



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Anomalías gravimétricas y magnéticas en  
el Pedregal San Ángel, C.U.**

**TESIS**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**Ingeniero Geofísico**

**P R E S E N T A**

Diego Cesar Valdez Casillas

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



“Tú estás vivo, Nad. Y eso significa que tienes infinitas posibilidades. Al morir desaparecen y no hay vuelta atrás.”

***"El libro del cementerio" (2008)***

#### Agradecimientos

El llegar a la culminación de esta etapa, ha sido posible por el apoyo brindado de diferentes formas por parte mi familia. Mis padres por tenerme paciencia en todo este tiempo, mis hermanos Juan y Oscar de los cuales siempre me he sentido apoyado, así también a la memoria de mamá Margarita.

Agradezco al Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi por la confianza para encomendarme la realización del presente proyecto, además de las sugerencias a lo largo del desarrollo del presente trabajo. Así como los sinodales Ing. Alejandro García Serrano, Dr. Osvaldo Sánchez Zamora, M.C. Isabel Domínguez Trejo, M.C. Mauricio Nava Flores por las correcciones y comentarios para la conclusión del presente trabajo de tesis.

En el transcurso de la estancia en la facultad, coincidí con diferentes compañeros los cuales me han brindado diferente experiencias gratificantes, con lo cual ha sido la estancia en la facultad ha sido ilustrativa en diferentes aspectos, a todos ellos muchas gracias.

A mis amigos con los cuales compartí diferentes vivencias más cercanas en la facultad, Rodrigo, Miguel, Ignacio, Niza, Jacobo, Alejandro, Mike, Solar, Jorge, Enrique, Carlos, Isabel, Yosh, Alex, Cinthya, Covarrubias, Berrocal, se les estima mucho, gracias.

Finalmente y no menos importante a la UNAM y la Facultad de Ingeniería por ser mi *alma máter*, gracias.

# ÍNDICE

RESUMEN .....	vi
ABSTRACT .....	vii
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	1
1.3 HIPÓTESIS.....	2
1.4 OBJETIVOS.....	2
1.4.1 Objetivo General .....	2
1.4.2 Objetivos Particulares .....	2
CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES .....	4
2.1 ÁREA DE ESTUDIO.....	4
2.2 MARCO GEOLÓGICO .....	9
2.2.1 Cinturón Volcánico Transmexicano.....	9
2.2.2 Campo Volcánico de Chichinautzin.....	10
2.2.3 Fisiografía.....	11
2.2.4 Estratigrafía.....	11
2.2.5 XITLÉ .....	12
2.2.5.1 Petrografía.....	15
2.3 TRABAJOS PREVIOS .....	16
CAPÍTULO 3 MÉTODOS.....	19
3.1 INTRODUCCIÓN MÉTODO GRAVIMÉTRICO.....	19
3.2 PROSPECCIÓN GRAVIMÉTRICA.....	19
3.2.1 Campo de atracción de una masa puntual.....	19
3.2.2 Esferoide de referencia.....	21
3.2.3 Geoide.....	23
3.3 CORRECCIONES GRAVIMÉTRICAS.....	23
3.3.1 Corrección por deriva.....	23
3.3.2 Corrección por marea.....	25
3.3.3 Corrección por latitud.....	25

## Índice

3.3.4	Corrección por aire libre.....	27
3.3.5	Corrección de Bouguer.....	27
3.3.6	Corrección topográfica.....	28
3.3.7	Densidades de las rocas.....	28
3.3.8	Anomalía de Bouguer y Anomalía de Aire .....	29
3.3.8.1	Anomalía de aire libre .....	30
3.4	PROSPECCIÓN MAGNÉTICA .....	30
3.4.1	Introducción .....	30
3.4.2	Momento magnético.....	31
3.4.3	Intensidad de magnetización.....	31
3.4.4	Susceptibilidad magnética.....	32
3.4.5	Potencial magnético.....	32
3.4.6	Elementos del campo geomagnético.....	32
3.5	CORRECCIONES MAGNÉTICAS.....	34
3.5.1	Anomalía Magnética .....	36
3.6	PROCESAMIENTO DE ANOMALIAS.....	36
3.6.1	Reducción al Polo (RTP).....	37
3.6.2	Anomalías Regional – Residual.....	37
3.6.3	Continuación Ascendente-Descendente.....	38
3.6.4	Señal Analítica .....	38
3.6.5	Derivada vertical .....	39
3.6.6	Análisis Espectral.....	39
CAPÍTULO 4	ANÁLISIS GEOFÍSICO.....	41
4.1	Instrumentación .....	41
4.1.2.	Gravímetro .....	41
4.1.3	Magnetómetro .....	42
4.2	PROCESAMIENTO.....	43
4.2.1	Anomalía de Bouguer .....	51
4.2.2	Anomalías Regional y Residual.....	54
4.2.3	Continuación Ascendente/Descendente en datos gravimétricos.....	59
4.2.3.1	Continuación Analítica Ascendente.....	59

## Índice

4.2.3.2	Continuación Analítica Descendente. ....	61
4.2.4	Primera derivada vertical datos gravimétricos .....	63
4.2.5	Mapa de la Anomalía Magnética de Campo Total. ....	65
4.2.6	Reducción al Polo. ....	67
4.2.7	Anomalías Regional/Residual para datos magnéticos .....	70
4.2.7.1	Anomalía Regional.....	70
4.2.7.2	Anomalía Residual.....	72
4.2.8	Continuación Ascendente/Descendente para datos magnetométricos.....	74
4.2.9	Derivada vertical. ....	78
4.2.10	Señal Analítica. ....	80
4.3.	ANÁLISIS ESPECTRAL.....	82
4.4.	MODELADO .....	84
4.4.1	Primera sección .....	87
4.4.2	Segunda sección.....	90
4.4.3	Tercera sección.....	93
4.4.4	Cuarta sección .....	96
4.4.4	Quinta sección.....	99
CAPÍTULO 5	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	103
5.1	Discusión de Resultados.....	103
	Conclusiones .....	107
	REFERENCIAS.....	109

## RESUMEN

Las características de la geología en la región central de México están asociadas al Cinturón Volcánico Transmexicano. La zona de este estudio se localiza en el sector central, en el Valle de México, en el sector norte del campo volcánico. El estudio se realiza en el campo volcánico del Pedregal de San Ángel, en la Ciudad Universitaria de la UNAM y zonas aledañas, donde se puede observar diferentes afloramientos vinculados a los flujos de lava del volcán Xitle. Esta tesis, presenta los resultados del estudio geofísico y modelado de las anomalías de características gravimétricas y magnéticas.

Para el estudio, se trabajó con los datos gravimétricos y magnetométricos en la Ciudad Universitaria (UNAM) así como colonias aledañas. Los datos se obtuvieron en diferentes etapas los cuales después del procesamiento se obtuvo las anomalías, gravimétrica de Bouguer y magnética de Campo Total. En el mapa de la anomalía de Bouguer, se presenta una anomalía en la parte central del mapa de valores bajos el cual parece seguir una orientación con SW-NE. En el mapa magnético de campo total se encuentra una anomalía que disminuye en dirección NE. A las anomalías obtenidas se aplicaron diferentes filtros con la finalidad de separar las componentes regional y residual y así comparar los diferentes mapas obtenidos.

Del análisis espectral en ambos gravimetría y magnetometría se estima una profundidad a la fuente de 20 m a 40 m. En las fuentes profundas las profundidades estimadas varían de 200 m aproximadamente, lo cual influye en los mapas regionales donde las anomalías se asocian a diferentes fuentes profundas. En relación con las anomalías residuales, en ambos métodos potenciales, en el sector NW se presentan las anomalías con valores altos, los cuales van reduciéndose al NE de la zona de la colonia Romero de Terreros. A lo largo del mapa las anomalías describen un patrón de la distribución de las anomalías altas, las cuales se relacionan con los flujos de lava del volcán Xitle.

Con base a la interpretación de los mapas de anomalía, se analizaron cinco secciones con orientaciones S-N, SW-NE y W-E, para la elaboración de modelos, de los cuales la variación de los perfiles gravimétricos era menor en comparación con los perfiles magnetométricos. Los modelos muestran que la unidad más somera tiene una mayor contribución en la parte magnetométrica y en el caso gravimétrico está asociada con algunas fuentes más profundas. Las fuentes someras podrían relacionarse con los flujos de lava en Ciudad Universitaria (UNAM) y la disminución del espesor hacia el NE.

## ABSTRACT

The geology in the central region of Mexico is associated with the Trans-Mexican Volcanic Belt. The study area is located in the central sector in the Valley of México, in the northern part the Chichinautzin volcanic field. The geophysical study was completed in the Pedregal de San Angel lava field and neighboring colonies. The Xitle volcanic eruption occurred in historic times, around 2000 years ago and affected the early settlements in the valley. The Cuicuilco archaeological site is covered by the lava flows and tephras. In this thesis we present the results of gravity and magnetic survey and magnetic survey over the lava field in the UNAM University campus.

We worked with the gravimetric and magnetometric data. After a subsequent processing was obtained the anomalies of Bouguer and Total Field Magnetic, where it was found that in the map of the Bouguer anomaly, there is an anomaly in the central part of the map of low amplitude which seems to follow a SW-NE orientation, and in the magnetic field map is an anomaly that decreases in NE direction. Different filters were applied in order to separate the regional - residual components and thus compare and interpret the potential field anomaly maps obtained.

From the spectral analysis carried out on both potential methods, a shallow source, are found at depths of around 20 m to 40 m. Depths to the deep sources vary around 200 m, which influences the regional maps where the anomalies are associated with different deep sources. In relation to the residual part, in both potential methods, the NW part is the anomalies with high values, which are reduced to the NE of the map nearby colony Romero de Terreros, along the map the anomalies describe a pattern of the distribution of high anomalies, which may be related to the lava outcrops of Xitle volcano.

Finally, five profiles with orientations S-N, SW-NE and W-E, are used for the forward modeling, the variation of the gravimetric profiles was smaller in comparison with the magnetometric profiles. The models show that the shallower layer has a greater contribution in the magnetometric part and in the gravimetric case it is associated with some deeper layers. This shallow layer could be related to the lava flows in the UNAM Ciudad Universitaria and the decrease in thickness towards the NE.

# CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

## **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La Ciudad de México se encuentra en una cuenca endorreica la cual se produjo con el pasar de tiempo por la actividad tectónica y volcánica. En su parte Sur la cuenca fue cerrada debido a los productos (coladas de lava, flujos piroclásticos, ceniza, etc.) de los procesos eruptivos de la Sierra del Chichinautzin (Moser et al, 1974; Urrutia y Martin, 1993; Siebe 2006, Ferrari 2011).

Estas unidades geológicas están presentes en la geología de la Ciudad Universitaria y colonias aledañas, donde se puede observar las coladas de lava del volcán Xitle. La distribución de las unidades en el subsuelo tiene características que pueden ser observadas por métodos potenciales, con lo cual podemos realizar una descripción de las anomalías gravimétricas y magnetométricas, encontradas en el área de estudio.

De modo que, se puede plantear cual podría ser la profundidad en la cual hay una contribución de las anomalías gravimétricas y magnetométricas debidas a las coladas de lava; que diferencias puede encontrarse entre el método gravimétrico y magnetométrico, al hallarse en una región donde las coladas de lavas tienen una influencia mayor en la parte magnética.

Esta inferencia se apoya de la información de los artículos de Siebe 1999 y Delgado 1998, los cuales mencionan que la erupción más reciente tiene alrededor de 2000 años, con una extensión aproximadamente de 70 km<sup>2</sup>, que cubre entre otras regiones el área de Cuicuilco y Ciudad Universitaria (UNAM), constituido en gran medida de roca basáltica. Por otra parte, debido a la construcción de modelos teóricos para definir las fuentes que producen las anomalías obtenidas en el subsuelo, los trabajos de González-Torres 2015, Unda 2016 y Valdez 2015, nos refieren de la estratigrafía y litología encontradas en el Pozo Copilco -1, asociado a los estudios de pozos profundos del Valle de México por parte de PEMEX.

Así, con toda esta información, se puede determinar si los límites de la erupción pueden establecerse con los métodos potenciales, y proponer una distribución de los estratos del subsuelo, principalmente en la parte más somera.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

La importancia de este trabajo de tesis consiste en la aplicación de los métodos potenciales para la descripción de las anomalías gravimétrica y magnetométrica encontradas en la Ciudad Universitaria, situada en el Campo Volcánico del Pedregal de San Ángel, donde la aplicación de filtros nos ayudara a determinar las anomalías residuales y regionales, con lo cual se puede

realizar una interpretación de las anomalías y proponer modelos que brinden una representación de las características del subsuelo.

### **1.3 HIPÓTESIS**

Debido al área que cubrió la erupción del volcán Xitle la cual se mencionó anteriormente, es procedente que el estudio se deba acotar, a la zona que cubre el campus de C.U. además de algunas zonas aledañas a Ciudad Universitaria. Delgado et al. 1998, describe un área de extensión que cubrió la erupción de la lava del Xitle, en la parte del campus de C.U. y parte de la zona de la colonia de Romero de Terreros, que es la parte donde podría terminar el flujo de lava. Por lo que se plantea si es posible con los mapas gravimétricos y magnetométricos investigar los límites planteados en el estudio de Delgado, et al. 1998.

Con los datos provenientes de diferentes etapas de adquisición por distintas brigadas en la regiones de la colonia Romero de Terreros, C.U., Cuicuilco y Chimalistac, con el apoyo de los equipos gravimétricos y magnéticos con supervisión del Dr. Jaime Urrutia ,se espera que las zonas más cercanas al norte habrá una disminución del espesor de la roca basáltica, al ser la región más alejada del Volcán Xitle, y la influencia de la unidad superficial de basalto en las anomalías magnéticas, sin embargo, hay que tomar en cuenta que, en la zona Norte se encuentran más construcciones, estructuras metálicas, cableado eléctricos y flujo vial, que puede acarrear ruido a los datos obtenidos.

### **1.4 OBJETIVOS**

#### **1.4.1 Objetivo General**

La relevancia del presente estudio está orientada a documentar e interpretar de las anomalías gravimétricas y magnetométricas correspondiente al Pedregal de San Ángel donde se ubica Ciudad Universitaria. Además del análisis las anomalías de fuente somera y de fuente profundas, las cuales podrían relacionarse con las coladas de lava de erupción del volcán Xitle y las estructuras más antiguas.

#### **1.4.2 Objetivos Particulares**

Para la realización de la descripción de las anomalías es necesario realizar el siguiente análisis:

- Obtención de los datos que caracterizan la zona, con sus respectivas correcciones a los datos sin procesar, para cada método potencial.
- La realización de mapas, con los cuales se pueda representar las anomalías que influyen en el área de estudio. Obtenidos los mapas anteriores se aplicarán filtros para la separación de las anomalías con diferentes características que influyen en los mapas base de los métodos potenciales, además del análisis de las anomalías obtenidas.

## Capítulo 1 Introducción

- Por medio del análisis espectral, estimar profundidades a las fuentes y correlaciones con las anomalías producidas.
- La realización de secciones con lo cual se pueda obtener modelos que representen las características del subsuelo de la zona de Ciudad Universitaria.
- Interpretación de las anomalías obtenidas en los puntos anteriores.

# CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES

## 2.1 *ÁREA DE ESTUDIO*

Las áreas donde se tomaron los datos: Ciudad Universitaria de la UNAM, zona arqueológica de Cuicuilco y las colonias Romero de Terreros y Chimalistac de las delegaciones de Coyoacán y Álvaro Obregón de la Ciudad de México. En la figura [1] se muestra el mapa de la topografía de la zona de estudio, donde los colores cálidos en el cual existe mayor elevación en este caso un límite de 2839 m y en su contraparte los colores fríos menor elevación con límite de 2258.67 m. En este caso en tonalidad naranja se encuentra el cerro del Zacatépetl de 2400 m en la región SW, como se muestra la distribución de elevación en la región W y parte de la SE corresponde a la elevación con más altitud. En la parte norte la elevación disminuye hasta un rango de 2264 m.

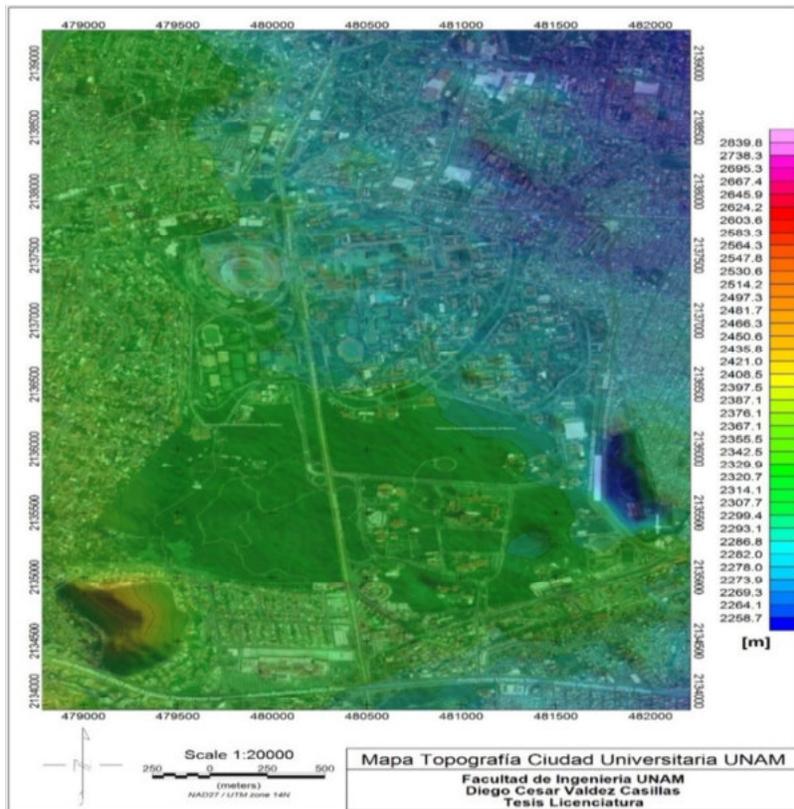


Fig. [1] Mapa de la topografía de la zona de estudio, en la cual se muestra que la parte S-SW es la parte más elevada, descendiendo, hacia la parte NE. La zona de estudio abarca las colonias Romero de Terreros, Chimalistac, además del área de Ciudad Universitaria y la zona de arqueológica de Cuicuilco (Datos obtenidos del programa Geomapapp® y mapa realizado en Geosoft®).

## Capítulo 2 Antecedentes

La toma de datos para el presente estudio fue realizada en cuatro distintos periodos, por diferentes brigadas de trabajo, con supervisión del Dr. Jaime Urrutia, las zonas donde fueron adquiridas la información se describen a continuación:

1. La zona de la colonia Romero de Terreros, con coordenadas aproximadamente entre latitud  $N19^{\circ}20'04''$ - $N19^{\circ}20'50''$  y longitud  $W 99^{\circ}10'12''$ -  $W 99^{\circ}11'6''$  con una elevación de los 2270 m.s.n.m. colindando al NE de Ciudad Universitaria. Con accesos varios al ubicarse en una zona urbana, siendo la Av. Universidad, Eje 10 Sur, Av. Pedro Enríquez Ureña y Av. Miguel Ángel de Quevedo, siendo estas las principales vías, delimitada por la línea amarilla como se presenta en la fig. [2]. La zona cuenta con unidades habitacionales, así como con fraccionamientos con todos los servicios básicos, establecimientos comerciales y transporte.



Fig. [2] Área de toma de datos en la zona Romero de Terreros, al noreste de Ciudad Universitaria (Google Earth®, 2009).

2. Una segunda toma de datos está referida al campus de CU aproximadamente entre las coordenadas de latitud  $N 19^{\circ}18'$ - $N 19^{\circ}20'$  y longitud  $W 99^{\circ}11'$  –  $W 99^{\circ}10'$  como se presenta en la figura [3]. En las cuales se encuentran, diferentes espacios como son, zonas culturales, espacios deportivos, la reserva ecológica, facultades, institutos, también se incluye las instalaciones de la cantera del equipo de futbol de esta institución.

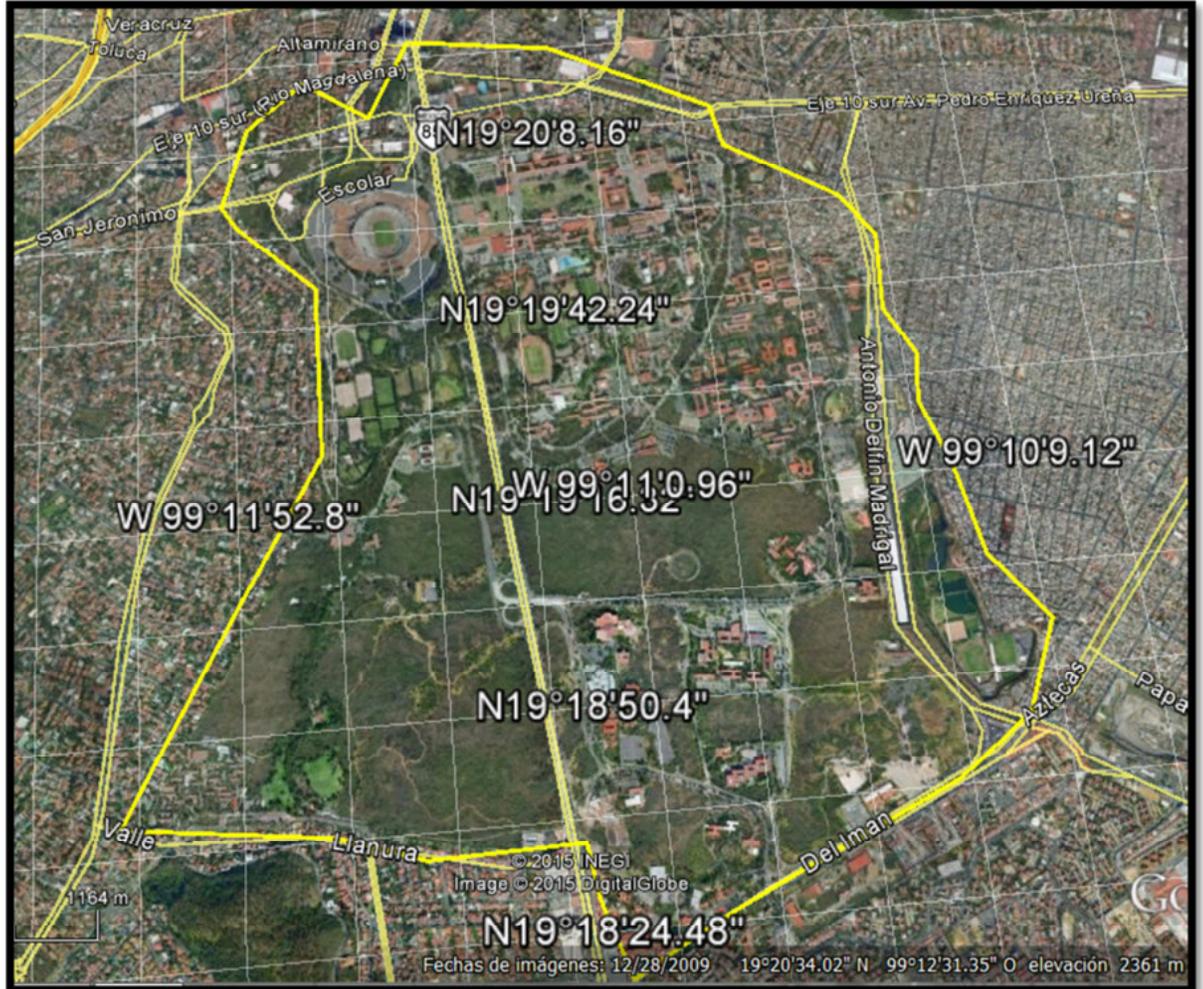


Fig. [3] Área de toma de datos en la zona de Ciudad Universitaria (Google Earth®, 2009).

