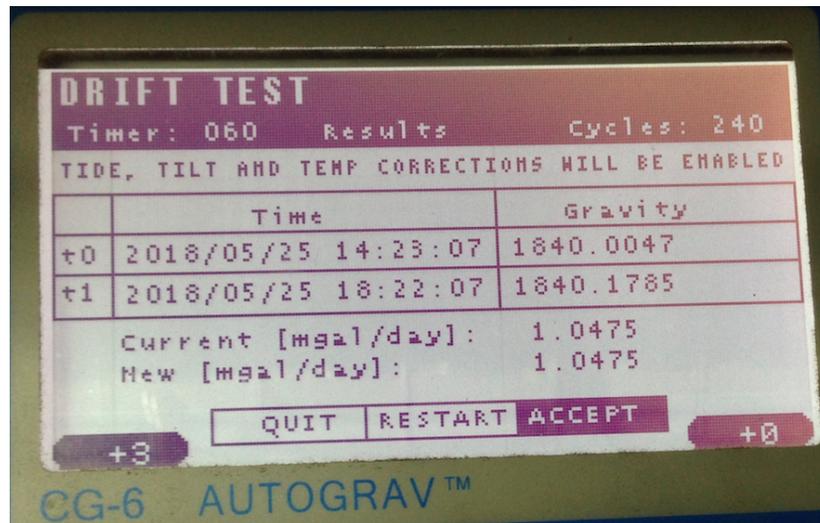


Figura 4.12: Test deriva Gravímetro AUTOGRAV TM SCINTREX. Se aprecia el tiempo en que se realizó la primera medición y el tiempo de la última medición, con sus respectivos valores de gravedad relativa. De las diferencias en los valores de la gravedad relativa y el tiempo de medición, se obtiene el valor de la deriva instrumental, que para este caso fue de 1.0475 mgal/día.

Los datos corresponden: t_0 el tiempo inicial de calibración con el valor de gravedad relativa en ese instante de tiempo, y t_1 el tiempo final con el valor de gravedad relativa después de 4 horas de calibración. t_0 y t_1 muestran como aumenta el valor de gravedad a medida que transcurre el tiempo. Los valores mostrados en la pantalla del equipo, arrojan la nueva actualización de deriva, la cuál fué aceptada como buen resultado de calibración.

Circuito ABA: Inició el circuito de adquisición de datos en el Parque Turbay en horas de la madrugada. Esta hora fue escogida teniendo en cuenta que el equipo es muy sensible. Se ajustaron los parámetros al Gravímetro CG-6, para que tomara 20 ciclos por estación, cada ciclo tiene una duración de 60 [s]. Cada dato obtenido por min, es un promedio de valores adquiridos por cada segundo de adquisición.

La adquisición inició en el punto A del circuito ABA, es decir Parque Turbay, inició en ese punto y finalizó ahí mismo.



Figura 4.13: Punto gravimétrico Parque Turbay

El valor de gravedad registrado por el IGAC para este punto en el Parque Turbay es el siguiente:

Gravedad	977819.39
Desviación	0.026

Tabla 4.1: Gravedad en el Parque Turbay

La figura 5.14 muestra el recorrido y la distancia aproximadamente de 2,76 km, entre el punto A y el punto B. Siendo el punto A el Parque Turbay y el punto B la Universidad Industrial de Santander.