3. La tercera parte de toma de datos fue realizada en la zona arqueológica de Cuiculco con coordenadas aproximadas de latitud N 19°17'-N 19°18' y longitud W 99°11'-W 99°10', figura [4], donde la gran parte se encuentra sin modificaciones realizadas en el subsuelo, al ser considerada una zona arqueológica.



Fig. [4] Área de toma de datos en la zona arqueológica de Cuicuilco (Google Earth®, 2009).

4. La última toma de datos se realizó en la colonia Chimalistac, ubicada entre las coordenadas de latitud N 19°20'- N 19°20' y longitud W 99°11'- W 99° 10', figura [5], se caracteriza por sus conjuntos habitacionales y calles de acceso restringido así, también limitado por avenidas como Insurgentes y Universidad.

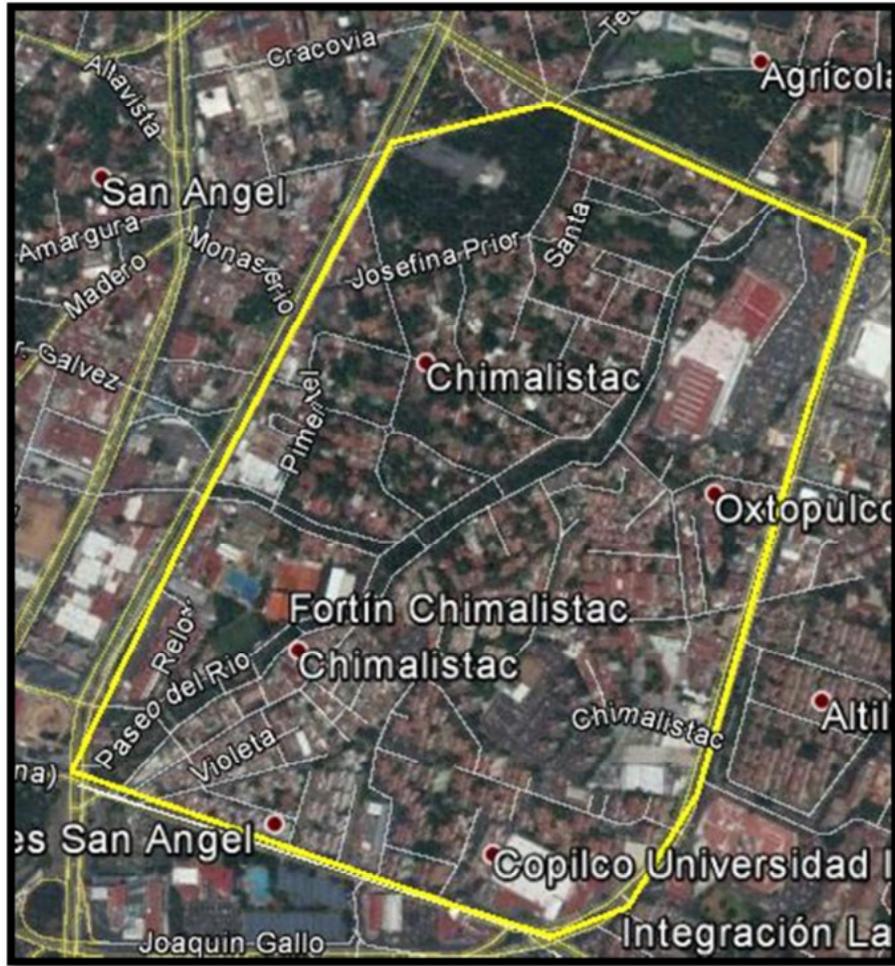


Fig. [5] Área de toma de datos en la Colonia Chimalistac (Google Earth®, 2015).

La interpretación de las anomalías de los métodos potenciales está enfocada en el área de Ciudad Universitaria, siendo las demás áreas descritas como un complemento. Algunas anomalías pueden estar relacionadas con afloramientos de basalto. *Palacios- Noëlle, 2015*, realiza una descripción de los afloramientos encontrados en Ciudad Universitaria de los cuales menciona un corte transversal de un lóbulo de lava de espesor de 5 m en la parte posterior de la facultad de Psicología. Afloramientos en la parte poniente del Estadio Olímpico Universitario, la zona donde los espesores de lava son mayores se ubica en las instalaciones de la cantera donde existe un corte 18 a 35 m de espesor aproximadamente.

En las colonias Chimalistac y Romero de Terreros que colindan con Ciudad Universitaria, son pocos los afloramientos que se pueda hacer referencia, los dos más destacados se encuentran ubicados en la Unidad Habitacional Integración Latinoamericana y Privada de Chimalistac, de las cuales no se tiene referencia del espesor del corte de lava.

## 2.2 MARCO GEOLÓGICO

### 2.2.1 Cinturón Volcánico Transmexicano.

El Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) es el arco volcánico que atraviesa la parte central de México, desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México como se observa en la fig. [6]. localizado entre las latitudes de 19°N y 20°N. Cabe mencionar, que son pocos los volcanes activos, los cuales se clasifican por sus características en poligénéticos y monogénéticos, estos últimos se encuentran concentrados en la Sierra de Chichinautzin y el Estado de Michoacán.

De una longitud aproximada de 1000 km y un ancho variable entre 80 km y 230 km, distribuyéndose con una dirección E-W en su parte central. Constituido en el Sur de la Placa Norteamericana, la cual es subducida por la parte occidental de la placa de Cocos y la placa de Rivera (Ferrari, 2016).

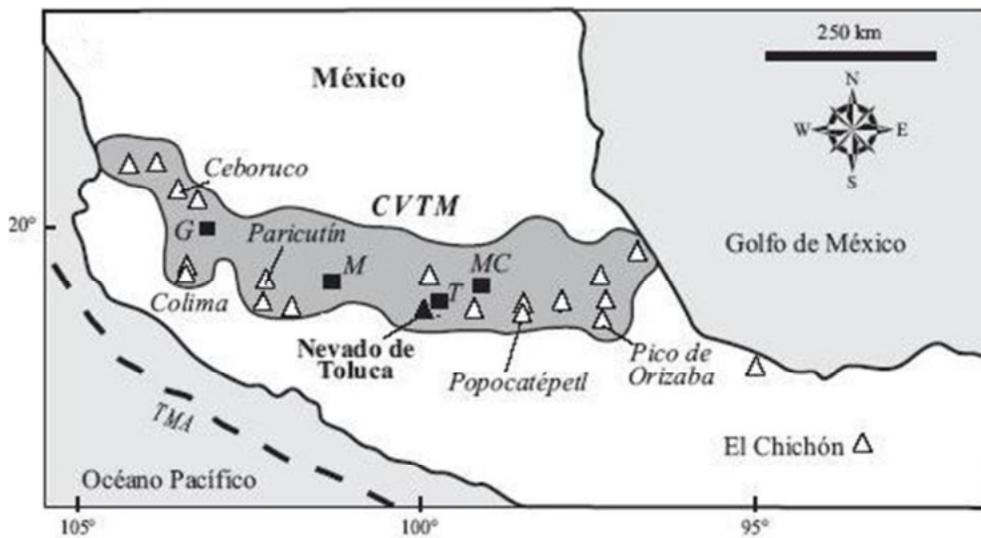


Fig. [6] Localización del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM), donde los triángulos asocian los volcanes más significativos en la zona. T: Toluca, MC: Ciudad de México, M: Morelia, G: Guadalajara, TMA: Trinchera mesoamericana. (Modificada de D'Antonio, et al, 2008).

Entre los rasgos peculiares del CTVM, son la gran variabilidad de estilo volcánico y composición química a lo largo del arco. Gómez- Tuena et al. (2005), indica que el CVTM se puede dividir en tres sectores: occidental, centro y oriental. Estos tres sectores presentan diferencias significativas en lo que respecta al tipo de volcanismo y su composición química. Formado por conos monogénéticos y pequeños volcanes de escudo de composición basáltica o basáltica-andesítica (Cano, 2007).

### 2.2.2 Campo Volcánico de Chichinautzin.

El nombre de esta sierra "Chichinautzin" deriva del volcán del mismo nombre y significa en náhuatl "Señor que quema". El Campo Volcánico Chichinautzin (CVC) es parte del Cinturón Volcánico Transmexicano, localizada al Sur de la cuenca de México, presentando alineaciones volcánicas E-W. La fase eruptiva de la región es considerada de corta duración del Plioceno Superior al Holoceno, edad que finalmente cierra la Cuenca de México (Mooser et al., 1974).

Se localiza al sur de la Ciudad de México, al Norte del Estado de Morelos y en la porción oriente y poniente del Estado de México, cuenta con una superficie aproximada de 1500 km<sup>2</sup>. Localizada entre las coordenadas extremas 18°52' – 19°21' latitud Norte y 98°52' – 99°25' longitud Oeste, con altitudes desde 1400 hasta los 3800 m.s.n.m. (Lomas,2009).

Es la unidad volcánica más joven, en el área con una edad que varía entre 38 000 y 8000 años. Consiste en una serie de conos de escoria y de flujos de lava fisúales básaltica-andesítica (Siebe et al, 2006).

En el CVC existen diferentes formas de relieve generadas a partir de la extrusión de material ígneo proveniente del interior de la Tierra, las dimensiones pueden variar desde montículos hasta enormes montañas. En el campo volcánico de Chichinautzin las estructuras representativas de la región son los conos de escoria con coladas de lava como en el caso de Xitle, volcanes escudo y por flujos espesos de lava asociado a fisuras. En la fig. [7] se presenta la distribución de los centros volcánicos en el campo volcánico de Chichinautzin, encontrando volcanes de tipo escudo y conos cineríticos, en el CVC.

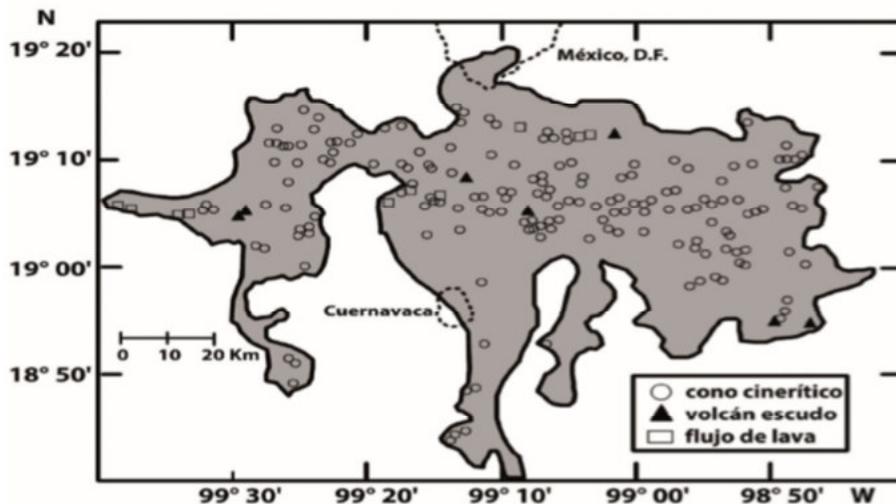


Fig. [7]. Distribución de los tipos de volcanes, en el Campo Volcánico de Chichinautzin, donde se puede observar que existe mayor densidad de conos cineríticos, identificados como círculos. (Tomada de Gómez, 2011)

## Capítulo 2 Antecedentes

Las coladas de lava son predominantemente andesíticas y en menor proporción basáltico-alcalinas y dacíticas (Bloomfiel, 1975), que alcanzan longitudes y espesores hasta 22 km y 300 m respectivamente (Martín del Pozzo, 1982). El C.V.C. tiene una alta concentración de volcanes de tipo monogenéticos, además de incluir conos de ceniza superpuestos, asociados al flujo de lava, de diferentes secuencias y escudos de lava intercalados con sedimentos aluviales.

### 2.2.3 Fisiografía.

Fisiográficamente la Ciudad de México, consta de dos elementos geomorfológicos principales: a) las partes altas, cerros, laderas y lomeríos que bordean el Valle de México y b) las partes planas o de poca inclinación que morfológicamente corresponden a un valle o altiplanicie, el cual consta de varias depresiones lacustres de desecación y pequeñas elevaciones topográficas aisladas, como lo son los cerros del peñón y de Chapultepec. (Enciso de la Vega, 1992).

### 2.2.4 Estratigrafía.

Vazquez - Jaimes (1989), publican en 1989 un análisis de la Cuenca de México, la cual analiza con base a estudios estratigráficos, estructurales y petroquímicos, la evolución de la Cuenca de México desde el Cretácico, del cual se toma la descripción referente a las relaciones estratigráficas en la zona de estudio, en el siguiente texto: *“Formación Las Cruces- Schlaepfer(1968) designó como Formación las Cruces al conjunto de rocas volcánicas que forman la Sierras de las Cruces y Monte Alto, se distribuye en el límite sudoccidental de la Cuenca de México. Los depósitos piroclásticos pertenecientes a esta unidad que se observan en campo consisten en Pómez y secuencia de surges ya sea planares o masivos cubiertas por flujos piroclásticos. Las lavas observadas se encuentran intercaladas con brechas en las partes altas de la Sierra de las Cruces. La formación de las Cruces cubre con discordancia erosional las rocas extrusivas del Mioceno Medio y Mioceno Tardío y rocas volcánicas del Plioceno temprano y se encuentra a su vez cubierta por depósitos aluviales y lacustres del Cuaternario, así como también por derrames lávicos y piroclásticos de las formaciones Chichinautzin y el Pino su edad corresponde al Plioceno Tardío.”*

La estratigrafía de la Ciudad de México, conforme a Enciso de la Vega, 1992 propone un marco estratigráfico compuesto de las siguientes formaciones: Formación Morelos, Formación Cuautla (de profundidades mayores a 2000 m considerada la unidad más antigua del basamento del Albiano medio-Cenomaniano temprano), Formación Mexcala, Grupo Balsas, Grupo Pachuca, Grupo Anáhuac, Grupo Taranguense, Grupo Popocatepetl, Grupo Chichinautzin y el Alogrupo Tenochtitlan. De los cuales el de interés en el estudio es el grupo Chichinautzin en la que se cita lo siguiente: *“Fries (1960) utilizó el nombre de Grupo Chichinautzin para las corrientes lávicas y los estratos de toba y brecha, así como materiales clásticos interestratificados depositados por agua, que sobreyacen en discordancia a depósitos clásticos y volcánicos del Terciario y del Plioceno-*

*Cuaternario. Las rocas de este grupo se interdigitan con rocas del Grupo Popocatepetl y del Alogrupo Tenochtitlan. La composición petrográfica de este grupo consta de andesitas basálticas, basaltos y dacitas. Con un espesor de 1800 m aprox.” (Enciso de la Vega, 1992).*

### 2.2.5 XITLE

El volcán Xitle (xictli= ombliguito en náhuatl) produjo las oscuras lavas basálticas del pedregal. Forma parte de un conjunto de 200 pequeños volcanes que son parte del campo volcánico de la Sierra de Chichinautzin. El Xitle es un volcán monogenético, es decir, se produjo durante una sola erupción, a diferencia de los volcanes poligenéticos que se forman a lo largo de miles de años como producto de múltiples erupciones interrumpidas con periodos de reposo de duración variable. La extensión de lavas de productos de la emisión del volcán Xitle, cubre un área de aproximadamente 70 km<sup>2</sup> (Siebe, 2009).

El tipo de cono es de ceniza con una altura de 140 m y un diámetro basal de 500 m. Está localizado al noreste de los declives del extinto Volcán de Ajusco. El cono del Xitle fue creciendo en los depósitos de avalanchas del Ajusco, el flujo de lava siguió una trayectoria N y NE a través de las barrancas (Siebe, 2009).

La erupción inició de manera “estromboliana” cuando el magma basáltico rico en gases llegó desde profundidades mayores a 50 km superior a la superficie (Cervantes y Wallace, 2003). En la fig.[8], describe el descenso de lava por las laderas del Ajusco fue controlado por la topografía de la región teniendo un recorrido N-NE siguió una distancia de 12 km, hasta descender a la Cuenca de México donde se encontraban partes lacustres propias de la Cuenca de México, abarcando lo que hoy son las delegaciones como son Tlalpan, Coyoacán y Álvaro Obregón, y sitios como el cerro de Zacatepetl y Ciudad Universitaria de la UNAM.

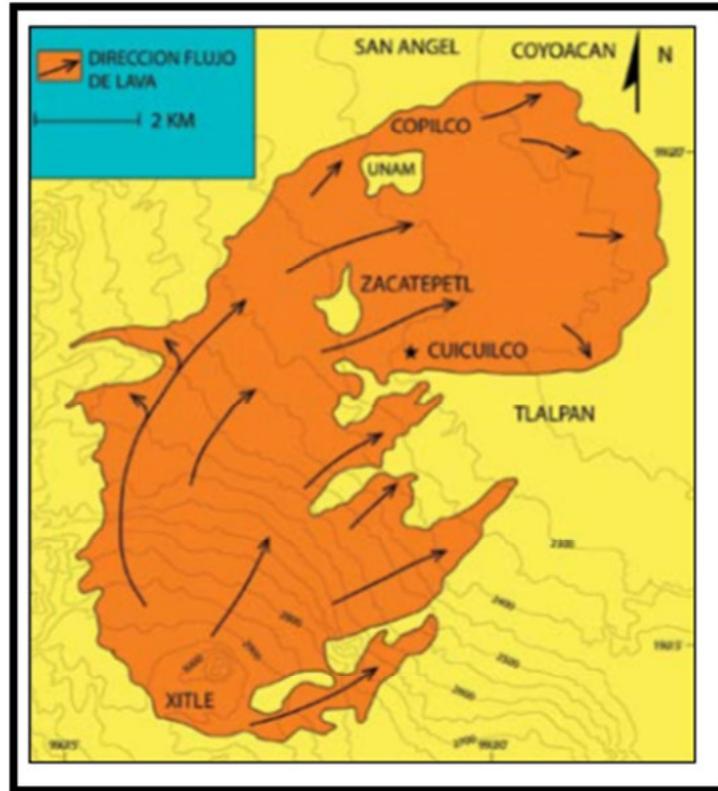


Fig. [8] En la imagen se describe el flujo de Lava del Volcán Xitle, siguiendo una dirección N-NE, donde el flujo de lava se asocia a la topografía, cubriendo parte de Tlalpan, la zona Arqueológica de Cuicuilco, San Ángel, Copilco y las instalaciones de la UNAM (Tomada de Siebe, 2009).

En la etapa final de la erupción del Xitle el flujo de lava cubrió un total de 70 km<sup>2</sup> extendiéndose en las zonas lacustres de la cuenca de México. El flujo de lava descendió 900 m y continuo 12 km, parte del fluido avanzo a través de tubos de lava (Siebe, 2009).

El fluido de lava correspondiente a la erupción del Xitle concuerda con el tipo pahoehoe, también se destacan vesículas comúnmente en las cimas de las unidades. El flujo de ceniza fue dispersado con una orientación S-W. Las lavas del volcán Xitle tiene una baja viscosidad, características asociadas con una erupción efusiva.

La distribución de los fluidos de lava fue controlada por la topografía, el cono de Xitle creció en la ladera del Ajusco, debido a esto el flujo de lava tuvo una dirección N-NE hasta llegar al piso de la cuenca, donde su distribución estuvo influenciada por colinas y riveras, la cuales dieron curso al fluido magmático. En los afloramientos la variación de espesor de 2 m a 6 m observadas en algunos puntos, estudios paleomagnéticos indican que la erupción del volcán Xitle puede estar datada cerca de 2000 años aproximadamente (Urrutia, 1999).

## Capítulo 2 Antecedentes

Los flujos de lava asociados con el volcán Xitle fueron clasificados en siete partes de acuerdo con el artículo de Delgado (1998). Como se presenta en la fig. [9] donde establece siete flujos provenientes del volcán Xitle, con una dirección NE, el flujo más alejado se localiza en las cercanías de la Avenida de Miguel Ángel de Quevedo. Otro tipo de productos volcánicos relacionados con el Xitle, incluyen fluidos piroclásticos debajo de los fluidos de lava.

De la clasificación de los flujos de lava, de más interés para este proyecto destacan el 5 y 6, las cuales se describen a continuación:

*“La lava Basáltica de Ciudad Universitaria (BCU). La unidad cubre principalmente el campus de la Universidad Nacional Autónoma de México, con una extensión de 12.5 km, y espesor promedio de 25 m. Estos fluidos cubren también la zona arqueológica de Cuicuilco. La lava basáltica del Pedregal de San Ángel, esta lava se extiende el flanco norte del cono del Xicontle, al norte por más de 10 km cubriendo un área de 18.8 km<sup>2</sup> con un espesor de 10 m” (Delgado, 1998).*

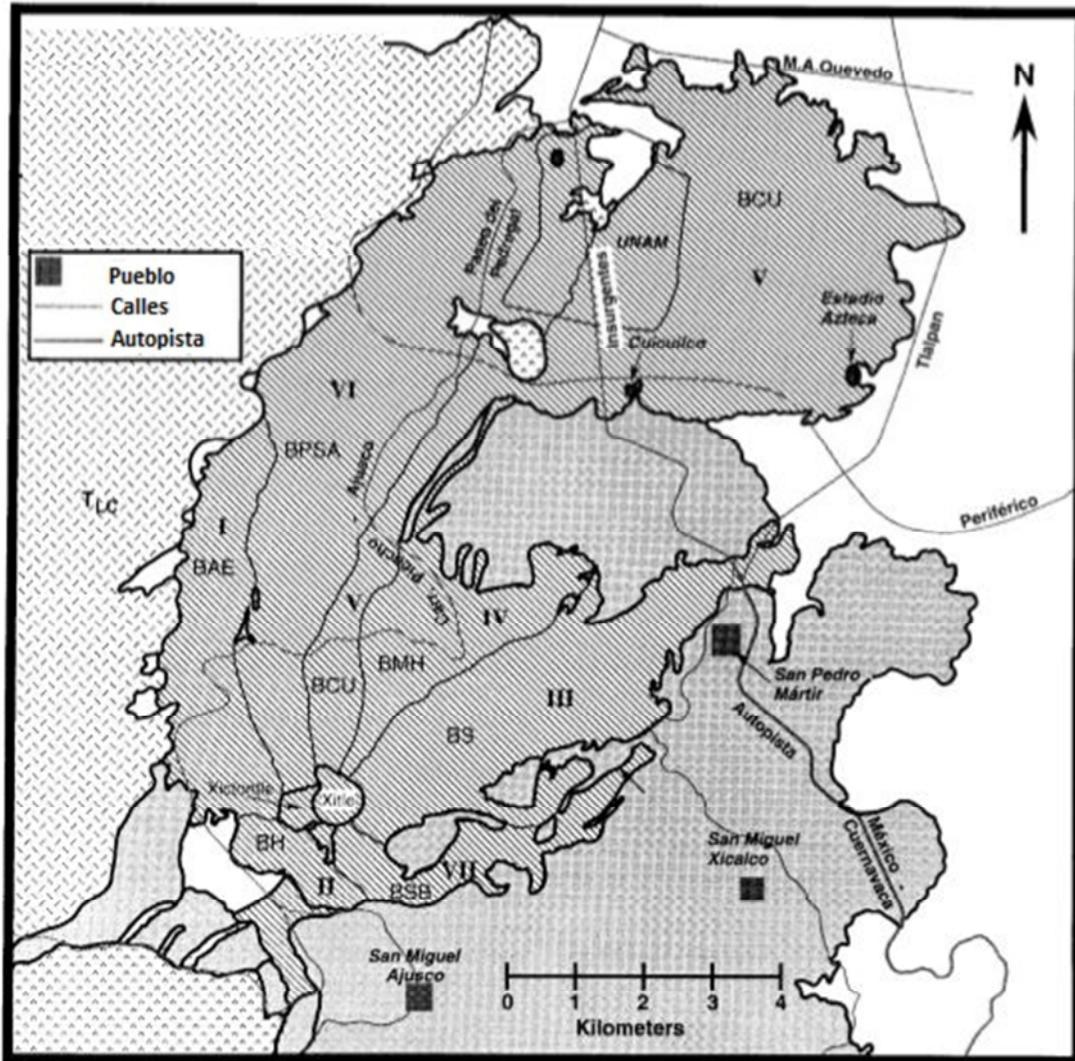


Fig. [9] *Diferentes zonas de flujo de lava en la cual se presenta representada del I-VI; (I)(BAE) Miembro lava basáltica Agua Escondida, (II)(BH) Miembro lava basáltica Héroes de 1910, (III)(BMH) Miembro lava basáltica Miguel Hidalgo, (IV)(BCU) Miembro Ciudad Universitaria, (V)(BPSA) Miembro lava basáltica Pedregal de San Ángel, (VI)(BS) Miembro lava basáltica Seminario, (VII)(BSB) Miembro lava basáltica San Buenaventura, (T<sub>LC</sub>) Formación las Cruces, de la cual podemos observar que la zona de Ciudad Universitaria abarca el flujo-V (Modificada de Delgado, 1998).*

### 2.2.5.1 Petrografía

El análisis de las unidades respecto a los flujos de lava muestra abundancia de minerales como son plagioclasas, olivino y clinopiroxeno en las lavas del volcán de Xitle. Otros minerales encontrados incluyen magnetita, ilmenita, titanomagnetita y hematita; los fenocristales de plagioclasas son

ligeramente más abundantes en las facies proximales comparadas con las distales. En las facies proximales, el magma residió más tiempo en la corteza, lo que permitió que crecieran más plagioclasas, cuando en las facies distales representan las primeras porciones de cada grupo en la erupción de magma. Durante la fase de más intensidad de la erupción las lavas fueron máficas y se clasifican como basalto, esta característica es predominante en la región donde se ubica Ciudad Universitaria (Delgado et al. 1998).

### 2.3 TRABAJOS PREVIOS

Siebe (2000), describe las características del volcán Xitle, y las implicaciones que tuvo en las ruinas de la zona arqueológica de Cuicuilco. En los artículos Urrutia et al. 2016 y 2016 se describe los estudios paleomagnéticos para determinar la edad de la erupción del volcán Xitle, dirección del flujo de lava con respecto a las inclinaciones y declinaciones del magnetismo remanente en las coladas de lava, análisis químico; obteniendo como resultado que en el basalto cuenta con alto grado de aluminio. Además de la relación que tuvo la erupción del volcán con el abandono de Cuicuilco. En los mismos estudios, se hace mención del paleomagnetismo en el flujo de lava en la Cuenca de México, se establece que la edad de la erupción, con apoyo de los estudios paleomagnéticos, los cuales dan una fecha aproximadamente de 2000 BP a diferencia del estudio de radio carbono los cuales datan la erupción en una fecha de 2422 BP.

Delgado et al. 1998, describe la estratigrafía referente a las coladas de lava del volcán Xitle, proponiendo un mapa de la extensión de la erupción del Volcán Xitle, además de describir el marco geológico en la cual se originó el volcán.

La secuencia que refiere Delgado et al. 1998, lo forman los siete flujos de lava como se observa en la fig.[9], formado por: *Lavas del volcán Xitle ( $Q_{xp}$ )* se describen las características generales y la alineación que presentan, *Miembro Lava Basáltica Xicontle* compuesto de basalto porfídico al oeste del volcán Xitle, *Miembro Lava Basáltica Agua Escondida (BAE)(Flujo I)*, primer flujo de lava compuesto de basalto-olivino, *Miembro Lava Basáltica Héroses de 1910(BH)(Flujo II)*, localizado al suroeste del volcán Xitle composición basalto-olivino, *Miembro Lava Basáltica Seminario (BS)(Flujo III)* ubicado al noreste del Volcán Xitle compuesto de basalto con olivino, plagioclasas, *Miembro Lava Basáltica Miguel Hidalgo (BMH)(Flujo IV)* cubre un área de 4.5 km<sup>2</sup>, compuesto de basalto-olivino, *Miembro Lava Basáltica Ciudad Universitaria(BCU)(Flujo V)* formado en menor parte de unidades de basalto-olivino, representa la unidad más extensa representando la fase paroxística de la erupción, *Miembro Lava Basáltica Pedregal de San Ángel (BPSA)(Flujo VI)* cubre un área de 18.8 km<sup>2</sup> con un espesor de 10 m, *Miembro Lava Basáltica San Buenaventura(BSB)(Flujo VII)* el ultimo flujo de lava del volcán Xitle, compuesto de basalto con alteraciones de fenocristales de olivino y plagioclasas.

## Capítulo 2 Antecedentes

Cervantes, (2003) desarrolla el tema sobre la característica del domo del volcán Xitle, por medio del estudio de la abundancia de elementos volátiles en las muestras de lava ( $H_2O$ ,  $CO_2$ , S), en inclusiones de olivino en tephras. Se plantea que el estilo eruptivo del Xitle está relacionado con el material que compone la lava, basado en la desgasificación del magma. La forma del domo del volcán corresponde al flujo de escoria, relacionada con actividad en un principio del tipo estromboliano, posteriormente, continuo con actividad largamente efusiva, y finalmente una segunda y breve fase explosiva que depositó inclusiones de tephra, como se observa en la figura [10]. El cambio del estilo eruptivo, (Cervantes, 2003) lo asocia con el cambio de la composición del magma máfico, con un magma viscoso andesítico que expulso violentamente. El cual aparece en las muestras de lava composición andesítica-basáltica, mucho más cercano a la composición de magma basáltico.

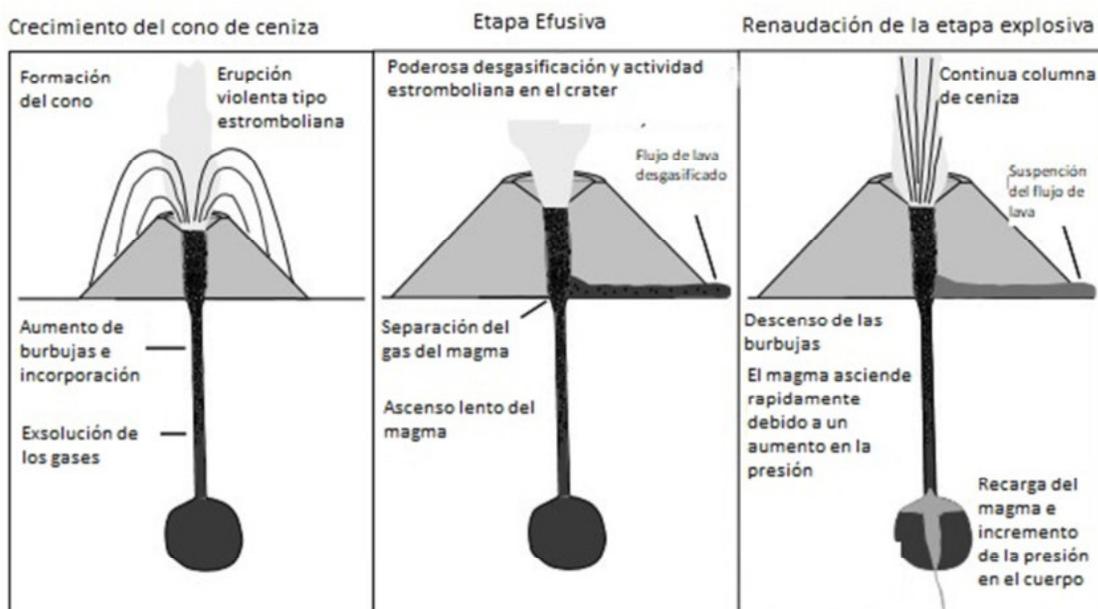


Fig. [10] En la imagen se representa las fases de la erupción del volcán Xitle, en la cual se muestra cómo fue la formación del cono volcánico, y la influencia del magma en su desarrollo (Modificada de Cervantes, 2003).

Datos de estudio paleomagnético Urrutia (1994), en flujos de lava en buen estado de conservación llevados a cabo en el campus universitario de la UNAM, sugieren que el proceso de enfriamiento intervino en el magnetismo remanente, obteniendo dos grupos, uno de inclinación somera y otro con inclinación dipolar, con lo cual no puede establecerse una estimación de la dirección del campo magnético en los remanentes del flujo de lava del Xitle. En sitios donde la inclinación no es muy pronunciada corresponde a localidades más alejadas del Xitle, en baja altitud y terreno plano, son asociadas con el magnetismo correspondiente a la inclinación somera. La principal dirección para sitios con inclinación bajas de  $30^\circ$  son los siguientes datos declinación:  $1.5^\circ$ , inclinación:  $26.7^\circ$  y en otros sitios declinación:  $35.90^\circ$  e inclinación de  $35.1^\circ$ .

Estudio en la parte noreste del pedregal (Badilla-Cruz, 1997), describe las características de la lava correspondiente a la última activada en la región. Se describen las características de las estructuras vesiculares, tubos de explosión, túmulos, crestas de presión, flujos de lava, columnas y filamentos, destacando la lava de tipo pahoehoe con una composición de olivino y piroxeno.

Alva-Valdiva, 2005 describe la magnetización de los flujos de basalto, con la composición de olivino y piroxeno, explicando que la magnetización remanente encontrada esta relación con la fase del punto de Curie en minerales pobres en Titanio-magnetita, en el cual describe las temperaturas en las que la magnetización remanente es removida.

Las últimas referencias citadas se asocian a los estudios de la Cuenca de México por medio de los datos de pozos y secciones sísmicas realizados propiedad de Pemex entre los años 1986-1987 de los cuales se citan lo siguiente:

González-Torres et al.2015, describe: *“El evento del Mioceno inferior está representado por lavas andésíticas y andesitas-basálticas con edades de 24.05 y 18.4 Ma, reportadas en los pozos Copilco-1 y Mixhuca-1, San Lorenzo Tezonco y Texcoco-1. Los eventos del Plio-Cuaternario están constituidos por lavas de composición variable desde andesita-basáltica a dacita, ignimbritas conglomeradas y brechas volcánicas procedentes de la Sierra de Chichinautzin, las cruces y nevada (Arce et al, 2013, García-Palomo et al., 2008, Macías et al., 2012); estos productos, con edades variables desde 5 a 0.5 Ma, sólo se han reportado en los pozos Copilco 1 y San Lorenzo Tezonco”*. En la figura [11] tomada del artículo de González- Torres et al.2015 el artículo plantea la estratigrafía obtenida por los pozos, describiendo las características de los seis pozos, su litología y profundidad de investigación; se observa que el basamento más antiguo en la Cuenca de México corresponde a roca caliza, la cual solo se presenta en dos pozos (Tulyehualco-1 y Mixhuca-1), el Pozo Copilco -1 tiene una profundidad de 2256 m.

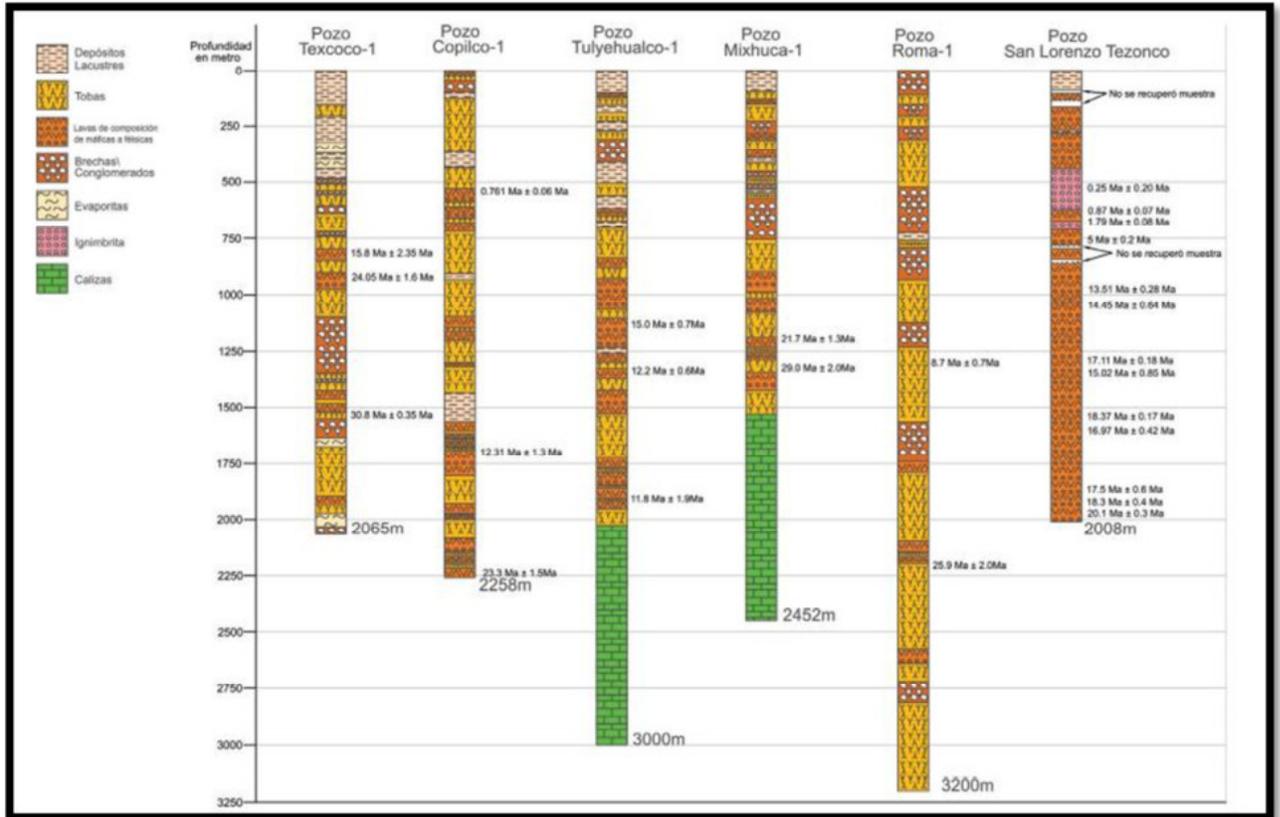


Fig. [11] En la imagen se muestra la columna estratigráfica de los pozos realizados en Ciudad de México, en nuestro estudio el de importancia es el pozo Copilco-1, con sus características geológicas. Modifica de González- Torres et al.2015

La descripción de la estratigrafía es complementada por Unda, (2016) en el cual, utilizando registros litológicos de muestras de canal, núcleos, y registros geofísicos de pozo, establece una actualización de las columnas geológicas. Además de una correlación cronoestratigráfica basada en fechamientos radiométricos, en el cual ofrece una descripción de la estratigrafía de la cuenca del Valle de México. Una última referencia de trabajo previo es el realizado por (Valdez, 2016) donde por medio de los datos de líneas sísmicas, e información de los registros de pozos como son el sónico y de densidad, pertenecientes a Petróleos Mexicanos, se realiza un análisis de las propiedades de la cuenca de México, obteniendo variaciones laterales, asociadas a discordancias y las variaciones de velocidades de las rocas.

# CAPÍTULO 3 MÉTODOS

## 3.1 INTRODUCCIÓN MÉTODO GRAVIMÉTRICO.

Para la realización del presente trabajo se utilizan dos métodos potenciales, los métodos gravimétrico y magnetométrico. Ambos detectan las variaciones en un campo particular ya sea un campo gravitacional o un campo magnético lo que nos permite obtener una interpretación de los datos obtenidos en el estudio geofísico.

A continuación, se describen algunos fundamentos de las prospecciones gravimétricas y magnetométricas, así como las correcciones que son empleadas para poder llegar o encontrar anomalías que servirán para analizar las características del lugar de estudio.

## 3.2 PROSPECCIÓN GRAVIMÉTRICA.

En el estudio gravimétrico las mediciones obtenidas están basadas en la medición del campo gravitacional terrestre; en la cual se producen variaciones ocasionadas por cambios en la densidad de los materiales, debido a un aumento o disminución de la masa, las cuales son registradas en las mediciones con un gravímetro. Con estas variaciones se encuentran irregularidades en la variación del campo gravitacional terrestre.

La unidad referida para la aceleración de la gravedad se define en el S.I. en  $m/s^2$ . Sin embargo, para trabajos gravimétricos es necesario el uso del sistema c.g.s., donde la distancia está en centímetros y la atracción gravitacional esta entonces referida a  $cm \cdot sec^{-2}$ . Las unidades del c.g.s. de la aceleración es nombrada como gal  $Gal=1cm \cdot sec^{-2}$ . La atracción gravitacional en unidades de [mGal] ( $1[mGal]=10^{-3}$ ). La conversión de c.g.s. con unidades de S.I. es  $1[mGal]=10^{-5} [m \cdot sec^{-2}]$  (Blakley, 1996).

### 3.2.1 Campo de atracción de una masa puntual

Considerando una masa puntual, la cual genera en el espacio un campo de atracción, por lo que, de la ecuación de la atracción gravitacional podemos referenciar una masa en coordenadas cartesianas, describiendo los centros de masas en este caso  $Q=(x', y', z')$  para  $m_1$  y  $m_2$  en  $P=(x, y, z)$ .

Donde la distancia entre estos está dada por la ecuación

$$r = [(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2]^{1/2} \quad (2.1)$$

Haciendo que la masa  $m_2$  tenga una magnitud unitaria, y dividiendo la expresión entre  $m_2$ , nos quedara el efecto de la atracción de la gravedad respecto a la masa  $m_1$ , dando como resultado la siguiente expresión:

$$g(P) = -\gamma \frac{m}{r^2} \hat{r} \quad (2.2)$$

Donde  $r$  el vector unitario dirigido a la masa en observación en el punto  $P$ , en sentido opuesto a la atracción gravitacional.

$$r = [(x-x')^2 \hat{i} + (y-y')^2 \hat{j} + (z-z')^2 \hat{k}]^{1/2} \quad (2.3)$$

La atracción gravitacional se define como un campo irrotacional, debido a que se cumple que el rotacional es igual a cero:

$$\nabla \times g = 0 \quad (2.4)$$

Para demostrar que la aceleración gravitacional es un campo conservativo, se utiliza el teorema de Helmholtz, y se representa como el gradiente de un escalar potencial:

$$g(P) = \nabla U(P) \quad (2.5)$$

Dónde: 
$$U(P) = \gamma \frac{m}{r} \quad (2.6)$$

La función  $U$  es llamada el potencial gravitacional o potencial Newtoniano, y la aceleración gravitacional  $g$  es el campo potencial (Blakley, 1996).

El potencial gravitacional se define como la contribución de las masas individuales que forman un cuerpo, las cuales generan un campo gravitacional, la cual contribuyen a la atracción de un cuerpo. Si para un cuerpo de masa  $m$  tomamos una diferencial de masa, la podemos representar de la siguiente forma:

$$dm = \rho(x, y, z) dv \quad (2.7)$$

Donde  $\rho(x, y, z)$  es la distribución de la densidad y  $dv$  es la diferencial de volumen de cuerpo en cuestión. Definida la diferencial de masa podemos integrar el potencial con respecto al volumen y aplicando el principio de superposición, obtenemos la siguiente expresión:

$$U(P) = \gamma \int_v \frac{dm}{r} \quad (2.8)$$

De la ecuación anterior, para un punto de observación  $P$  y un punto de integración  $Q$ , resultara la siguiente expresión:

$$U(P) = \gamma \int_v \frac{\rho(Q)}{r} dv \quad (2.9)$$

Integrando en el volumen que ocupa la masa. Siendo  $r$  la distancia respecto a los puntos  $P$  y  $Q$ .