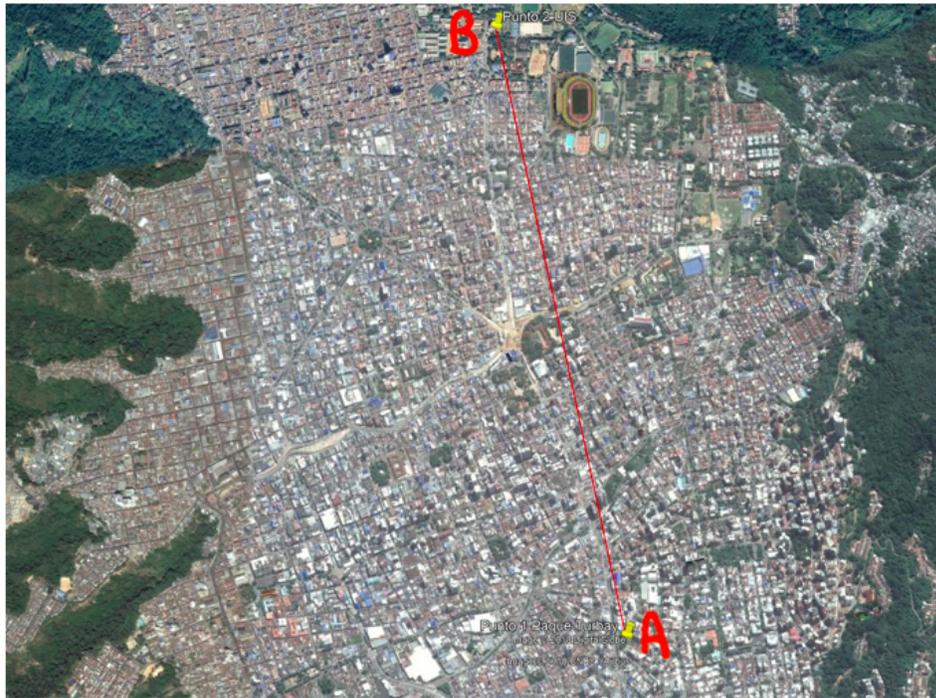


Figura 4.14: Circuito AB. Tomada de Google Earth

- Coordenadas Geográficas Parque Turbay Punto A: $7^{\circ} 6' 54''\text{N}$, $73^{\circ} 6' 53''\text{W}$.
- Coordenadas Geográficas Universidad Industrial de Santander, punto cercano al Auditorio Luis A Calvo, Punto B: $7^{\circ} 8' 22''\text{N}$, $73^{\circ} 7' 12''\text{W}$.

Estas coordenadas se midieron con un GPS, exportando los datos a Google Earth para obtener satelitalmente el recorrido del circuito.

4.3. Interpretación

Al iniciar la adquisición, se establecieron los parámetros en el gravímetro.

- Station: Nombre de la estación
- Date: Fecha de adquisición
- Time: Hora de la adquisición
- CorrGrav: Dato corregido de gravedad
- StdDev: Desviación estándar
- StdErr: Error estándar

En la Tabla 5.2 se muestran los datos obtenidos en el punto A donde inició el circuito, las unidades de gravedad son (mgal). El dato que muestra CorrGrav, es el valor de gravedad corregido por temperatura, marea y deriva. Todos los datos que se exportaron del equipo se pueden observar en el anexo final, aquí se muestra solo un resumen en general de la información principal obtenida. La desviación y el error estándar muestran que los datos de gravedad fueron aceptados.

Station	Date	Time	CorrGrav	StdDev	StdErr
PT-1	13/06/18	05:38:26	1849,5866	0.0094	0.0010
PT-1	13/06/18	05:39:48	1849,5868	0.0084	0.0011
PT-1	13/06/18	05:40:48	1849,5857	0.0084	0.0011
PT-1	13/06/18	05:41:48	1849,5830	0.0082	0.0011
PT-1	13/06/18	05:42:48	1849,5839	0.0084	0.0012
PT-1	13/06/18	05:43:48	1849,5825	0.0090	0.0011
PT-1	13/06/18	05:44:48	1849,5818	0.0092	0.0011
PT-1	13/06/18	05:45:48	1849,5812	0.0082	0.0011
PT-1	13/06/18	05:46:48	1849,5822	0.0085	0.0012
PT-1	13/06/18	05:47:48	1849,5797	0.0097	0.0013

Tabla 4.2: Estación 1 - punto A - Parque Turbay

El promedio de los datos de gravedad corregida para la estación 1 es de: $g = 1488,8456$ mgal. La desviación estándar es: $\sigma = 0,002060169$

La Tabla 5.3 se muestran los datos de gravedad crudos (RawGrav) para la estación 1 en el Parque Turbay, es decir sin hacerles las correcciones de marea, temperatura y deriva. Siendo: TideCorr: Corrección de marea, TempCorr: Corrección de temperatura y DriftCorr: Corrección de deriva.