De la cual podemos aplicar la derivación de sus componentes respecto a  $x, y, z$  con lo cual se llegará, al gradiente del potencial gravitacional para la atracción de cualquier distribución de masa es igual a:

$$g(P) = \nabla U(P) \quad (2.10)$$

$$g(P) = -\gamma \int_v \rho(Q) \frac{r}{r^2} dv \quad (2.11)$$

Realizando las derivadas de segundo orden para cada uno de sus componentes nos dará como resultado que el laplaciano del potencial gravitacional es igual a cero:

$$\nabla^2 U(P) = 0 \quad (2.12)$$

Del teorema de Helmholtz sabemos que la gravedad  $g = \nabla U$  la cual desaparece cuando tiende al infinito:

$$U = \frac{1}{4\pi} \int \frac{\nabla \cdot g}{r} dv \quad (2.13)$$

Llegando a la ecuación de Poisson:

$$\nabla^2 U(P) = -4\pi\gamma\rho(P) \quad (2.14)$$

Donde la ecuación de Laplace es un caso especial de la ecuación de Poisson, válida para la región libre de masa en el espacio (Blakely, 1996).

### 3.2.2 Esferoide de referencia.

El esferoide de referencia se define como un elipsoide imaginario, su desarrollo fue realizado para medir la longitud de arco de los grados a diferentes latitudes. El esferoide internacional de referencia es la estandarización de la forma de la Tierra. Debido a las fuerzas de la gravedad y la rotación que actúan en la superficie terrestre hacen que la forma de la Tierra sea parecida a un elipsoide de revolución como se observa en la fig. [12]; el cual está descrito por los parámetros del aplanamiento terrestre que son el radio ecuatorial  $a$  y el radio polar  $c$ :

$$f = \frac{a-c}{c} \quad (2.15)$$

El valor teórico de la gravedad en el elipsoide con su rotación puede ser calculada al aplicar la diferenciación del potencial gravitacional. De esta manera las componentes radial y transversa de la gravedad que son combinados para obtener la fórmula de la gravedad normal al elipsoide.

$$g_n = g_e(1 + \beta_1 \text{sen}^2 \lambda + \beta_2 \text{sen}^2 2\lambda) \quad (2.16)$$

La cual es conocida como la fórmula de la gravedad normal, donde las constantes, definidas en 1980 para el sistema geodésico de referencia (GRS80), son:  $g_e=9.780327 \text{ m s}^{-2}$ ;  $\beta_1=5.30244 \times 10^{-3}$ ;  $\beta_2=-5.8 \times 10^{-6}$ . Esto nos permite el cálculo de la gravedad normal en cualquier latitud con una precisión de 0.1 mgal. La fórmula de la gravedad normal es importante en el análisis de las mediciones de gravedad en la Tierra, debido a que da la variación teórica de la gravedad normal ( $g_n$ ) (Lowrie, 2007).

La primera referencia establecida internacionalmente fue en 1930, por la fórmula de la gravedad internacional:

$$g_0 = 9.78049(1 + 0.0052884 \text{sen}^2 \lambda - 0.0000059 \text{sen}^2 2\lambda) \quad (2.17)$$

Posteriormente en 1967 fue adoptado el sistema geodésico de referencia 1967 dando los siguientes datos:

$$g_0 = 9.78031846(2 + 0.0053024 \text{sen}^2 \lambda - 0.0000058 \text{sen}^2 2\lambda) \quad (2.18)$$

Recientemente IAG ha adoptado el Sistema Geodésico de Referencia en 1980, lo cual nos lleva al actual campo de referencia World Geodetic System 1984, dado por:

$$g_0 = 9.7803267714 \frac{1+0.00193185138639 \text{sen}^2 \lambda}{\sqrt{1-0.00669437999013 \text{sen}^2 \lambda}} \quad (2.19)$$

Es común referida a la gravedad teórica o gravedad normal (Blakely, 1996)

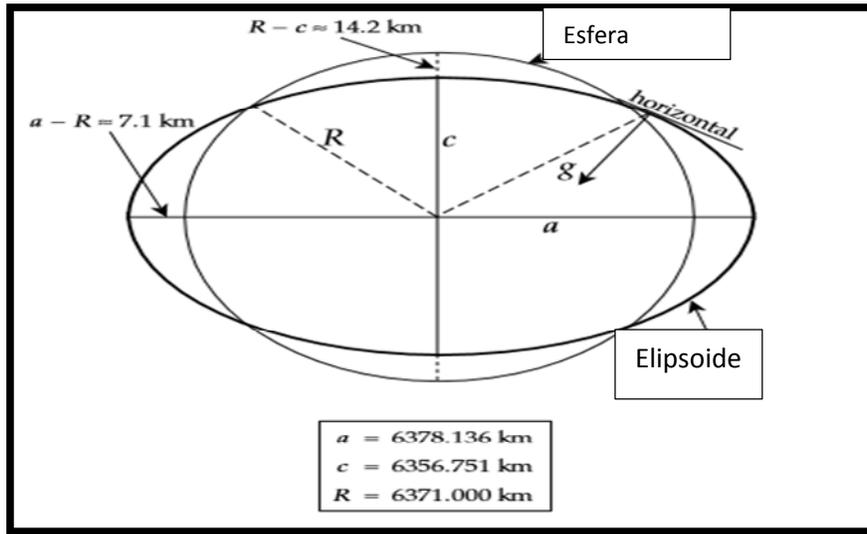


Fig. [12] En la figura se muestra la representación de una esfera y el esferoide que representa a la Tierra, definiendo el radio ecuatorial  $a$ , el radio polar  $c$  y el radio terrestre  $R$  (Modificada de Lowrie 2007).

### 3.2.3 Geoide.

Al definir el esferoide de referencia se mencionó que la forma de la Tierra no es esférica, esto debido a variaciones en la topografía terrestre; siendo estas variaciones, las elevaciones como las montañas, así como depresiones en el fondo marino. Por lo que se definió una superficie equipotencial. El nivel del mar fue entonces designado como la superficie equipotencial, sin incluir las variaciones que pueda sufrir debido a las corrientes oceánicas, mareas y perturbaciones debido al clima, la cual refleja la distribución de la masa Terrestre.

La forma del geoide está influenciada por las variaciones de masa o deficiencia (elevaciones o depresiones).

En los continentes el geoide está afectado por la masa de la Tierra que se encuentran sobre el nivel del mar. Al ser el geoide una superficie equipotencial, la fuerza de gravedad en cualquier lugar es perpendicular a la superficie donde se define una vertical y un nivel de cada punto dentro del geoide.

## 3.3 *CORRECCIONES GRAVIMÉTRICAS.*

Cuando son tomadas las mediciones con el gravímetro, en las lecturas pueden registrar un valor en el cual intervienen el efecto de varias masas, por lo que es necesario quitar los efectos que enmascaran la anomalía de interés. Esto requiere una serie de correcciones para quitar los datos que puedan afectar las anomalías. Las anomalías gravimétricas que se pueden obtener son las de aire libre y la anomalía de Bouguer. A continuación, se describirán, las características de cada una de las correcciones correspondientes:

### 3.3.1 Corrección por deriva.

La corrección por deriva instrumental está basada en lecturas repetidas en una estación base la cual es registrada varias veces en el día. Las lecturas se grafican contra del tiempo y la deriva es asumida para ser lineal entre las lecturas consecutivas de la base. La corrección por deriva en un tiempo  $t$  es  $d$ , la cual es sustraída del valor observado, como lo muestra la figura [13]. Después de la corrección por deriva la diferencia en la gravedad entre un punto de observación y la base es encontrada por la multiplicación de las diferencias de las medidas por el factor de calibración del gravímetro (Kearey, et al. 2002).

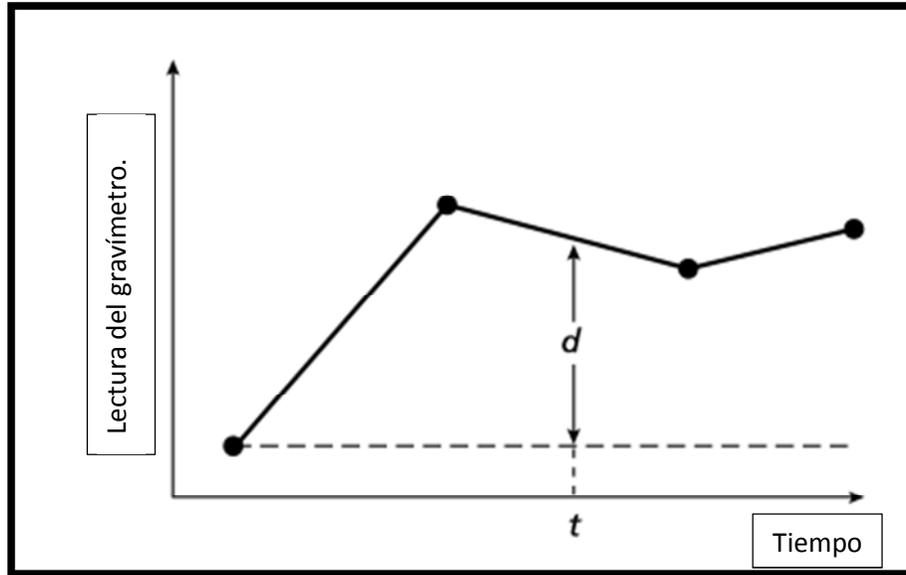


Fig. [13] En la figura se presenta la gráfica de lectura del gravímetro vs tiempo, la curva de deriva gravimétrica es construida de lecturas repetidas en una ubicación fija. La corrección de la deriva que se debe restar a una lectura tomada en un tiempo  $t$  es  $d$ . (Kearey et al. 2002).

Con la siguiente expresión podemos corregir los datos por efecto de deriva instrumental. Para finalmente sustraer el factor de corrección por deriva de la lectura registrada.

$$G_{\text{deriva}} = [(G_f - G_i) * \frac{T_{\text{obs}} - T_i}{T_f - T_i}] \quad (2.20)$$

$G_{\text{deriva}}$  = Factor de corrección de deriva.

$G_f$  = Valor de la lectura al final del levantamiento.

$G_i$  = Valor de la lectura al inicio del levantamiento.

$T_{\text{obs}}$  = Hora en el momento que se registró la lectura.

$T_f$  = Hora que se registró al final del levantamiento en la estación base.

$T_i$  = Hora que se registró al inicio del levantamiento en la estación base.

### 3.3.2 Corrección por marea.

Los instrumentos para medir la gravedad poseen una precisión fina para registrar los cambios en la gravedad causada por el movimiento del sol y la luna, dependiendo de la altitud y el tiempo. Su rango es cercano de 0.3 mgal. La corrección puede ser calculada al conocer las localizaciones del Sol y la Luna. Sin embargo, la variación es relativamente lenta. Antes de realizar la corrección por deriva, se recomienda hacer la corrección por marea terrestre. Las oscilaciones son las más largas en lunas nuevas y Luna llena. Las mareas terrestres son predecibles, pueden ser calculadas usando un programa de cálculo. Las lecturas obtenidas pueden ser convertidas en unidades de gravedad antes de ser aplicadas (Milson, 2003).

Para la corrección por marea, primero se generan mareas sintéticas con ayuda del programa TSOFT®. Para generar la marea se necesita ingresar el día en que se realizó el levantamiento, la hora inicial y final tomando en cuenta el periodo en el que hizo el levantamiento, para posteriormente indicar el intervalo de tiempo que se requiere para genera la marea, ya sea por minuto o por segundo. Las unidades de marea son  $[\text{nm}/\text{s}^2]$  por lo que tenemos que hacer la conversión a mgal, simplemente dividiendo el valor resultante por 10000. En la figura [14] se presenta el resultado del procedimiento mencionado en el programa TSOFT® donde se plantea la representación de la marea, debido al movimiento de la Luna en un lapso estimado de tiempo.

Para realizar la corrección se realiza la resta del valor del levantamiento en mgal y el valor que se generó en la marea en el tiempo correspondiente de la lectura.

$$\text{Corrección por Marea} = \text{Lectura corregida por deriva } (t) [\text{mgal}] - \text{Marea } (t) [\text{mgal}] \quad (2.21)$$

### 3.3.3 Corrección por latitud.

Como se mencionó previamente se han realizado aproximaciones teóricas para poder describir la forma de la Tierra. La que más se ajusta es una que corresponde a un elipsoide con el eje radial mayor en el Ecuador y un aplanamiento en el eje polar (Telford et al., 1996).

Con base al elipsoide se pudo deducir la ecuación de la gravedad normal que toma como nivel de referencia el nivel de mar en función de la latitud en que se realice el estudio. En la gravedad normal queda contemplado la rotación de la Tierra, la cual produce una aceleración gravitacional y la forma de la Tierra, esto es un abultamiento en el Ecuador y un aplanamiento en el eje polar, debido a esto aumenta la gravedad conforme se está más cerca de la masa terrestre. Este efecto se contrarresta en parte por el aumento de la masa que atrae en la parte del Ecuador.

El procedimiento para realizar la corrección por latitud es realizar la sustracción de la gravedad normal, la cual es obtenida de la formula internacional de la gravedad, menos la gravedad observada o gravedad absoluta.

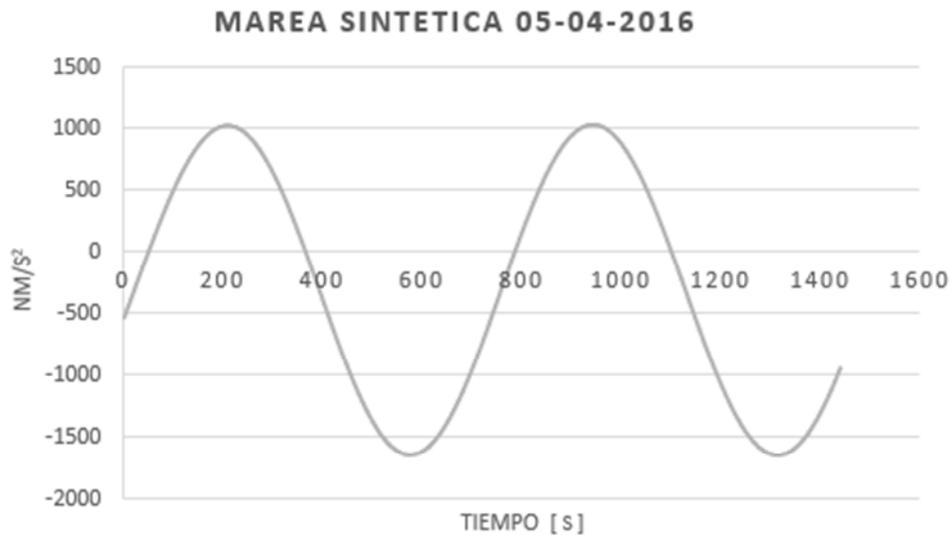


Fig. [14] Representación de la marea sintética creada por el software Tsoft, donde se presenta un cambio de variación entre el lapso de 00:00 hrs a 14:00 hrs, se observa un descenso entre las 04:00 hrs y 08:00 hrs, al tener unidades  $\text{nm/s}^2$  se deben convertir a mGal.

Factor de corrección.

$$G_L = \Delta s * 0.811 * \text{sen}(2\varphi) \left[ \frac{\text{mGal}}{\text{Km}} \right] \quad (2.22)$$

$\Delta s$ = Distancia Horizontal N-S entre la base y la estación =  $R_e * \Delta \varphi$

$R_e$ = Radio de la Tierra =6371[km]

$\varphi$ = Latitud en grados en la estación.

Este factor de la corrección se suma a las lecturas de campo. La corrección es adicionada a  $g$  si nos movemos hacia el Ecuador. En un estudio con una latitud local, las correcciones se realizan seleccionando una base arbitraria, usando el gradiente teórico ubicado en dirección Norte-Sur (Milsom, 2003). Debido a que la gravedad decae hacia los polos, la corrección para estaciones cercanas al polo y la estación base deben ser adicionadas a la medición de gravedad (Lowrie W., 2007).

### 3.3.4 Corrección por aire libre.

Esta corrección es el resultado de reducir el valor de la gravedad observada al nivel del mar, corrigiendo por elevación y sin considerar el efecto de la topografía y la masa que existe entre la estación gravimétrica y el nivel del mar. Esta corrección se basa en el decremento de la aceleración gravitacional con la distancia al centro de la Tierra.

La gravedad varía inversamente con el cuadrado de la distancia, por lo que es necesario corregir por cambios en la elevación entre las estaciones que reducen las lecturas leídas del datum de la superficie. La corrección de aire libre no toma en cuenta el material entre la estación y el plano del datum (Telford, 1996).

Esta corrección se obtiene derivando la ecuación escalar

$$\frac{\partial g}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left( -G \frac{E}{r^2} \right) = +2G \frac{E}{r^3} = \frac{2}{r} g \quad (2.21)$$

Del cual da como resultado el factor de corrección 0.03086 mgal/m el cual debe ser multiplicado por la altura para obtener la corrección de aire libre

$$= 0.3086 * (h) \text{ mgal/m}$$

Donde h es la altura sobre el nivel del mar

### 3.3.5 Corrección de Bouguer.

La corrección de Bouguer es complementaria a la corrección de aire libre. Para la cual se define una placa plana sobre la superficie equipotencial, esto debido que la masa topográfica es irregular.

Debido a que la masa topográfica es irregular es necesario asumir que la topografía sobre la superficie equipotencial es plana. Al realizar esta aproximación la placa se extiende hasta el infinito en todas direcciones con una densidad constante, y un espesor equivalente en toda la placa. Por lo que la corrección de Bouguer remueve el efecto de la unidad de roca debajo del punto de observación.

La corrección toma en cuenta la atracción del material entre la estación y el plano del datum que fue ignorada en los cálculos de aire libre. La corrección de Bouguer está dada por:

$$\Delta g_b / \Delta R = 2\pi\gamma\rho = 0.04192\rho \text{ [mGal/m]} \quad (2.23)$$

Es aplicada en sentido opuesto a la corrección de aire libre, esto es, se resta cuando la estación esta sobre el datum y viceversa (Telford, 1996). En estudios terrestres la corrección de

Bouguer debe ser sustraída, así como la atracción gravitacional de la roca entre los puntos de observación y el datum debe ser removido del valor de la gravedad observada. El efecto de Bouguer es positivo y la corrección es sin embargo negativa. Esto debido a que estamos reduciendo al nivel del mar este valor y habría que restarlo de la gravedad observada.

### 3.3.6 Corrección topográfica.

La corrección topográfica es un complemento a la corrección de Bouguer. Esto es debido a que en la corrección de Bouguer se definió una placa infinita sobre la superficie equipotencial, lo cual es una generalización, puesto que existen ondulaciones topográficas (colinas y valles) las cuales afectan las mediciones de gravedad y hasta el momento no han sido tomadas en cuenta, por lo que en la corrección topográfica consiste en el ajuste de la placa infinita al relieve topográfico, con lo que se toma en consideración el efecto gravimétrico de la masa por encima y por lo alejado del nivel de la estación.

Para realizar esta corrección se emplean gráficos que consisten en una serie de círculos concéntricos alrededor de la estación y divididos en sectores. Con ayuda de unas tablas calculadas por Hammer se hallan los efectos gravimétricos debidos a cada uno de los prismas que tienen de base estos sectores y su altura media de la zona en que se encuentra. Para las zonas próximas a la estación se suele hacer una nivelación precisa del terreno mientras para las zonas más alejadas se puede emplear la altimetría de un mapa topográfico a escala 1/50 000.

Esto se puede realizar por compartimientos marcados en un papel transparente que subyace en un mapa topográfico. El procedimiento debe ser repetido para cada estación gravimétrica. El efecto que es más importante corresponde de la topografía cercana a la estación. Cuando se encuentran colinas sobre la elevación de la estación producen cambios positivos en el gravímetro, mientras que si se encuentra por debajo (como valles) de la estación produce cambios negativos. La corrección de terreno es generalmente necesario si la diferencia topográfica con los sectores es más del 5% de la distancia de la estación. (Lowrie W., 2007).

### 3.3.7 Densidades de las rocas.

Las anomalías gravimétricas resultan de la diferencia de la densidad, el contraste de densidad, entre un cuerpo de roca en sus alrededores. Para un cuerpo de densidad  $\rho_1$  incrustados en la densidad del material  $\rho_2$ , el contraste de densidad es  $\Delta\rho$  está dada por:

$$\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2 \quad (2.24)$$

Dependiendo del signo del resultado con la formula (2.24), se determinará el signo de la anomalía. Al analizar la densidad de la roca, se puede definir que tiene dependencia de su

composición y porosidad minera. Las rocas que están compuestas por una porosidad menor pueden destacarse las rocas ígneas y metamórficas donde su composición es el principal factor de variación en los datos correspondientes a la densidad. En los tipos de rocas ígneas la densidad esta generalmente ligada a la variación de la acidez de la roca llegando a las rocas básicas y ultra-básicas. Conocer la densidad de las rocas para un estudio gravimétrico es fundamental para la aplicación de correcciones de Bouguer, así como para la interpretación de las anomalías gravimétricas.

En la Tabla 1 se presenta un rango de densidades de rocas sedimentarias e ígneas, donde se reporta el rango de densidades para cada roca así también el promedio de la roca.

	Rango reportado de densidades ( $g\ cm^{-3}$ )	Reportado o estimado promedio de densidades ( $g\ cm^{-3}$ )
<b>Rocas Sedimentarias</b>	0.45 – 1.18	(0.815)
<b>Diatomita</b>	1.53 – 2.60	2.01
<b>Tiza</b>	1.2 – 2.6	2.21
<b>Arcilla</b>	2.0 – 2.6	(2.3)
<b>Marga</b>	1.61 - 2.8	2.32,2.35,2.50
<b>Esquisto</b>	1.57 - 3.20	2.45
<b>Limonita</b>	1.55 - 2.9	2.50,2.54,2.55
<b>Rocas Igneas</b>		
<b>Diorita</b>	2.721 - 3.0	2.9
<b>Basalto</b>	2.7 – 3.3	2.90,2.99
<b>Gabro</b>	2.7 – 3.5	3.03
<b>Peridotita</b>	3.1 – 3.4	3.37
<b>Piroxenita</b>	3.10 – 3.318	3.209

Tabla 1 En la tabla se presenta las un rango de densidades y el promedio para rocas sedimentarias e ígneas (Modificada de Phillips, JD)

### 3.3.8 Anomalía de Bouguer y Anomalía de Aire

La anomalía puede ser atribuida por un gran número de fuentes posibles, como pueden ser una esfera de masa constante y diferente densidad. Por lo que la interpretación de una anomalía en un estudio puede ser causada por un gran número de cuerpos que puede ser relacionada a una anomalía específica. La interpretación de las fuentes se puede realizar con la obtención de las anomalías de aire libre y Bouguer, a continuación, se da una pequeña descripción.

### 3.3.8.1 Anomalía de aire libre

Se le denomina anomalía de aire libre, porque de manera teórica, se calcula como si la medición de la gravedad se realizara a la elevación de la estación sin tomar en cuenta la atracción del material existente y el nivel de referencia, como si el gravímetro estuviera en el aire. La anomalía de aire libre  $\Delta g_F$  es definida al aplicar solamente la corrección de aire libre, la corrección por latitud y la medición de la gravedad.

$$\Delta g_F = g_{\text{obs}} - g_{\text{teo}} + \Delta g_{\text{fa}} + \Delta g_L \quad (2.25)$$

Donde  $\Delta g_F$  = Anomalía de aire libre,  $g_{\text{obs}}$  = gravedad observada,  $\Delta g_{\text{fa}}$  = corrección aire libre,  $g_{\text{teo}}$  = gravedad teórica,  $\Delta g_L$  = corrección por latitud.

### 3.3.8.2 Anomalía de Bouguer

Para definir la anomalía de Bouguer, a la gravedad observada se la aplican todas las correcciones anteriormente definidas, lo cual queda referido en la siguiente expresión:

La anomalía de Bouguer ( $\Delta g_B$ )

$$\Delta g_B = g_m + (\Delta g_{\text{Fa}} - \Delta g_{\text{BP}} + \Delta g_{\text{Tide}} + \Delta g_L) - g_n \quad (2.26)$$

En esta fórmula  $g_m$  y  $g_n$  son la gravedad medida y los valores de la gravedad normal, la corrección en paréntesis es la corrección de aire libre ( $\Delta g_{\text{FA}}$ ), la corrección de Bouguer ( $\Delta g_{\text{BP}}$ ),  $\Delta g_L$  = corrección y la corrección por marea ( $\Delta g_{\text{tide}}$ ).

Si a la anomalía de Bouguer se le suma la corrección por terreno  $\Delta g_T$  se obtiene la anomalía de Bouguer completa. Esta anomalía refleja las masas anómalas, las cuales pueden estar con densidad arriba o debajo de la densidad de referencia.

$$\Delta g_B = g_m + (\Delta g_{\text{Fa}} - \Delta g_{\text{BP}} + \Delta g_T + \Delta g_{\text{Tide}} + \Delta g_L) - g_n \quad (2.27)$$

## 3.4 PROSPECCIÓN MAGNÉTICA

### 3.4.1 Introducción

El segundo método potencial utilizado, es la prospección magnetométrica. En la cual el parámetro medido son las variaciones espaciales del valor del campo geomagnético terrestre, la propiedad física utilizada es la susceptibilidad magnética de las rocas y la remanencia que se encuentra en ellas. A continuación, se describen algunos fundamentos asociados al estudio de la prospección magnetométrica.

Ley de Coulomb describe la fuerza magnética que existe entre dos polos  $m_0$  y  $m_1$  separados por una distancia  $r$

$$F = \frac{m_0 m_1}{\mu r^2} \quad (2.28)$$

Donde  $\mu$  es conocida como la permeabilidad que depende del medio en donde los polos están ubicados. Si los polos son del mismo signo entonces la fuerza obtenida será de repulsión. Si los polos son del signo contrario entonces la fuerza será de atracción. Otra característica que es importante es la intensidad del campo magnético  $H$ , la fuerza que experimenta un polo magnético de carga positiva de valor unitario

$$H = \frac{m}{r^2} r \quad (2.29)$$

Donde el vector  $r$ , es el vector de posición del punto en el espacio donde se ubica el polo de origen de campo, si se trata de un polo positivo, los vectores de campo son divergentes, y si es negativo, es convergente.

### 3.4.2 Momento magnético.

Debido a que en el magnetismo los polos no se encuentran libres, sino asociados en forma de dipolos, se tiene que definir como un momento magnético, definida en la siguiente expresión:

$$M = mr \quad (2.30)$$

Donde  $r$  el vector de posición del polo magnético positivo respecto al polo negativo. Además, un dipolo elemental tendrá un momento magnético, también elemental

$$M = mdl = mdr \quad (2.31)$$

Siendo  $r$  el vector de posición del polo magnético positivo respecto al negativo y  $l$  distancia entre polos (Cantos, 1987).

### 3.4.3 Intensidad de magnetización.

La intensidad de la magnetización inducida está definida de la siguiente manera:

$$J = \frac{M}{v} \quad (2.32)$$

Donde  $M$  es el momento magnético elemental, y  $v$  el volumen donde se encuentra. Por lo que se puede definir como el momento magnético por unidad de volumen.

### 3.4.4 Susceptibilidad magnética.

Cuando un cuerpo se somete a un campo magnético  $H$ , este presenta una magnetización, donde adquiere una intensidad de imantación  $J$  que es proporcional al campo exterior aplicado:

$$J = kH \quad (2.33)$$

Siendo  $K$  la susceptibilidad magnética la cual es una constante de proporcionalidad. Los materiales pueden ser clasificados magnéticamente según el valor de la susceptibilidad magnética en: Diamagnetismo, Paramagnetismo y Ferromagnetismo.

### 3.4.5 Potencial magnético.

Para expresar el potencial del campo geomagnético se puede utilizar una serie infinita de términos en coordenadas esféricas polares. Este método divide el campo en diferentes componentes separados que disminuyen a diferentes radios, con el incremento de la distancia del centro de la Tierra. En la prospección magnética medimos  $B$  en aproximadamente  $10^{-4}$  que es el campo principal de la Tierra (aprox.  $50 \mu T$ ).

La unidad para la inducción magnética usada generalmente en trabajos de geofísica es el nanotesla (también llamado gamma  $\gamma$ ).

$$1[\gamma] = 10^{-9}[T] = 1[nT] \quad (2.34)$$

### 3.4.6 Elementos del campo geomagnético.

El campo magnético terrestre puede ser representado como un vector, con magnitud y orientación, donde las componentes de la intensidad del campo magnético ( $B$ ,  $H$ ,  $D$ ) son representadas en coordenadas cartesianas ortogonales, la componente  $X$  se orienta en dirección Norte, la coordenada  $Y$  en dirección Este y  $Z$  sobre la vertical (Telford, 1976). Esta representación se muestra en la figura [15], donde la dirección del campo está definida por los ángulos formados entre el campo geomagnético ( $B$ ) y la componente horizontal ( $H$ ) obteniendo el ángulo de inclinación magnética ( $I$ ) y el segundo ángulo entre la componente horizontal ( $H$ ) y el Norte geográfico obteniendo el ángulo de declinación magnética ( $D$ ). A continuación, se presenta la representación matemática para las componentes que forman al campo magnético.

La intensidad de la componente horizontal por lo tanto es:

$$H = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \quad (2.35)$$

El Vector de intensidad total está descrito por:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (2.36)$$

La inclinación es la relación entre el vector y el plano horizontal es:

$$I = \arctan \frac{B_z}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2}} \quad (2.37)$$

La declinación magnética está dada por:

$$D = \arcsen \frac{B_y}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2}} \quad (2.38)$$

Cuando la inclinación tiene un valor de cero grados, es definida como el Ecuador magnético, ocurriendo en las proximidades del Ecuador geográfico, al Norte del Ecuador se le atribuye el nombre de latitud magnética Norte donde entran las líneas del campo y en la parte Sur del Ecuador donde salen las líneas de campo se denomina latitud magnética sur. Los polos magnéticos son los lugares donde el campo magnético es vertical y la inclinación es de  $90^\circ$  en el polo magnético Norte y  $-90^\circ$  en el polo magnético Sur. La declinación magnética se considera como la diferencia entre el Norte geográfico y el Norte magnético

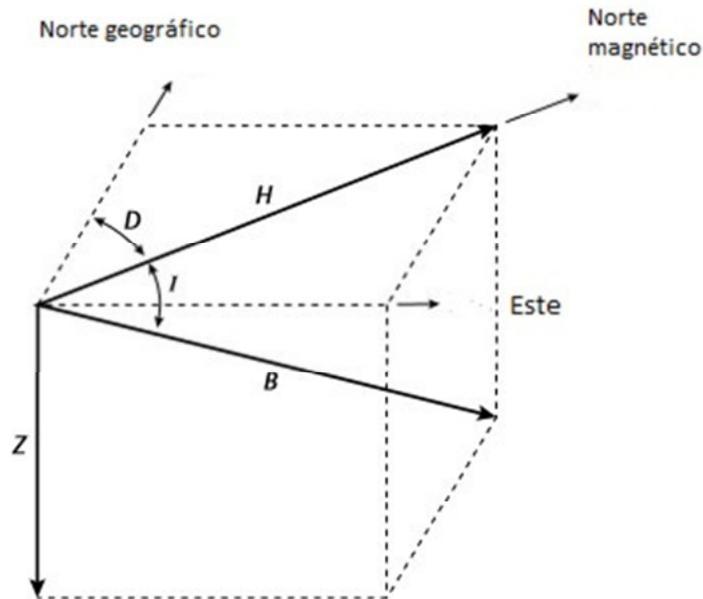


Fig. [15] Elemento del campo geomagnético. Donde los ejes están orientada z profundidad, x en la dirección del Norte geográfico y el eje y en dirección Este. El campo está definido por los ángulos de inclinación (I) y declinación (D). (Modificada de Kearey, 2002)

### 3.5 CORRECCIONES MAGNÉTICAS

Para su estudio el campo geomagnético Terrestre, puede establecerse tres partes que involucran al campo:

1. El campo principal, varía de manera relativamente lenta y es de origen interno.
2. Un pequeño campo (en comparación con el campo principal), que varía con bastante rapidez y se origina fuera de la Tierra.
3. Las variaciones espaciales suelen ser más pequeñas que el campo principal, son casi constantes en tiempo y lugar, causadas por anomalías magnéticas locales en la corteza cerca de la superficie de la Tierra como son las variaciones diurnas y seculares.

Debido a esta clasificación es necesario realizar una serie de correcciones, donde el cambio de la intensidad magnética terrestre es de forma lenta e irregular respecto a la dirección del lugar de medición. Estas variaciones están registradas en observatorios magnéticos, donde se acentúan pequeños cambios en la magnitud del campo. Las causas se clasifican en variaciones seculares, diurnas y tormentas magnéticas.

I. Variación secular: Las variaciones seculares del campo están relacionadas con la geodinámica del núcleo terrestre que ocurre en largos periodos de tiempo décadas o siglos. Las variaciones seculares no pueden ser predecibles a comparación de las variaciones diurnas. Se producen en el campo magnético Terrestre y mediante registros continuos de las componentes del campo en observatorios magnéticos a lo largo de un periodo de años, donde se determina la variación media de cada componente, se obtiene el valor calculado que se denomina variación secular (Telford, 1976).

II. Variación diurna: Es de gran importancia en prospección geofísica debido a que son las oscilaciones, menores, pero más rápidas, que tienen un periodo de aproximadamente 24 horas y una amplitud más de 60[nT] (Telford & Sheriff, 1990). Como ocurren en los datos gravimétricos, el campo geomagnético presenta variaciones temporales y espaciales, es decir, al tomar una lectura de campo magnético en un punto sobre la superficie de la Tierra, esta lectura podrá ser representada como la superposición de diversas fuentes que generan una contribución al campo geomagnético. Divididas en solares y lunares, en las que las variaciones solares tienen un periodo de 24 horas en la cual hay una mayor amplitud durante el día y en verano mayor que en invierno.

Para realizar esta corrección es necesario una base con un magnetómetro que tome mediciones periódicas se recomienda tomar las lecturas en intervalos dependiendo de la duración del estudio, en caso de no tener un magnetómetro extra para una base se puede tomar los datos del observatorio magnético más cercano que se encuentre dentro de la red de Intermagnet. El factor de variación diurna se realiza de la siguiente forma:

Se comienza con un ajuste por mínimos cuadrados para obtener la tendencia del comportamiento de los datos de campo magnético registrados en la base o si es el caso los valores de campo registrados por el observatorio que se eligió para los días en que se realizó el levantamiento. Obteniendo la diferencia en los valores de los datos de campo magnético observado en la base y los valores de ajuste del modelo lineal de los datos de la base. Esta diferencia es sustraída de los datos obtenidos en campo. Dónde:

$$VD = \text{Valor de Campo Magnético en la Base} - \text{Valor Regresión Lineal [nT]} \quad (2.39)$$

$$VD = \text{Variación Diurna}$$

$$F = mt + b \quad \text{Regresión Lineal de los datos de la Base} \quad (2.40)$$

$m =$  pendiente de la recta,  $t =$  Hora de la lectura en segundos,  $b =$  ordenada al origen

Finalmente, la corrección por variación diurna es:

$$B_{VD} = \text{Valor de Campo Magnético registrado} - VD \text{ [nT]} \quad (2.41)$$

III. Tormentas magnéticas: Originadas por ráfagas de partículas cargadas provenientes del Sol, como resultado de explosiones en la superficie solar. Este tipo de variaciones son consideradas como tormentas magnéticas y su duración suele ser corta, estas tormentas están relacionadas con la actividad de manchas solares, las tormentas afectan la toma de mediciones y con lo cual es necesario suspender la obtención de datos, al no poder corregir los datos.

IV. Por latitud o IGRF: El Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF) es la representación matemática del campo geomagnético. Consiste en una expresión matemática representada por los coeficientes de Gauss hasta el grado de orden 10, ya que estos representan en gran parte el campo producido por el núcleo terrestre (Blakely, 1996). Dado que el campo cambia con el tiempo, el IGRF se actualiza en periodos de 5 años, llamados épocas, de esta forma se predice el campo, asumiendo que los coeficientes de Gauss cambian linealmente, pero cada coeficiente tiene un término que es la derivada y con el tiempo mayor a 5 años, esta predicción se considera inexacta.

Esta corrección remueve el efecto del campo geomagnético principal. El método más riguroso para realizarla es el uso del Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF por sus siglas en inglés), el cual expresa el campo geomagnético en términos de un gran número de armónicos, e incluyen términos temporales para corregir la variación secular. La complejidad del IGRF, hace necesario el empleo de una computadora para realizar los cálculos. El IGRF predice los valores del campo, extrapolando ascendentemente los armónicos esféricos derivados de los datos de un observatorio.

La corrección por este efecto es la siguiente:

$$B = B_{VD} - IGRF \text{ [nT]} \quad (2.42)$$

Dónde:

B= Es la anomalía de campo magnético total en [nT]

$B_{VD}$ = Corrección del campo magnético por variación diurna en nanotesla. [nT]

IGRF= Valor de Campo Geomagnético Internacional de Referencia, se puede obtener a través del portal <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#igrfwmm> , siendo necesario ingresar las coordenadas, elevación y fecha en la que se realizó el levantamiento.

### 3.5.1 Anomalía Magnética

La anomalía magnética puede ser definida como la diferencia entre el valor medido del campo magnético en un punto y el valor teórico del campo magnético en el mismo punto.

Las correcciones a los datos magnéticos antes mencionadas son necesarias para obtener el valor de la anomalía magnética y producir el mapa magnético correspondiente. Siendo que, al valor observado, es necesario restar la corrección por variación diurna y la corrección por IGRF, dando como resultado la siguiente expresión:

$$\Delta F = F_{obs} - F_{igrf} - \delta F \quad (2.43)$$

Dónde:  $\Delta F$ =Anomalía Magnetométrica,  $F_{obs}$ = El valor observado,  $F_{IGRF}$ = El valor del IGRF,  $\delta F$ = Corrección por variación diurna.

La forma de las anomalías dependerá de la geometría del cuerpo en el subsuelo, la dirección del campo magnético de la Tierra, de la dirección e intensidad de los cuerpos con magnetización remanente y de la dirección de observación con respecto al campo de la Tierra (Sheriff, 2001).

## 3.6 PROCESAMIENTO DE ANOMALIAS

Al obtener las anomalías, el procedimiento siguiente es la aplicación de filtros para los datos obtenidos. Los filtros y técnicas de interpretación en algunos casos pueden ser aplicados para datos gravimétricos y magnéticos, así pues, el propósito de los filtros varía dependiendo del objetivo trazado, además de mejorar y obtener alguna información en específico. A continuación, se describen el filtrado aplicado a los datos magnéticos y gravimétricos:

### 3.6.1 Reducción al Polo (RTP)

En la anomalía gravimétrica, su forma depende de la fuente que la produce al ser un campo monopolar. En el caso del campo magnético, su origen es de un campo dipolar, y la anomalía puede variar debido a la inclinación y la declinación magnética y su orientación del cuerpo que la produce.

El comportamiento del campo geomagnético en los polos magnéticos es parecido a un vector vertical al campo. Debido a esto, en la reducción al polo, se transforma el comportamiento de las anomalías a un vector vertical semejante al de los polos la cual sitúa las fuentes directamente sobre las fuentes facilitando la interpretación. Este método hace que la anomalía magnética pueda ser cuantificada si la magnetización y el campo son verticales, al ser situados en un polo magnético.

### 3.6.2 Anomalías Regional – Residual.

Las anomalías gravimétricas y magnéticas son resultado de cuantificaciones de masas ubicadas en diferentes niveles superficiales y profundos, estos son llamados componentes regionales y residuales. La anomalía por tanto representa la suma total de las anomalías presentes en el área de estudio, dependiendo del objeto de interés puede ser enfocado en estructuras someras o profundas.

La componente regional o profunda es la que generan anomalías con gradientes horizontales suaves. La componente residual se identifica con fuentes superficiales los cuales generan anomalías de longitud intermedia y son asociados con gradientes horizontales más abruptos. Por lo que es necesario separar las anomalías regionales y residuales dependiendo del objetivo del estudio. Esta descrita como:

$$\Delta g = \Delta g_R + \Delta g_r \quad (2.44)$$

$\Delta g$ = Anomalía gravimétrica,  $\Delta g_R$ = Anomalía Regional,  $\Delta g_r$ = Anomalía Residual

La anomalía gravimétrica está compuesta por influencia de estructuras regionales las cuales se localizan a grandes profundidades, generando anomalías suaves y de varios kilómetros. Además de las estructuras regionales también existe una influencia de estructuras someras las cuales son definidas como estructuras residuales, estas producen amplitudes de frecuencias pequeñas y altas.

Existen diferentes procedimientos para separar las componentes uno de ellos es sustraer la componente regional de la anomalía completa obteniendo la anomalía residual. La aplicación de estos métodos puede ser utilizada tanto para la parte gravimétrica y magnetométrica.

### 3.6.3 Continuación Ascendente-Descendente

El método de la continuación Ascendente-Descendente puede ser aplicado a las anomalías gravimétricas y magnéticas debido a su naturaleza de campo potencial. Al aplicar la continuación analítica se traslada la información definida en un plano S, a un plano ya sea en una ubicación superior o inferior dependiendo del objetivo a obtener.

Este procedimiento provee una predicción en el campo de las anomalías con la distancia de su fuente, por ejemplo, la continuación ascendente actúa como filtro pasa bajas y la continuación descendente actúa como un amplificador el cual también puede amplificar el ruido. (Fairhead, 2014)

Continuación analítica ascendente. Esta continuación se realiza a un nivel superior minimiza los efectos de las fuentes superficiales (longitudes de onda corta) y el ruido aparente, puede ser considerada como una técnica de suavizado. La continuación analítica descendente, discrimina el número de fuentes que provocan las anomalías. En el caso de que el nivel de proyección sea mayor al de la profundidad del objeto de más entidad nos encontraremos con un campo con fluctuaciones extremas. (Pardo, 2012)

Por lo que sintetizando los mapas de anomalía ascendentes presentan formas más suavizadas mostrando las componentes regionales, mientras que en la anomalía descendente son más agudas asociadas a las componentes residuales pudiendo resaltar el ruido existente.

### 3.6.4 Señal Analítica

La señal analítica está formada por la combinación de los gradientes horizontales y verticales de la anomalía magnética, la respuesta observada tiene relación con la forma de los cuerpos que la producen y no de la dirección de la magnetización (Blakley, 1996).

$$|A(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2} \quad (2.45)$$

La señal analítica representa la suma de las derivadas horizontal y vertical. Su aplicación define la ubicación de los límites de los contactos magnéticos que producen las anomalías magnéticas, independiente de la declinación magnética, produciendo un mejoramiento de la anomalía al ser aplicada.

### 3.6.5 Derivada vertical

La derivada vertical mejora la longitud de onda corta y suprime longitudes de onda larga, se realiza multiplicando la transformada de Fourier del mapa del campo potencial por el número de onda.

$$F_0 \left( \frac{\partial^n f}{\partial z^n} \right) = k^n * (f) \quad (2.46)$$

$F_0$ = Campo de Fourier,  $f$ = Campo potencial,  $k$ =número de onda,  $n$ = Orden de la derivada (Fairhead, 2004).

La primera derivada vertical cuando se aplica suprime la componente regional en los datos, dando como resultado un mapa similar al residual. Al aplicarla mejora las anomalías relacionadas a altas frecuencias, sin embargo, como en el caso de la continuación descendente, se puede incrementarse el ruido presente en los datos.

### 3.6.6 Análisis Espectral

La implementación del uso del espectro de Fourier para el análisis de datos considerando la estimación de la profundidad fue propuesta por (Sadek, H.S, 1984). Donde es necesario que los datos del mapa se encuentren transformados del dominio del espacio al de la frecuencia, en donde son separadas las longitudes de onda relacionado a diferentes fuentes que producen cierto tipo de anomalía.

El espectro de potencia puede ser representado como  $\ln$  (Espectro de potencia) vs número de onda, donde, una secuencia de pendientes está relacionada a los efectos debido a fuentes regionales, residuales, y efectos superficiales. Para su interpretación es aplicado un ajuste lineal de mínimos cuadrados en diferentes zonas, donde la pendiente producida por los efectos de fuente regional suele encontrarse en la parte más alta, la pendiente intermedia corresponde a los efectos de fuente residual y la tercera se relaciona a fuentes superficiales y ruido producido por la toma de datos. Al obtener la pendiente para cada tramo se calcula la profundidad de cada fuente mediante la ecuación

$$h = -\frac{m}{4\pi} \quad (2.47)$$

Donde,  $h$ = a la profundidad y  $m$ = la pendiente. Finalmente, el promedio de la profundidad de la fuente es obtenida de la pendiente de la porción lineal de la curva de decaimiento de energía. Los cambios apreciables en el gradiente del dominio indican la presencia de las fuentes dando más de una característica de profundidad, donde cada línea de intervalo debe ser analizado separadamente (Sadek, H.S., 1984).



# CAPÍTULO 4 ANÁLISIS GEOFÍSICO

## 4.1 Instrumentación

### 4.1.2. Gravímetro

La toma de datos se llevó a cabo con el gravímetro La Coste & Romberg Modelo G-247, proporcionado por el Instituto de Geofísica de la UNAM, fig. [16] El gravímetro La Coste está clasificado dentro de los gravímetros inestables, los cuales tienen respuestas no lineales, con lo cual miden la variación de la fuerza que se requiere para que regrese la masa  $m$  a una posición de referencia.