RawGrav	TideCorr	TempCorr	DriftCorr
1817,92480	0.1254	22.4696	-351.6947
1817,92010	0.1253	22.4693	-351.6954
1817,92170	0.1252	22.4700	-351.6961
1817,92410	0.1251	22.4696	-351.6968
1817,92210	0.1249	22.4699	-351.6976
1817,92000	0.1248	22.4695	-351.6983

Tabla 4.3: Datos crudos de gravedad y correcciones en el punto A

El promedio de los datos de gravedad corregida para la estación 2 es de: $g = 1483,459833$ mgal. La desviación estándar es: $\sigma = 0,001873677$ mgal

Station	Date	Time	CorrGrav	StdDev	StdErr
UIS	13/06/18	06:23:08	1849,5744	0.0094	0.0010
UIS	13/06/18	06:24:08	1849,5734	0.0084	0.0011
UIS	13/06/18	06:25:08	1849,5718	0.0084	0.0011
UIS	13/06/18	06:26:08	1849,5728	0.0082	0.0011
UIS	13/06/18	06:27:08	1849,5713	0.0084	0.0012
UIS	13/06/18	06:28:08	1849,5709	0.0090	0.0011
UIS	13/06/18	06:29:08	1849,5713	0.0092	0.0011
UIS	13/06/18	06:30:08	1849,5719	0.0082	0.0011
UIS	13/06/18	06:31:08	1849,5674	0.0085	0.0012
UIS	13/06/18	06:32:08	1849,5687	0.0097	0.0013

Tabla 4.4: Estación 2 - punto B - UIS

La Tabla 5.5 muestra el dato de gravedad crudo (RawGrav) y las tres correcciones, siendo: TideCorr: Corrección de marea, TempCorr: Corrección de temperatura y DriftCorr: Corrección de deriva.

RawGrav	TideCorr	TempCorr	DriftCorr
1812,57100	0.1222	22.4755	-351.7074
1812,57270	0.1220	22.4747	-351.7081
1812,57440	0.1217	22.4744	-351.7089
1812,57290	0.1214	22.4739	-351.7096
1812,57390	0.1212	22.4730	-351.7103
1812,57520	0.1209	22.4726	-351.7111

Tabla 4.5: Datos crudos de gravedad y correcciones en el punto B

El promedio de los datos de gravedad corregidos para la estación 1 finalizando el circuito ABA es de: $g=1488,879767$ mgal. La desviación estándar es: $\sigma= 0,003768927$ mgal

Station	Date	Time	CorrGrav	StdDev	StdErr
PT-1	13/06/18	06:58:59	1488,5744	0.0094	0.0010
PT-1	13/06/18	06:59:59	1488,5734	0.0084	0.0011
PT-1	13/06/18	07:00:46	1488,5718	0.0084	0.0011
PT-1	13/06/18	07:01:46	1488,5728	0.0082	0.0011
PT-1	13/06/18	07:02:46	1488,5713	0.0084	0.0012
PT-1	13/06/18	07:03:46	1488,5709	0.0090	0.0011
PT-1	13/06/18	07:04:46	1488,5713	0.0092	0.0011
PT-1	13/06/18	07:05:46	1488,5719	0.0082	0.0011
PT-1	13/06/18	07:06:46	1488,5674	0.0085	0.0012
PT-1	13/06/18	07:07:46	1488,5687	0.0097	0.0013

Tabla 4.6: Cierre del circuito punto A - Parque Turbay

La Tabla 5.7 muestra el dato de gravedad crudo (RawGrav) y las tres correcciones, siendo: TideCorr: Corrección de marea, TempCorr: Corrección de temperatura y DriftCorr: Corrección de deriva.

RawGrav	TideCorr	TempCorr	DriftCorr
1817,91740	0.1084	22.4729	-351.7336
1817,91160	0.1079	22.4731	-351.7343
1817,91280	0.1074	22.4732	-351.7351
1817,91000	0.1068	22.4726	-351.7358
1817,92250	0.1063	22.4721	-351.7365
1817,91300	0.1057	22.4716	-351.7372

Tabla 4.7: Datos crudos de gravedad y correcciones al cierre del circuito

Los valores de gravedad relativos para cada punto ABA en el circuito son:

Punto A Parque Turbay $g_A= 1849,5833$ mGal con una desviación estándar de $\sigma =0,0024$ mgal, y un error de $\epsilon = 0,0008$ mGal.

Punto A Parque Turbay cierre del circuito $g_A= 1849,5713$ mGal con una desviación estándar de $\sigma =0,0021$ mgal, y un error de $\epsilon = 0,0007$ mGal.

La diferencia entre estos dos valores es: $\Delta g_2 = 0,0119$, es decir $11,9 \mu\text{gal}$, este dato es aceptable debido a que no está tan lejos del rango de $5 \mu\text{Gal}$, con un error de $\epsilon =0,0008 \mu\text{gal}$

Para el punto B en la UIS se obtuvo un valor de gravedad de $g= 1844,2690$ mGal con una desviación estándar de $\sigma =0,0013$ mgal, y un error de $\epsilon = 0,0004$ mGal.