El Gravímetro La Coste & Romberg, realiza su medición por medio de la tensión de un muelle en la que está suspendida una masa, y un resorte, el cual cuando no realiza mediciones tiene una longitud cero (estado de equilibrio), cuando se realiza la medición la masa se desplaza provocando un desplazamiento del resorte, aplicando una tensión en sentido opuesto cuando la masa se desplaza, el gravímetro La Coste & Romberg Modelo G-247, tiene una resolución de hasta 0.001 [mgal] sumamente estable, con un rango mundial (7000 [mgal]) sin reiniciar y precisión de 0.04 mgal.



Fig. [16] Gravímetro La Coste & Romberg, Modelo G-247, perteneciente al Instituto de Geofísica.

Se debe hacer mención que las lecturas que se hacen con el gravímetro se deben convertir a miligales, por ciertos factores otorgados por el fabricante para la conversión. Los factores de calibración dependen solamente de la calidad del sistema nivelador y del tornillo micrométrico de medida.

### 4.1.3 Magnetómetro

En la toma de datos magnéticos se utilizó un magnetómetro de precisión protónica G-856 de la marca Geometrics. El G-856 es un magnetómetro/gradiómetro portátil, transportable, proporcionado por el Instituto de Geofísica, fig. [17]. Cuenta con funciones simples de operación y memoria interna que almacena más de 5000 lecturas. Con las especificaciones técnicas, de una resolución 0.1 [nT], visualización 6 dígitos, además de tres dígitos auxiliares, precisión de 0.5 [nT], rango de 20,000 a 90,000 [nT], cumple con las especificaciones dentro de 0° a 40 °C, lectura ciclo automático o manual.

Por lo que para las lecturas realizadas con este equipo no se necesita hacer ninguna conversión y el tratamiento de los datos se puede realizar directamente. Dentro de la caja del sensor se encuentran bobinas de alambre las cuales están sumergidas en un fluido de hidrocarburo, descrito del manual es el Shell SOL-71 Mineral Spirits.



Fig. [17]. Magnetómetro de protón Modelo G-856, Geometrics.

El sensor está marcado con una flecha y la letra “N”. Durante la operación, esta flecha deberá apuntar aproximadamente al norte. Al alinear al sensor de esta manera, colocará el eje de las bobinas perpendicular al campo de la Tierra, produciendo una señal óptima. Si la flecha está alineada hacia el este o hacia el oeste, generará una amplitud reducida. La opción de gradiómetro permite la toma de lecturas sucesivas de dos sensores separados verticalmente. El magnetómetro G-856 puede utilizarse como base con lo cual se registra las variaciones del campo magnético terrestre.

Las lecturas que realiza el magnetómetro están en unidades gammas.

1 gamma = 1[nT]

A medida que los estudios se acercan a latitudes de bajo magnetismo, en donde la inclinación del campo es menor de 40° y el valor del campo generalmente está por debajo de 40,000 gammas, el sensor deberá ser montado horizontalmente.

### **4.2 PROCESAMIENTO**

La adquisición de los datos gravimétricos y magnéticos se realizó en diferentes periodos, como se mencionó anteriormente, lo cual implica que la distribución de los datos presentara cambios de una región a otra, influyendo en el mallado final. Se revisaron los datos que fueron adquiridos, verificando que tuvieran sus coordenadas respectivas y la inclusión de bases en la parte gravimétrica.

En la figura [18] se plantea la metodología para la obtención de los mapas. Donde en primer lugar la adquisición de los datos es realizada por medio de los instrumentos como son el GPS Garmin E-trex, Gravímetro y Magnetómetro, en caso de que los datos se hayan obtenido con anterioridad se efectúa la verificación de los datos para realizar el procesamiento. Posteriormente, los datos potenciales se les aplican las correspondientes correcciones, las cuales fueron descritas en el capítulo 3, para así obtener la anomalía de Bouguer y Anomalía Magnética de Campo Total, de esta última anomalía se obtiene la reducción al polo para la posterior aplicación de filtros, y la obtención de las componentes residual y regional, en cada método potencial, obteniendo los mapas correspondientes. Para el análisis espectral se utilizan los mallados de la anomalía de Bouguer y la Reducción al Polo.

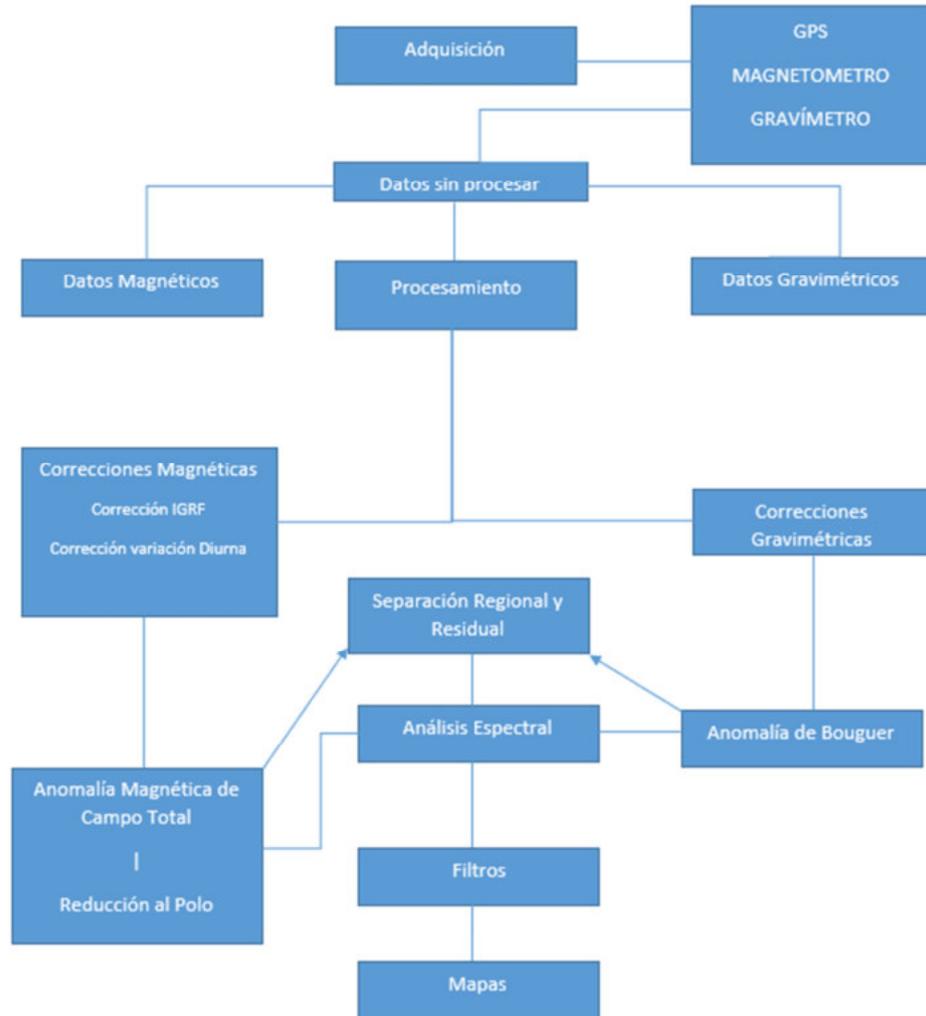


Fig.18 Metodología utilizada para la obtención de los mapas, así como para el análisis espectral de los métodos potenciales.

Los paquetes de cómputo con los cuales se realizó el procedimiento fueron los siguientes:

- Programa Tsoft para la creación de mareas sintéticas.
- Hoja de Cálculo Excel. Donde se realizaron las correcciones para ambos métodos potenciales.
- El software Geosoft Oasis Montaj 8.3, donde se realizaron los mapas. En la extensión MAGMAP se aplicaron los filtros para los diferentes mapas. El módulo GM-SYS, en el cual se crearon los modelos basados en los datos gravimétricos y magnetométricos usando el método de Talwani.

En la toma de datos gravimétricos se tomaron una lectura por estación, la ubicación de las bases fue distinta para cada zona, el tiempo promedio del levantamiento gravimétrico fue aproximadamente de 6 horas. El proceso de la medición consistió en los siguientes pasos:

1. Nivelación del gravímetro, 2. Encendido de la iluminación y liberación de la masa, 3. Estabilización de la aguja indicadora y toma de la lectura, 4. Desestabilización de la aguja indicadora, 5. Repetición del 2° paso en caso de que la aguja indicadora pase del punto de medición. Se descartaron los datos en los que el espaciamiento de las estaciones fuera cercano. Las fechas de la toma de datos en Ciudad Universitaria abarco los días 14, 15, 16, 17, 22 de Enero del 2013, la zona Arqueológica de Cuicuilco la toma de datos fue realizada entre los días 16, 17 de Enero del 2014, la zona que corresponde a la Colonia Romero de Terreros en las fechas de 28-03-2014, 04, 25 y 26 de Abril del 2014, por último la zona que correspondiente a la colonia Chimalistac los levantamientos fueron realizados entre las fechas 04, 05, 07, 18, 19 de Abril del año 2016.

La toma de datos magnetométricos fue a la par de los datos gravimétricos, siendo en las mismas fechas. En los datos magnéticos, la mayoría de los levantamientos se realizaron 4 lecturas de campo por cada estación, esto debido a la variación que presentaban los datos magnéticos, realizando al final un promedio con los datos obtenidos. Al no contar con un segundo magnetómetro se utilizó los datos de la base de Teoloyucan, la captura de los datos contempla la fecha, hora, número de medición, coordenadas longitud y latitud, lecturas.

De los días en los cuales se tomaron los levantamientos magnéticos, como ejemplo del procedimiento para corregir los datos se presenta la Tabla (2) donde se aplican las correcciones pertinentes para los datos magnéticos, en este caso la zona de Arqueológica de Cuicuilco el 17-01-2014. Además, la figura (19) presenta la variación del campo magnético para esta fecha, debido a falta de un segundo magnetómetro la información de la base fue tomada de los datos de la estación magnética de Teoloyucan. La figura (20) presenta el valor del IGRF para dicha fecha la cual contiene, la declinación inclinación, el valor del campo total, así como la variación por año.

ZONA ARQUEOLÓGICA DE CUICUILCO

UM [m]	X-UM	Y-UM	FECHA	ESTACION	LECTURA PROMEDIO [nT]	Hora	Minuto	Tiempo	Base	Modulo Magnetico	Dif. lat	IGF	Anom #
480527	2134151	17012014	17/01/2014	1	40500	12	6	12.1	4085.6	4085.88913	-2.8911	4065.1	-152.21
480520	2134159	17012014	17/01/2014	2	40848	12	11	12.183333	4085.61	4085.88935	-2.7905	4065.1	-183.64
480617	2134169	17012014	17/01/2014	3	39652	12	14	12.213333	4085.59	4085.88919	-2.9899	4065.1	-1090.11
480660	2134178	17012014	17/01/2014	4	40594	12	15	12.25	4085.61	4085.88975	-2.78975	4065.1	-57.64
480706	2134192	17012014	17/01/2014	5	40761	12	16	12.266667	4085.61	4085.8896	-2.7896	4065.1	109.36
480753	2134192	17012014	17/01/2014	6	41119	12	18	12.3	40856	4085.88913	-2.8893	4065.1	566.79
480796	2134205	17012014	17/01/2014	7	40194	12	18	12.366667	4085.59	4085.88915	-2.98915	4065.1	-517.44
480838	2134218	17012014	17/01/2014	8	40276	12	22	12.366667	4085.59	4085.8887	-2.9887	4065.1	-375.44
480833	2134213	17012014	17/01/2014	9	40207	12	24	12.4	40856	4085.8884	-2.8884	4065.1	-44.54
480933	2134200	17012014	17/01/2014	10	40096	12	28	12.466667	40856	4085.88878	-2.8878	4065.1	-595.88
480969	2134194	17012014	17/01/2014	11	39978	12	33	12.55	40856	4085.888705	-2.88705	4065.1	-673.55
481033	2134184	17012014	17/01/2014	12	39529	12	36	12.6	40856	4085.8886	-2.8866	4065.1	-1122.55
480997	2134237	17012014	17/01/2014	13	40972	12	41	12.683333	4085.58	4085.88955	-2.88955	4065.1	319.99
481024	2134272	17012014	17/01/2014	14	40066	12	43	12.766667	4085.59	4085.88855	-2.98855	4065.1	-585.45
480960	2134268	17012014	17/01/2014	15	41882	12	45	12.75	4085.59	4085.88875	-2.98875	4065.1	1230.55
480904	2134277	17012014	17/01/2014	16	41659	12	47	12.783333	4085.59	4085.889495	-2.98495	4065.1	806.88
480860	2134258	17012014	17/01/2014	17	41162	12	49	12.866667	4085.59	4085.888465	-2.98465	4065.1	530.55
480836	2134234	17012014	17/01/2014	18	40592	12	50	12.883333	4085.58	4085.88845	-3.0845	4065.1	-150.02
480780	2134227	17012014	17/01/2014	19	40879	12	52	12.866667	4085.58	4085.88842	-3.0842	4065.1	227.65
480804	2134272	17012014	17/01/2014	20	40547	12	54	12.9	4085.58	4085.88839	-3.0839	4065.1	-104.68
480807	2134323	17012014	17/01/2014	21	41090	12	56	12.933333	4085.58	4085.88836	-3.0836	4065.1	438.32
480778	2134323	17012014	17/01/2014	22	40320	12	57	12.95	4085.59	4085.888465	-2.98465	4065.1	-331.78
480761	2134303	17012014	17/01/2014	23	40590	12	59	12.963333	4085.56	4085.888315	-2.98315	4065.1	-361.48
480700	2134325	17012014	17/01/2014	24	40650	13	0	13	4085.58	4085.8883	-3.183	4065.1	-1.58
480679	2134296	17012014	17/01/2014	25	40233	13	2	13.033333	4085.56	4085.88827	-3.2827	4065.1	-418.15
480651	2134274	17012014	17/01/2014	26	40414	13	3	13.05	4085.57	4085.88825	-3.1825	4065.1	-227.92
480679	2134238	17012014	17/01/2014	27	40544	13	5	13.083333	4085.57	4085.88825	-3.1825	4065.1	-107.98
480623	2134215	17012014	17/01/2014	28	40623	13	8	13.133333	4085.56	4085.88818	-3.2818	4065.1	-28.82
480583	2134222	17012014	17/01/2014	29	40079	13	9	13.15	4085.58	4085.888165	-3.08165	4065.1	227.31
480542	2134197	17012014	17/01/2014	30	39788	13	11	13.183333	4085.57	4085.888135	-3.18135	4065.1	-863.25
480567	2134246	17012014	17/01/2014	31	41172	13	14	13.213333	4085.56	4085.88809	-3.2809	4065.1	1060.51
480610	2134122	17012014	17/01/2014	32	40479	13	15	13.25	4085.56	4085.888075	-3.28075	4065.1	-172.82
480625	2134081	17012014	17/01/2014	33	40714	13	17	13.283333	4085.55	4085.888045	-3.38045	4065.1	89.95
480645	2134047	17012014	17/01/2014	34	40933	13	19	13.366667	4085.56	4085.888015	-3.28015	4065.1	281.85
480693	2134004	17012014	17/01/2014	35	40194	13	20	13.333333	4085.56	4085.888	-3.28	4065.1	-457.82
480716	2134020	17012014	17/01/2014	36	40107	13	22	13.366667	4085.56	4085.88794	-3.2794	4065.1	-544.15
480781	2134033	17012014	17/01/2014	37	39714	13	24	13.4	4085.56	4085.88791	-3.1791	4065.1	-65.99
480818	2134032	17012014	17/01/2014	38	40585	13	26	13.433333	4085.57	4085.88785	-3.1785	4065.1	-82.425
480867	2134029	17012014	17/01/2014	39	39827	13	27	13.45	4085.57	4085.88782	-3.1782	4065.1	-400.92
480910	2134029	17012014	17/01/2014	40	40251	13	32	13.533333	4085.55	4085.88785	-3.1785	4065.1	-445.72
480959	2134004	17012014	17/01/2014	42	40340	13	35	13.55	4085.55	4085.88775	-3.17775	4065.1	-311.99
480966	2134004	17012014	17/01/2014	43	40096	13	38	13.633333	4085.56	4085.88773	-3.2773	4065.1	-555.16
481018	2134083	17012014	17/01/2014	44	39050	13	40	13.666667	4085.56	4085.8877	-3.277	4065.1	-1601.15

Tabla (2). En la tabla se presenta las correcciones realizadas a los datos obtenidos en la zona Arqueológica de Cuicuilco el día 17-01-2014, teniendo como resultado la anomalía de magnética de campo total. Las anomalías subrayadas de amarillos son algunos de los datos que no se tomaron en cuenta para la realización de los mapas.

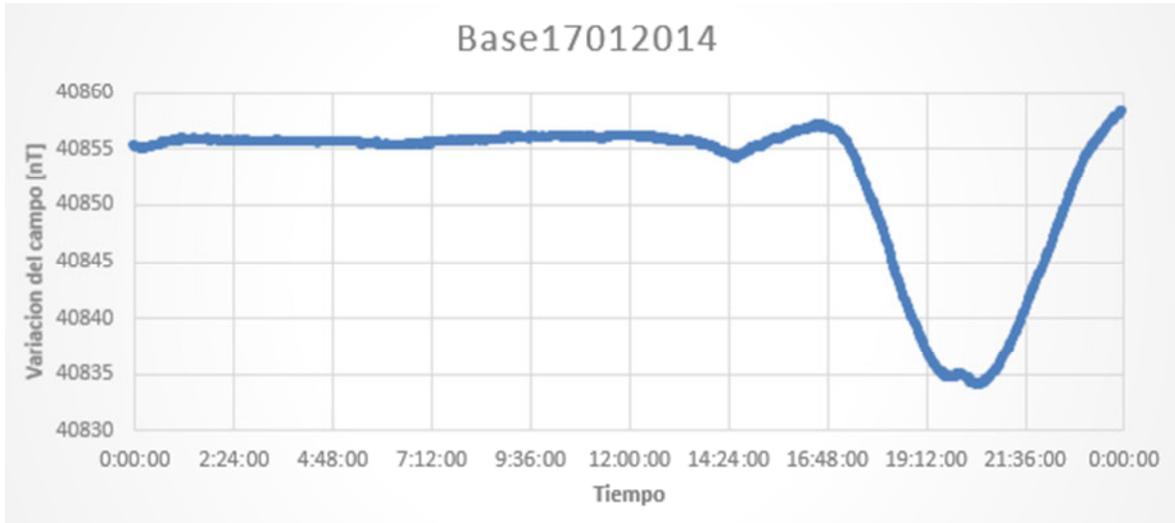


Fig. (19) En figura se presenta el comportamiento del campo magnético para el día 17012014, donde la variación que más sobresale es a partir de las 16:48 a las 0:00, no teniendo influencia en la hora en que se realizó los levantamientos.

Magnetic Field							
Model Used:	IGRF12						
Latitude:	19.329818° N						
Longitude:	99.17818836° W						
Elevation:	0.0 m Mean Sea Level						
Date	Declination (+ E   - W)	Inclination (+ D   - U)	Horizontal Intensity	North Comp (+ N   - S)	East Comp (+ E   - W)	Vertical Comp (+ D   - U)	Total Field
2014-01-17	5.1365°	47.0658°	27,692.6 nT	27,581.3 nT	2,479.3 nT	29,765.1 nT	40,655.1 nT
Change/year	-0.1096°/yr	-0.0189°/yr	-54.6 nT/yr	-49.7 nT/yr	-57.7 nT/yr	-78.4 nT/yr	-94.6 nT/yr

Fig. (20) Comportamiento del IGRF en la fecha del levantamiento, donde la información muestra la declinación, inclinación, las componentes del campo magnético, así como la variación por año. Imagen obtenida de [www.ngdc.noaa.gov/](http://www.ngdc.noaa.gov/).

Los datos gravimétricos, se realizaron las correcciones correspondientes las cuales están basadas en las fórmulas descritas en el Capítulo 3. En la Fig. (21) se presentan las mareas sintéticas creadas en el software Tsoft para las fechas 04, 25 de abril del 2014 correspondientes a la toma de datos en la colonia Romero de Terreros. La tabla muestra las correcciones realizadas en la colonia Romero de Terreros hasta la obtención de la Anomalía de Bouguer.

Las correcciones realizadas en la tabla (3) muestran los datos obtenidos en la Colonia Romero de Terreros, la densidad que se tomó en cuenta para la corrección de Bouguer fue de 2.68 kg/m<sup>3</sup>, valor cercano para las rocas basálticas que se encuentran la superficie de la zona de estudio. A los datos se realizó como complemento la corrección topográfica en el programa Geosoft, en la cual se utilizó la altitud obtenida en cada levantamiento y el DEM obtenido del programa Geomapapp. Aunque esta corrección fue realizada para obtener la Anomalía de Bouguer Completa, la topografía donde se tomaron los datos no presentaba variaciones tan

abruptas por lo que se puede trabajar con la Anomalía de Bouguer Simple, sin que ello tenga influencia significativa en los mapas finales.

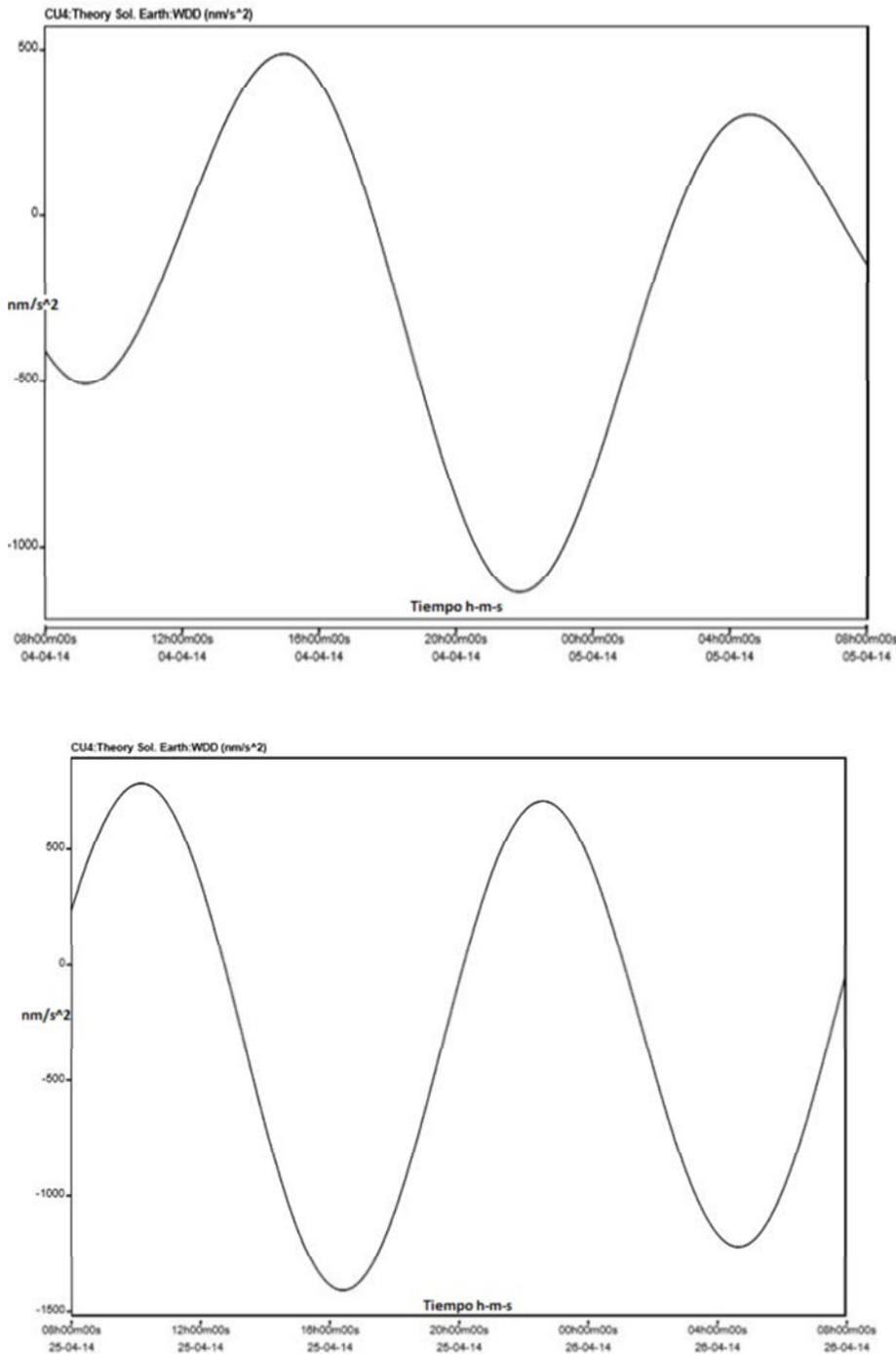


Fig. (21) Mareas sintéticas obtenidos del software Tsoft para la zona de estudio de la Colonia Romero de Terreros, en la gráfica se muestra la variación del tiempo (s) contra la variación de la marea  $\text{nm/s}^2$ .

# Capítulo 4 Análisis Geofísico

Levantamiento gravimétrico  
 Gravímetro Lacoste & Romberg  
 Modelo G-247

$\rho =$	2.99	[g/cm <sup>3</sup> ] (Basalto)	Contador	Factor
Deriva L&R G-247 =	1.04845		1500	1.04845
G abs Base =	977927.29	[mGal]		

Fecha	Estación	Lectura	Lectura [mGal]	Hora	Latitud	Latitud [rad]	Longitud	X_UTM	Y_UTM	Tsoft [mGal]	Elevacion [m]	Correccion x marea	Corr. x Deriva
28/03/2014	Base	151497	1586.84	15:32	19.32981801	0.337368968	-99.17818836	481315.1442	2137130.731	-0.097253284	2280.97	1586.93	1586.9325
28/03/2014	p1	151757	1589.56	15:56	19.33425841	0.337446468	-99.17697895	481442.6842	2137621.94	-0.116913476	2267.78	1589.68	1589.6744
28/03/2014	p2	151747	1589.46	16:06	19.33474563	0.337454971	-99.17653635	481489.2291	2137675.804	-0.124029133	2266.52	1589.58	1589.5751
28/03/2014	p3	151765	1589.65	16:11	19.33512937	0.337461669	-99.17636279	481507.5028	2137718.247	-0.127323224	2265.58	1589.77	1589.7664
28/03/2014	p4	151792	1589.93	16:16	19.33589367	0.337475008	-99.1761675	481528.1016	2137802.798	-0.130430713	2262.95	1590.06	1590.0518
28/03/2014	p5	151767	1589.67	16:24	19.33660455	0.337487416	-99.17576318	481570.6501	2137881.415	-0.135005282	2265.8	1589.80	1589.7930
28/03/2014	p6	151769	1589.69	16:32	19.3370596	0.337495358	-99.17539877	481608.9776	2137931.728	-0.139069879	2266.5	1589.83	1589.8168
28/03/2014	p7	151833	1590.36	16:41	19.33772736	0.337507012	-99.1751266	481637.6401	2138005.588	-0.143008727	2266.38	1590.50	1590.4903
28/03/2014	p8	151866	1590.70	16:52	19.33836472	0.337518136	-99.17437027	481717.1529	2138076.033	-0.146878254	2263.43	1590.85	1590.8385
28/03/2014	p9	151865	1590.69	17:12	19.33900414	0.337529296	-99.17363828	481794.1089	2138146.709	-0.151150338	2264.79	1590.84	1590.8292
28/03/2014	p10	151925	1591.32	17:20	19.33961681	0.337539989	-99.1730437	481856.6284	2138214.439	-0.15183689	2263.65	1591.47	1591.4577
28/03/2014	p11	151941	1591.49	17:38	19.34051759	0.337555711	-99.17238701	481925.703	2138314.044	-0.151222258	2263.11	1591.64	1591.6220
28/03/2014	p12	151986	1591.96	17:52	19.34099472	0.337564038	-99.17152667	482016.1204	2138366.749	-0.14868874	2260.39	1592.11	1592.0891
28/03/2014	Base	151495	1586.81	18:10	19.32981801	0.337368968	-99.17818836	481315.1442	2137130.731	-0.142853559	2280.97	1586.96	1586.9325
04/04/2014	Base	151381	1585.62	13:56	19.32981801	0.337368968	-99.17818836	481315.1442	2137130.731	0.040592384	2280.97	1585.58	1585.5785
04/04/2014	p13	152050	1592.63	15:20	19.34185295	0.337579017	-99.17167724	482000.3997	2138461.73	0.047887947	2257.79	1592.59	1592.5653
04/04/2014	p14	152055	1592.69	15:26	19.34281575	0.337595821	-99.17145514	482023.8331	2138568.243	0.047264303	2257	1592.64	1592.6169
04/04/2014	p15	152054	1592.68	15:32	19.34364994	0.337610381	-99.17135614	482034.3228	2138660.537	0.046482342	2257.1	1592.63	1592.6058
04/04/2014	p16	152086	1593.01	15:39	19.34449037	0.337625049	-99.17132132	482038.0721	2138753.529	0.045370697	2258	1592.97	1592.9408
04/04/2014	p17	152088	1593.03	15:58	19.34447132	0.337624717	-99.17176407	481991.5673	2138751.467	0.041285257	2258.97	1592.99	1592.9613
04/04/2014	p18	152082	1592.97	16:13	19.34446983	0.337624691	-99.17218416	481947.4444	2138751.346	0.036987778	2258.41	1592.93	1592.8991
04/04/2014	p19	152058	1592.72	16:19	19.34459437	0.337626864	-99.17268487	481894.8678	2138765.179	0.035014098	2257.77	1592.68	1592.6480
04/04/2014	p20	152039	1592.52	16:31	19.34472176	0.337629088	-99.17365295	481793.2031	2138779.377	0.030648834	2257.69	1592.49	1592.4503
04/04/2014	p21	152022	1592.34	16:38	19.34457244	0.337626481	-99.17405187	481751.2873	2138762.896	0.027855315	2259.17	1592.31	1592.2732
04/04/2014	p22	151993	1592.04	16:46	19.34374511	0.337612042	-99.17404139	481752.2959	2138671.348	0.02450851	2260.08	1592.01	1591.9707
04/04/2014	p23	151980	1591.90	16:54	19.34282522	0.337595987	-99.17421942	481733.4946	2138569.581	0.020831526	2260.15	1591.88	1591.8361
04/04/2014	p24	151972	1591.82	17:00	19.34236376	0.337587933	-99.17441936	481712.4429	2138518.54	0.017983545	2261.54	1591.80	1591.7536
04/04/2014	p25	151978	1591.88	17:08	19.3419018	0.33757987	-99.17435172	481719.4958	2138467.416	0.014018969	2262.32	1591.86	1591.8186
04/04/2014	p26	151892	1590.98	17:17	19.3409732	0.337563663	-99.17455866	481697.6565	2138364.687	0.00934658	2265.11	1590.97	1590.9195
04/04/2014	p27	151860	1590.64	17:32	19.34013216	0.337548984	-99.17426807	481728.0846	2138271.593	0.001116677	2265.93	1590.64	1590.5886
04/04/2014	p28	151741	1589.39	17:44	19.33965996	0.337540743	-99.17474773	481677.651	2138219.394	-0.005804283	2268.62	1589.40	1589.3450
04/04/2014	p29	151701	1588.97	17:53	19.33904887	0.337530077	-99.17529698	481619.8922	2138151.834	-0.011153872	2269.88	1588.99	1588.9288
04/04/2014	p30	151727	1589.25	18:05	19.33847239	0.337520016	-99.1759201	481554.3779	2138088.112	-0.018450178	2267.93	1589.27	1589.2059
04/04/2014	p31	151704	1589.01	18:12	19.33807083	0.337513007	-99.17648095	481495.4235	2138043.738	-0.022770368	2268.84	1589.03	1588.9674
04/04/2014	Base	151380	1585.61	18:33	19.32981801	0.337368968	-99.17818836	481315.1442	2137130.731	-0.035869407	2280.97	1585.64	1585.5785

gObs	g. Teorica (gn) [mGal]	Factor de corr. de Bouguer (ΔgB) [mGal/m]	Anomalia de Bouguer Simple (Abs)
977927.2900	978597.2489	285.8986046	-251.9502
977930.0319	978597.4986	284.2453594	-252.1241
977929.9326	978597.5261	284.08743	-252.5090
977930.1238	978597.5476	283.9696097	-252.5331
977930.4092	978597.5906	283.6399634	-252.8156
977930.1505	978597.6306	283.9971846	-252.6319
977930.1742	978597.6562	284.0849232	-252.5309
977930.8478	978597.6938	284.0698823	-251.9544
977931.1959	978597.7296	283.7001269	-252.2184
977931.1866	978597.7656	283.8705904	-252.0503
977931.8151	978597.8001	283.7277019	-251.6995
977931.9794	978597.8508	283.6600179	-251.7354
977932.4465	978597.8776	283.3190909	-251.8203
977927.2900	978597.2489	285.8986046	-251.9502
977927.2900	978597.2489	285.8986046	-251.9502
977934.2768	978597.9259	282.9932048	-250.5629
977934.3284	978597.9801	282.8941856	-250.7643
977934.3173	978598.027	282.9067197	-250.8509
977934.6523	978598.0743	283.0195264	-250.4454
977934.6728	978598.0732	283.141107	-250.2450
977934.6106	978598.0731	283.0709161	-250.4097
977934.3595	978598.0801	282.990698	-250.7921
977934.1618	978598.0873	282.9806708	-251.0188
977933.9847	978598.0789	283.1661751	-250.9079
977933.6822	978598.0324	283.2802353	-250.9507
977933.5476	978597.9806	283.2890091	-250.9691
977933.4651	978597.9546	283.4632328	-250.7450
977933.5301	978597.9286	283.5609987	-250.4852
977932.6310	978597.8764	283.9106995	-250.7687
977932.3001	978597.8291	284.0134789	-250.8547
977931.0565	978597.8025	284.3506457	-251.5523
977930.6403	978597.7681	284.5085751	-251.6689
977930.9174	978597.7357	284.2641605	-251.6845
977930.6789	978597.7131	284.3782207	-251.7111
977927.2900	978597.2489	285.8986046	-251.9502

Tabla. (3) Correcciones de los datos gravimétricos para la zona de la Colonia de Romero de Terreros obteniendo como resultado la Anomalia de Bouguer Simple, realizadas en el 2014.

El procedimiento de correcciones en las zonas de estudio fue similar en ambos métodos, por lo que en las figuras y tablas anteriores solo se muestra el procedimiento realizado en todos los demás datos magnetométricos y gravimétricos, que componen este trabajo.

Debido a que la toma de datos fue realizada en años variados y por alumnos diferentes, la distancia entre estaciones no es homogénea. Los datos gravimétricos se verificaron que los levantamientos tuvieran apertura y cierre en las bases, teniendo una buena calidad de los datos con los que se trabajó. En los datos magnetométricos se estableció como parámetro que los datos obtenidos no sobrepasaran los valores del IGRF para cada fecha y que las anomalías de campo magnético total no sobrepasaran los límites de -1200 a 1100 nT. Por lo que se puede mencionar que los datos magnetométricos para la colonia de Romero de Terreros, no se pudieron tomar en cuenta al no cumplir con estos parámetros, el tomarlos encuentra influiría en los resultados finales.

Así, se puede hacer mención que en la parte magnetométrica se utilizó los datos de 266 estaciones, teniendo como máximo 1093.97 nT a un mínimo -1194.04 nT, se excluyó los valores que sobrepasaban los valores mínimos y máximos presentados anteriormente. En la parte gravimétrica los datos utilizados en la elaboración de los mapas fueron de 441 estaciones, con un de máximo -211.18 mgal a un mínimo -299.17 mgal, en este caso los valores obtenidos en la colonia Romeros de Terreros si fueron tomados en cuenta al encontrarse los valores en los límites de variación aceptables definidos anteriormente.

Obteniendo las anomalías, el siguiente paso es su visualización, la cual fue realizada por medio del programa Oasis de Geosoft®, donde se realizó el mallado, así como el posterior procesamiento mediante la aplicación de filtros, con el fin de obtener las componentes regional y residual de cada una de las anomalías de los métodos potenciales.

El mallado fue realizado usando una interpolación de mínima curvatura, la cual se puede definir como la obtención de una superficie lo más lisa posible que se ajuste a los valores obtenidos. Este método estima que los nodos (puntos donde se encuentra los datos de campo) se encuentran distribuidos en una malla gruesa, en la cual de un nodo a otro se establece un radio de búsqueda cercano a los datos ingresados, si no se encuentra un dato cercano, el radio de búsqueda aumenta hasta que la condición se cumpla. Se considera como un método iterativo, para ajustar el mallado a los puntos reales lo más cercano posible en la malla gráfica (Fairhead, 2004).

### 4.2.1 Anomalía de Bouguer

El análisis de la anomalía de Bouguer permite determinar la existencia de variaciones de la gravedad producida por diferencias en la densidad de estructuras del subsuelo medidas en la superficie. Por lo que, para obtener la anomalía de Bouguer se aplicaron las correcciones descritas en el Capítulo 3, estas correcciones pueden clasificarse como de tipo espacial (Aire libre, Bouguer, Topografía) y temporal (deriva), llegando a la obtención de la anomalía de aire libre, y posteriormente Bouguer simple.

En el cálculo de la Anomalia de Bouguer se aplicaron las correcciones respectivas, posteriormente se realizó el mallado por medio del programa Oasis Montaj, con la superficie de mínima curvatura, obteniendo el Mapa de Anomalia de Bouguer fig.[22], donde se encuentra una mayor cantidad de anomalías con amplitud alta en el mapa. Las anomalías, para su análisis fueron divididas en diferentes regiones las cuales se describen a continuación:

1. En el mapa fig. [22] Se observa una anomalía en las cercanías del núcleo poniente de la reserva ecológica (I) con dirección NE la cual parece tener continuidad hasta la colonia Romero de Terreros (R), con una variación de -225.8 a -220.70 mgal en este caso la anomalía comienza con un color azul hasta el verde el cual representa los rangos medios en la escala de color. Esta anomalía pasa por los dos núcleos de la reserva (I y II) y la zona escolar con valores de -225 a -220.1 mgal. La colonia Romero de Terreros (R) con valores de -221 a -218 mgal, en las colonias Chimalistac y Copilco el bajo (CH) con valores más altos en un rango de -218.07 a -215 mgal, en este caso está representado por colores violetas correspondientes a las anomalías con un rango más alto de la escala de color, lo que representa una mayor amplitud.
2. En la parte Oeste del mapa, se correlaciona las anomalías con lugares de referencia en los cuales destacan afloramientos de lava, encontrados en lugares como el Estadio Olímpico Universitario, el campo de béisbol (E) y el núcleo poniente de la Reserva Ecológica (I), con una variación de -223 mgal bajando hasta -220.3 mgal. En el mapa se presenta un rango de colores de amarillo a azul claro correspondientes a valores medio en la escala de color. La anomalía ubicada en el Núcleo Poniente de la Reserva Ecológica es la que más destaca en esta región del mapa.
3. En la zona Sur-Sureste, los lugares de referencia que tienen la misma característica son los núcleos de la reserva ecológica (oriente II y sur-oriente III) con valores de -223 a -221 mgal en ambos casos encontrándose anomalías de valores bajos, la siguiente anomalía localizada cercano a las instalaciones de la Cantera del equipo de fútbol de la universidad (C) la cual se extiende hasta las instalaciones de Ciudad Universitaria con variación de la anomalía en valores que van de (-223 a -225 mgal) definido con en tonalidad de azul claro a un azul un poco más oscuro representado como una anomalía de bajo gravimétrico, estos valores pueden estar relacionados con las características topográficas encontradas en este sitio debido a la excavación de la cantera donde se encuentra la pared de lava, en su

periferia se halla un anomalía con valores que en comparación son más altos, los cuales tienen un rango de -217 a -219 mgal.

La descripción de las anomalías anteriores presenta como característica que los valores altos parecen unidas y bordean los valores bajos encontrados en la parte central. Al tener el mapa de la anomalía de Bouguer el siguiente paso es proceder a la separación de las componentes regional-residual. Además en la parte Norte la en la colonia Romero de Terreros la anomalía baja en comparación de la colonia Chimalistac, dando resultado a cierta forma que puede estar relacionada con la estructura de las coladas de lava, de lo cual faltaría definir que anomalía corresponde a la componente residual o regional, lo cual se definirá con los mapas que se presentan a continuación.

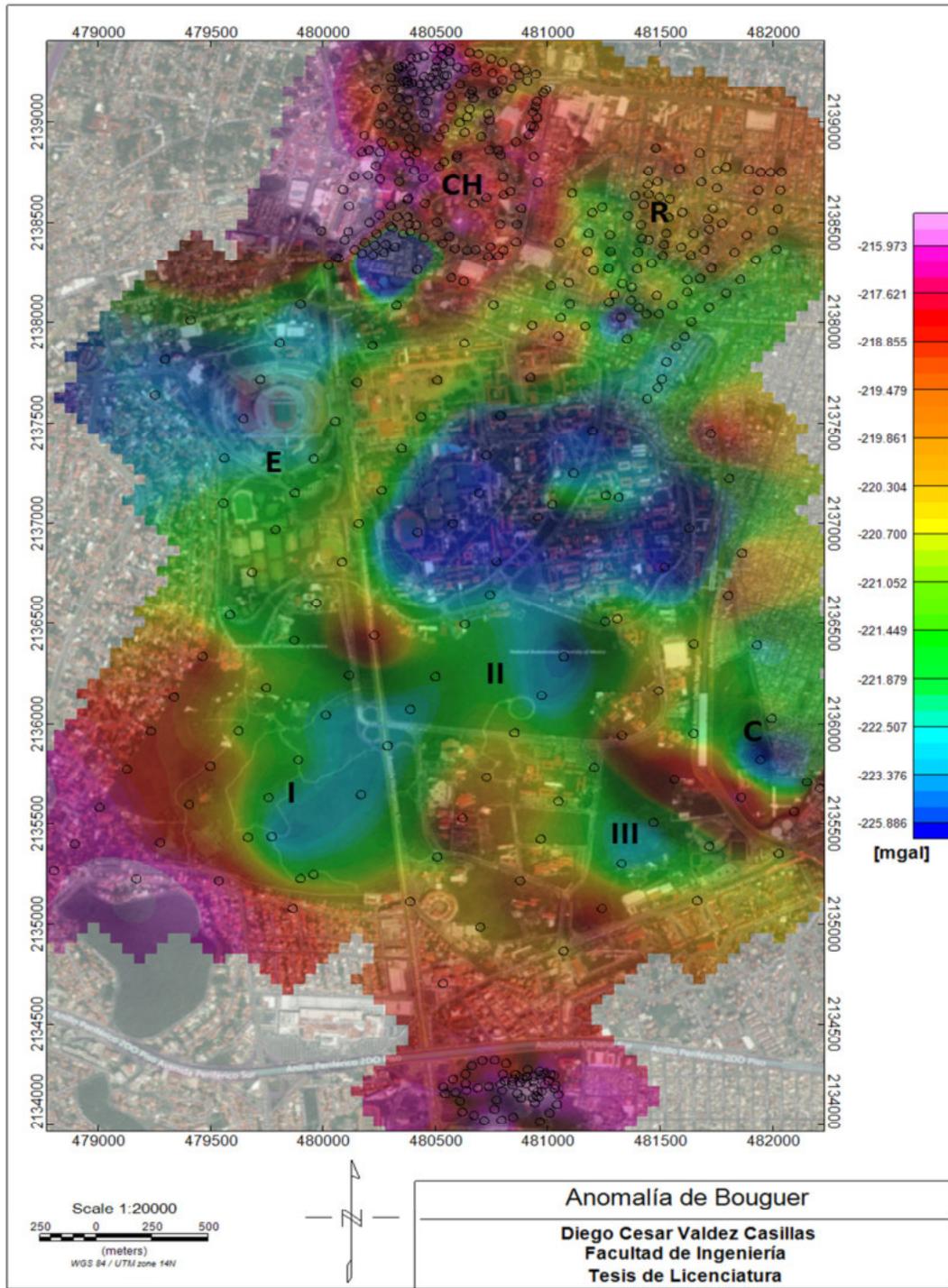


Fig. [22] Mapa Gravimétrico Anomalia de Bouguer, en el mapa se observa la variación en la parte Norte y en la parte central del mapa. Donde (I) Núcleo Poniente, (II) Núcleo Oriente, (III) Núcleo Sur Oriente, (C) Instalaciones de la cantera, (E) Estadio Olímpico Universitario y campos deportivos, (R) Colonia Romero de Terreros, (CH) Colonia Chimalistac. Los puntos están relacionados a las estaciones gravimétricas en cada zona de estudio.

La aplicación de filtros al mapa de la anomalía de Bouguer Fig. [22], se realizó mediante la extensión MAGMAP del programa Oasis Geosoft®. Cabe señalar que, para la aplicación de los operadores, el software requiere que el mallado, pase por una serie de pasos, que a continuación se describen.