El promedio de gravedad en el Parque Turbay es

$$ParqueTurbay = \frac{g_1 + g_2}{2} = 1849,5773 \pm 0,0008 \text{ mGal} \quad (4.4)$$

La diferencia de gravedad para el Parque Turbay y la UIS es $\Delta g_{T-UIS} = 5,3083 \pm 0,0008$ mGal, es decir $0,8 \mu\text{gal}$.

Teniendo en cuenta el valor de gravedad registrado por el IGAC en el Parque Turbay $g = 977819,390 \pm 0,026$ gal. A partir de este valor se obtiene, el dato de gravedad para el punto de gravimetría en la UIS, $g_{UIS} = 977814,082 \pm 0,026$ Gal.

La gráfica muestra los datos de gravedad en mGal, tomados en la adquisición del circuito ABA, contra el número total de datos adquiridos. Se observa que la deriva tiende a bajar a medida que avanza el tiempo, por esta razón fue necesario omitir los primeros 10 datos adquiridos, debido a que el equipo se estabilizó en el rango de los últimos 10 datos.

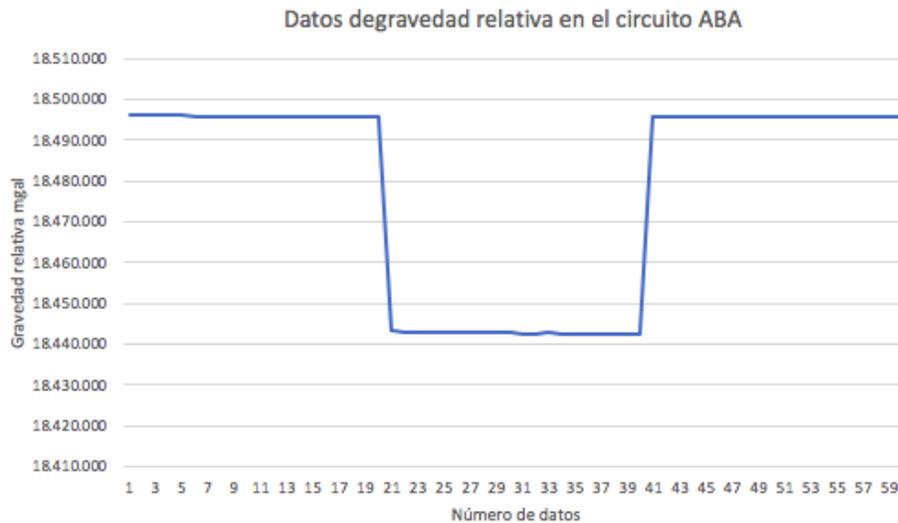


Figura 4.15: Gravedad relativa (mgal) vs Número de datos

4.4. Ejecución

El punto de gravimetría en la Universidad Industrial de Santander, quedó ubicado según las coordenadas geográficas $7^{\circ} 8' 22''\text{N}$, $73^{\circ} 7' 12''\text{W}$ al lado del Auditorio Luis A. Calvo. Punto gravimétrico UIS $g_{UIS} = 977814,082 \pm 0,026 \text{ gal}$



Figura 4.16: Punto gravimétrico UIS.

Capítulo 5

Conclusiones

Se ejecutó el traslado del valor de gravedad de un punto conocido, en este caso el Parque Turbay, al punto de la (Universidad Industrial de Santander). Con esta metodología se logró establecer el valor relativo de gravedad para la base de gravimetría en la UIS, ajustando los datos relativos de gravedad que proporcionó el equipo CG-6 AUTOGRAV SINTREX, junto con el dato de gravedad absoluta conocido y en este caso, dado por una base de la red de tercer nivel del IGAC.

Se recomienda el buen uso del gravímetro a la hora de adquirir datos, debido a que existen factores como el tránsito de autos, mal tiempo, personas caminando alrededor del equipo, que perjudican la medición y los resultados a la hora de procesarlos. En particular, el equipo es muy sensible a golpes, caídas y vibraciones y debe ser manejado con sumo cuidado. Igualmente, es necesario realizar cuidadosamente una calibración de la deriva instrumental del gravímetro antes de cada campaña de adquisición.

Bibliografía

- [1] W. Lowrie, *Fundamentals of geophysics*. Cambridge university press, 2007.
- [2] V. S. Mirónov, *Curso de prospección gravimétrica*. Reverte, 1977.
- [3] T. Schüler, “Conducting and processing relative gravity surveys,” *Institute of Geodesy and Navigation. University FAF Munich, Germany*, 2000.
- [4] H. Fabriol, M. Martínez, and R. Vázquez, “Mediciones gravimétricas y telúricas en el valle de manadero, ensenada, baja california,” *Geofísica Internacional*, vol. 21, no. 1, 1982.
- [5] S. Jaramillo and A. Galudht, “Integración de las redes verticales sudamericanas: inventario en vista de los términos de referencia de sirgas/ggos,” 2015.
- [6] L. Sanchez and W. Martinez, “Vinculación de alturas elipsoidales gps al datum vertical clásico de colombia,” *IGeS Bulletin*, no. 9, pp. 73–85, 1999.
- [7] F. V. de Investigaciones Sismológicas, “Adquisición y procesamiento de datos gravimétricos y magnéticos en el perfil calabozo–dabajuro,”
- [8] Á. E. M. Furones, *Análisis y ajuste de modelos de geoide. Observación y cálculo de la red gravimétrica de tercer orden en la Provincia de Valencia*. 2015.
- [9] U. P. HÖHEN and K. L. SÁNCHEZ, “Determinación de alturas físicas en colombia,”
- [10] S. Miranda, A. Herrada, and M. C. Pacino, “Respuesta instrumental del gravímetro scintrex autograv cg-5 (s/n 40484) en modos continuo y relevamiento,” *Geoacta*, vol. 38, no. 1, pp. 0–0, 2013.
- [11] L. F. Vitushkin, “Absolute gravity measurements,” *Encyclopedia of Geodesy*, pp. 1–8, 2014.
- [12] R. Forsberg, “Establishment of a lacoste & romberg gravity network in greenland,” *Bulletin de Bureau Gravimetrique International*, vol. 46, pp. 168–179, 1981.
- [13] M. Lederer, “Accuracy of the relative gravity measurement,” *Acta Geodyn. Geomater*, vol. 6, no. 3, p. 155, 2009.
- [14] W. A. M. Díaz, J. A. F. Muñoz, and L. M. S. Rodríguez, “Determinación de nuevas estaciones absolutas de gravedad en colombia,” *Earth Sciences Research Journal*, no. 3, pp. 81–87, 1995.

- [15] S. A. Márquez Gamarra *et al.*, “Creación de un aplicativo para la visualización y manipulación de los valores de gravedad específica del sistema gravimétrico nacional de referencia del instituto geográfico agustín codazzi (igac),” 2018.
- [16] G. Y. DE NIVELACIÓN and D. COLOMBIA, “Simposio,”
- [17] J. E. FALLER, “Bogota-colombia: Final report on absolute gravity determination,” *Interamerican Geodetic Survey*, 1971.
- [18] N. C. Sánchez Torres, L. M. Barrera Avellaneda, *et al.*, “Propuesta de una metodología de ajuste de redes gravimétricas. estudio de caso zona norte de colombia.,” 2017.
- [19] A. Udias, *Fundamentos de geofísica*. 1997.
- [20] S. Bonvalot, M. Diament, and G. Gabalda, “Continuous gravity recording with scintrex cg-3m meters: a promising tool for monitoring active zones,” *Geophysical Journal International*, vol. 135, no. 2, pp. 470–494, 1998.
- [21] B. Meurers, “Scintrex cg5 used for superconducting gravimeter calibration,” *Geodesy and Geodynamics*, 2017.
- [22] C. Rothleitner, T. Niebauer, and O. Francis, “Measurement of the speed-of-light perturbation of free-fall absolute gravimeters,” *Metrology*, vol. 51, no. 3.
- [23] A. Sultan, N. Abdel Rahman, T. M. Ramadan, and S. Salem, “The use of geophysical and remote sensing data analysis in the groundwater assessment of el qaa plain, south sinai, egypt,” *Aust J Basic Appl Sci*, vol. 7, no. 1, pp. 394–400, 2013.
- [24] L. Timmen and O. Gitlein, “The capacity of the scintrex autograv cg-3m no. 4492 gravimeter for “absolute-scale” surveys,” *Revista Brasileira de Cartografia*, vol. 2, no. 56, 2004.