La extensión aplica los filtros en el dominio del número de onda, lo cual implica un procedimiento para convertir la malla de los datos espaciales al dominio del número de onda. Después, de ser transformados los datos al dominio de número de onda, los filtros pueden ser aplicados. El primer paso es la preparación de la malla. En este punto del procedimiento se requiere que, la malla se convierta al dominio de número de onda siendo periódica. En virtud de imitar la periodicidad, la malla es expandida y entonces se extiende en los puntos opuestos para asegurar la continuidad, este procedimiento se repite de borde a borde hasta que en la malla del pre-procesado no se observe una sola discontinuidad (Geosoft manual, 2014).

La malla es expandida a un cuadrado por defecto o rectángulo de dimensiones Winograd, esta expansión nos lleva a un adecuado espacio asegurando una suave periodicidad y continuidad, en las etapas de preprocesamiento los datos pueden ser expandidos a una dimensión  $2^n$ , para la malla esto es un requerimiento fundamental, sin embargo, se incrementa el tiempo de procesamiento. El siguiente paso es expandir el área que se interpola para llenar el mallado periódicamente a largo de las coordenadas N-S y E-O (Geosoft manual, 2014).

Después de la preparación de la malla, se procede a la aplicación de la transformada de Fourier, teniendo la malla pre-procesada de forma cuadrada y periódica en el dominio del espacio es transformada al dominio del número de onda, obteniendo en este punto el promedio del espectro radial. Llegando a este paso se puede realizar el filtrado, según sea el objetivo.

Aplicado el filtro el siguiente paso es transformar la malla procesada al dominio espacial. El post-procesamiento involucra remover las características de precondición original, reducido a su tamaño original y enmascarando la original (Geosoft manual, 2014). Este procedimiento se mantiene para la creación de los mapas subsecuentes que se describen a continuación.

### 4.2.2 Anomalías Regional y Residual

En primer lugar, aplicaremos el filtro para la separación de las componentes regional/residual. Este filtro está basado en un filtro gaussiano, una característica del filtro gaussiano es simular una distribución bivariante, donde el valor máximo aparece en el píxel central y disminuye hacia los extremos, la rapidez de esta variación depende de cuan menor sea el parámetro de desviación, el resultado será un conjunto de valores entre 0 y 1, en Oasis® el filtro gaussiano está definido por la siguiente ecuación:

$$L(k) = 1 - e^{\frac{-k^2}{2k_0^2}} \quad 4.1$$

Donde  $k_0$  es la desviación estándar de la función gaussiana en ciclos/unidad de medida (metros). El resultado puede variar entre 0/1, si es 0 la componente que se obtiene es la anomalía residual y si es 1 la componente regional es obtenida. Con lo cual se logró la separación de las anomalías regional / residual.

Al realizar la separación de la anomalía regional, se pretende obtener las anomalías de características regionales, teniendo un mapa con características más finas al reducir las altas frecuencias y eliminando el ruido presente en el mapa de la anomalía de Bouguer. Las fuentes que deben mantenerse son aquellas que tengan longitud de onda grande que están asociadas a fuentes profundas, como se presenta en el mapa de la Anomalía Gravimétrica Regional fig. [23], de la cual se realizó el análisis para los mismos sitios que en la Anomalía de Bouguer, obteniendo los siguientes resultados:

En la figura [23] se puede observar dos anomalías que se extiende desde el núcleo poniente de la reserva ecológica (I) de una longitud pequeña y la segunda empieza en el núcleo oriente (II) la cual es más grande con valores medios de -224 a -220 mgal (de azul a azul oscuro respecto a la escala de color), esta anomalía es de las más extensas que se encuentran en el mapa. En la parte sur, los núcleos de la reserva poniente (I) y oriente (II) la variación con valores de -222 mgal el tercer núcleo suroriente presenta un cambio al tener valores de -221 a -220 mgal, estos valores cubren la zona de la cantera de futbol (C), los valores más altos bordean las anomalías citadas. La parte NW y W, en la colonia Chimalistac (CH) los valores son altos (-217 a -216 mgal, colores de rojo a violeta) sin que se observe una anomalía de forma cerrada y reduciéndose cuando se acercan hacia la parte NE. En la parte del Estadio Olímpico Universitario (E) de -223 mgal, siendo en este caso que la anomalía no presenta una forma cerrada.

Al analizar el mapa de la anomalía de Bouguer, se observan tendencias similares en la forma de la anomalía de valores bajos ubicados en la parte central del mapa de la anomalía gravimétrica regional, existen algunos cambios de las anomalías con valores altos que se unen y rodean la parte central en las regiones Sur y Norte, por lo que se infiere que podrían estar relacionado con estratos más profundos o un cambio de litología de las fuentes más profundas.

En los bordes del mapa existen anomalías con valores altos, sin embargo, al manifestar formas abiertas, no se tomarán en cuenta, pues hacen falta más datos para estas regiones y pueden ser producto de la interpolación realizada para la obtención del mapa regional.

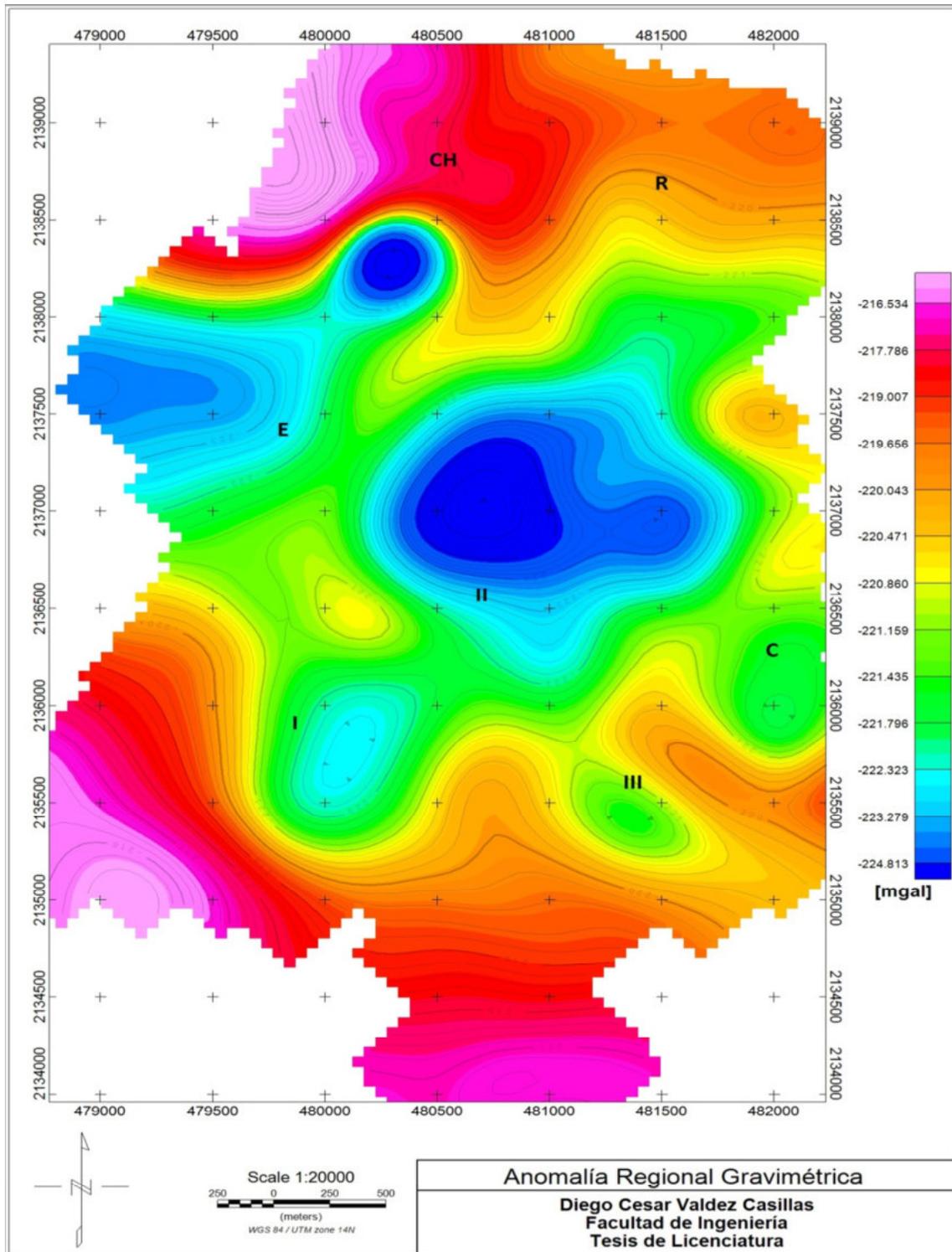


Fig. [23] Mapa Gravimétrico, Anomalía Regional. Donde (I) Núcleo Poniente, (II) Núcleo Oriente, (III) Núcleo Sur Oriente, (C) Instalaciones de la cantera, (E) Estadio Olímpico Universitario y campos deportivos, (R) Colonia Romero de Terreros, (CH) Colonia Chimalistac.

El siguiente mapa es el mapa gravimétrico residual fig. [24], se obtiene de la ecuación mencionada anteriormente (4.1). A diferencia del mapa regional el objetivo es resaltar las estructuras someras que se presentan en la zona de estudio. Del mapa se observa varias anomalías en diferentes puntos correspondientes a fuentes someras, la distribución de estas varía de los dos mapas anteriores, de las cuales podemos describir lo siguiente:

Con respecto a las anomalías que se encuentran en las reservas ecológicas (I, II, III), el núcleo II es el que se encuentra con una anomalía con valores más altos de 0.093 a 1.293 mgal, los núcleos (I y III) se encuentran anomalías con valores más bajos los cuales van de -1.635 a -0.445 mgal, ambas anomalías tienen forma definida.

La zona de las instalaciones de la cantera (C) se encuentran anomalías con valores de -0.720 a -0.445 mgal, en la parte central (ZE) correspondiente a la zona escolar y regiones cercanas tiene valores de -0.720 a -0.445 mgal, en el mapa regional esta anomalía se encuentra ubicada en la misma región, solamente cambia las dimensiones de la anomalía.

Lo que se observa en el mapa de la anomalía residual, es que las anomalías con valores más altos se encuentran unidas, solo algunas aparecen dispersas, las de valor más alto se encuentran ubicadas en las cercanías de la colonia Chimalistac (CH) y se reduce al NE. La segunda anomalía de interés cubre la parte central del mapa (ZE), pasando por el núcleo (II), con valores de la anomalía que van de -1.636 a 0.003 mgal, esta anomalía como se observó anteriormente puede estar relacionada a fuentes profundas. En la parte Norte también destaca la forma de la estructura donde empieza a decrecer conforme el mapa tiene una orientación NE.

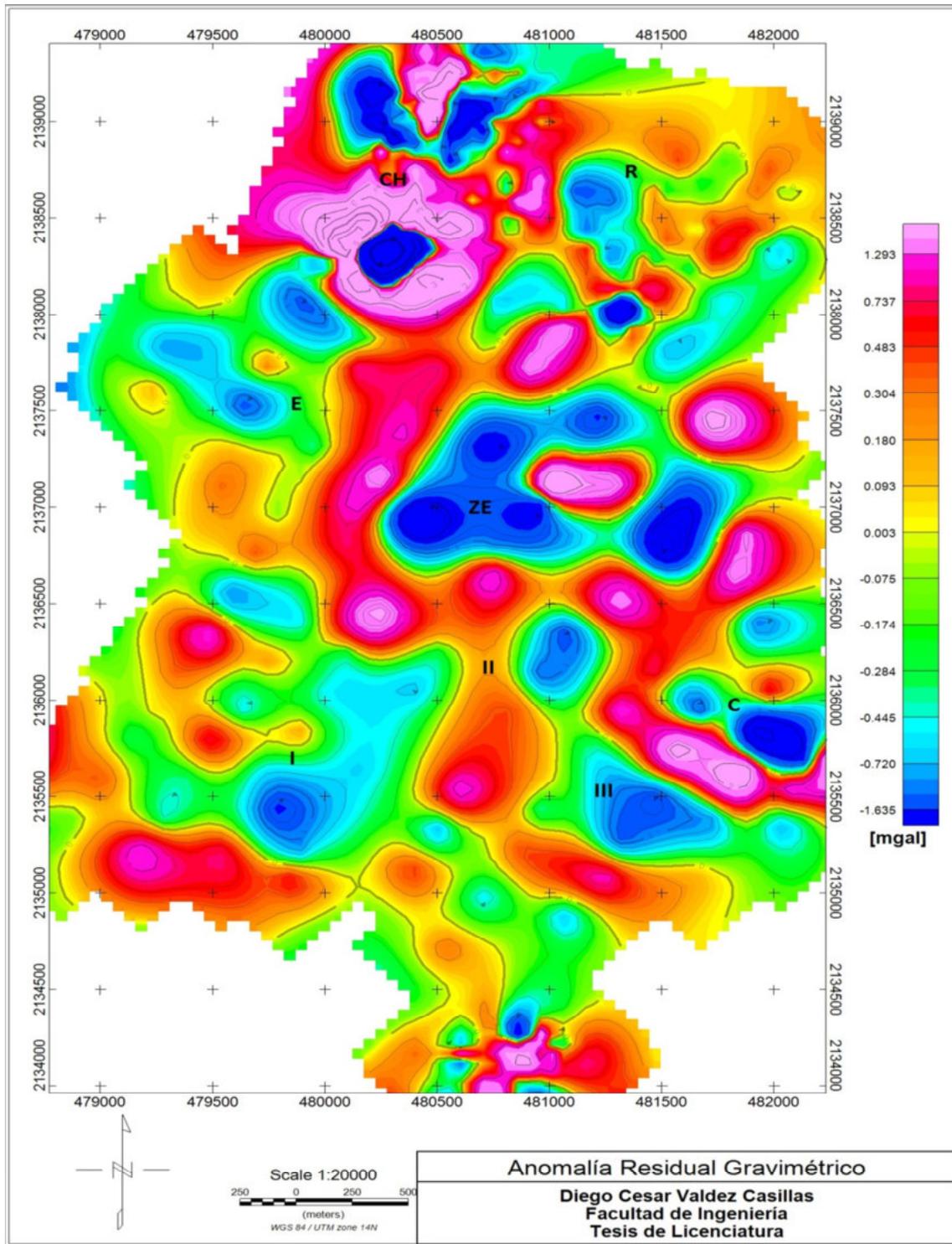


Fig. [24] Mapa Gravimétrico, Anomalía Residual. Donde (I) Núcleo Poniente, (II) Núcleo Oriente, (III) Núcleo Sur Oriente, (C) Instalaciones de la cantera, (E) Estadio Olímpico Universitario y campos deportivos, (R) Colonia Romero de Terreros, (CH) Colonia Chimalistac, (ZE) zona central.

### 4.2.3 Continuación Ascendente/Descendente en datos gravimétricos

Para comprobar los resultados obtenidos en los mapas de la anomalía regional/ residual, y con la finalidad obtener las características de las anomalías más superficiales, se realizaron las continuaciones analíticas. En este caso las continuaciones analíticas cumplen con características similares de la separación de las componentes regional /residual. A continuación, se presenta una breve descripción de la forma en cómo se obtiene la continuación analítica por medio del programa Oasis montaj y las anomalías resultantes en cada situación.

#### 4.2.3.1 Continuación Analítica Ascendente.

La continuación Ascendente es usada para eliminar o minimizar los efectos de las fuentes superficiales y los ruidos existentes, al aumentar la altura, las fuentes profundas se mantienen y las superficiales tienden a desaparecer. En el software está definida por la siguiente ecuación:

$$L(r) = e^{-hr} \quad 4.2$$

Donde  $h$  es la distancia en unidades de longitud, ascendente al plano de observación y  $r$  es el número de onda (radianes/unidad de longitud). En este caso se probaron diferentes distancias, siendo la de 183 m, donde no se observan las fuentes someras y se podía tener definición de las anomalías en el mapa de continuación ascendente.

Existe una similitud con el mapa de la anomalía Regional, en la fig. [25] se observa una distribución semejante de las anomalías, donde en la parte central (ZE) es la que mantiene con valores de -222 a -221 mgal. En la parte norte hay un cambio en la distribución de la anomalía siendo que en la parte NW es donde los valores son más altos, reduciéndose en la parte NE en la región de la colonia Romero de Terreros, con variación -217.199 a -220.054 mgal.

En la parte sur donde se encuentran los núcleos de la reserva ecológica también presentan una distribución, donde cambian los valores de las unidades centrales teniendo anomalías con mayor valor en la parte Sur y disminuyendo conforme se acercan a la parte central del mapa, teniendo una forma ondulada de la anomalía.

La distribución de las anomalías es semejante a la encontrada en la fig. [23] donde los altos gravimétricos ubicados al Norte disminuyen al NE, y existe una reducción de los valores de la anomalía en la parte central del mapa, por último, la parte Sur del mapa los valores de la anomalía son altos. Con lo que se puede destacar que la anomalía encontrada en el parte central es la que se mantiene y por lo tanto se asocia con una anomalía de características profundas.

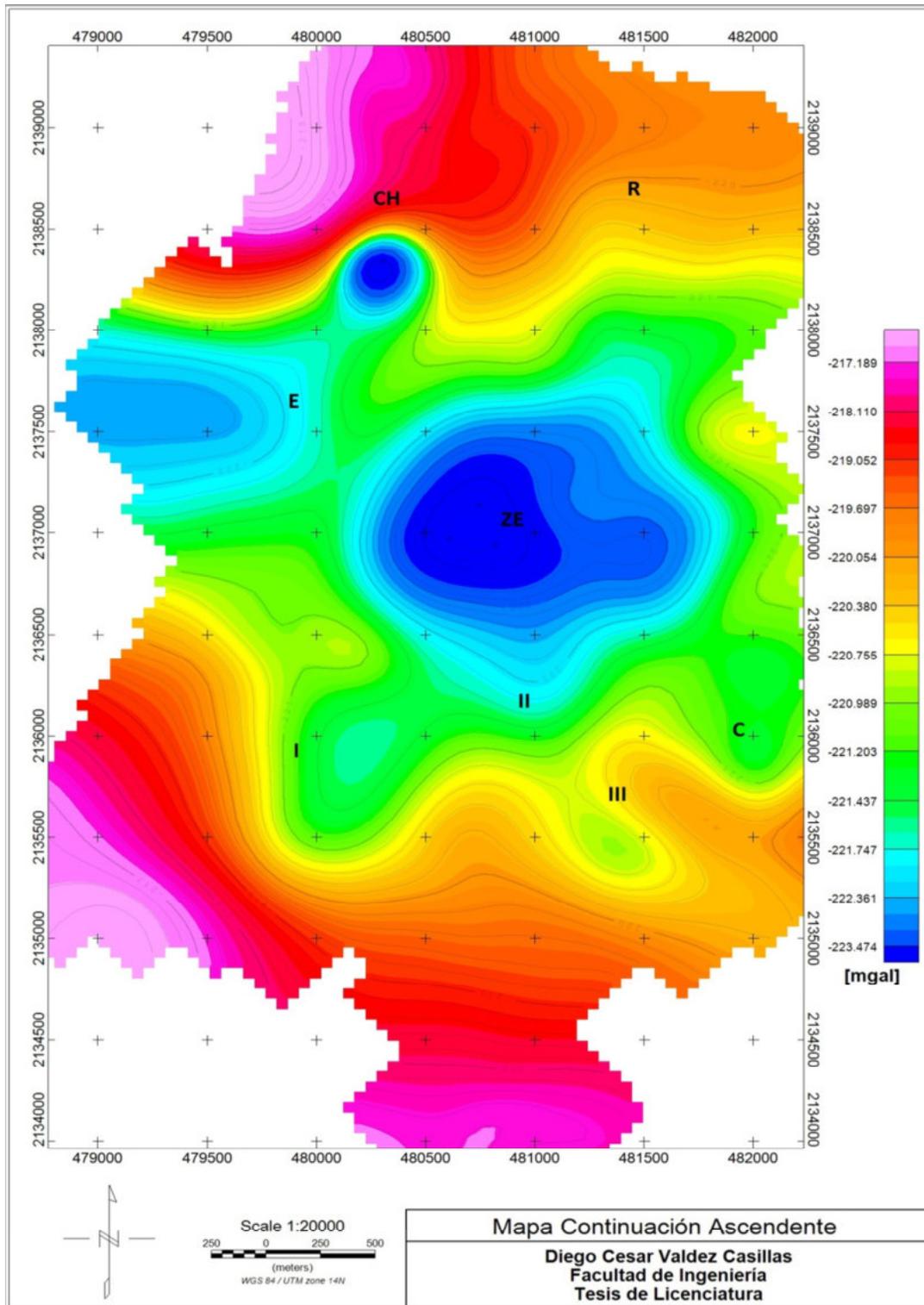


Fig. [25]. Mapa Gravimétrico, Continuación Ascendente a una distancia de 183 m. Donde (I) Núcleo Poniente, (III) Núcleo Sur Oriente, (C) Instalaciones de la cantera, (E) Estadio Olímpico Universitario y campos deportivos, (R) Colonia Romero de Terreros, (CH) Colonia Chimalistac, (ZE) zona central.

### 4.2.3.2 Continuación Analítica Descendente.

La continuación descendente, se emplea para resaltar las fuentes más someras, el software aplica la misma ecuación (4.2) para la continuación descendente, en este caso la distancia máxima donde no se presentaba tantas distorsiones es a 70.10 m, cuando se pasa de este límite empieza notándose distorsiones en el mapa. Con la profundidad de 70.10 m se obtuvo el mapa de la continuación descendente fig. [26], se tomó en cuenta que al realizar este proceso también puede aumentar el ruido, como ocurre cuando se pasa de los 80 m, donde se comenzaba a presentar alteraciones en la forma de la anomalía observada del mapa.

Las anomalías son semejantes en su ubicación, respecto a las encontradas en el mapa de la anomalía residual, el cambio que se observa en el mapa de continuación descendente tiene una apariencia más suave, los altos gravimétricos no aparecen tan marcados.

En la parte Norte de la fig. [26], la anomalía de la colonia Chimalistac de valores más altos (-218 a -214 mgal) se reduce cercano a la anomalía encontrada en la colonia Romero de Terreros (R) con un valor de - 214 mgal, baja hasta parte de la zona escolar rodeando la anomalía con valores bajos con variaciones de -227 mgal a -223 mgal en la parte central (ZE), en comparación con la anomalía residual los valores asociados a la reserva ecológica son más suaves. Respecto al alto gravimétrico que se ubica en la parte Sur, se define las zonas donde se encuentra la reserva ecológica, encontrándose anomalías de valores bajos, y se observa una distribución de las anomalías que puede ser asociado a la colada de basalto del volcán Xitle, los altos gravimétricos que puede estar vinculados a la dirección del flujo que pudo haber tomado la colada de lava, no se define tan claramente como en la parte del residual.

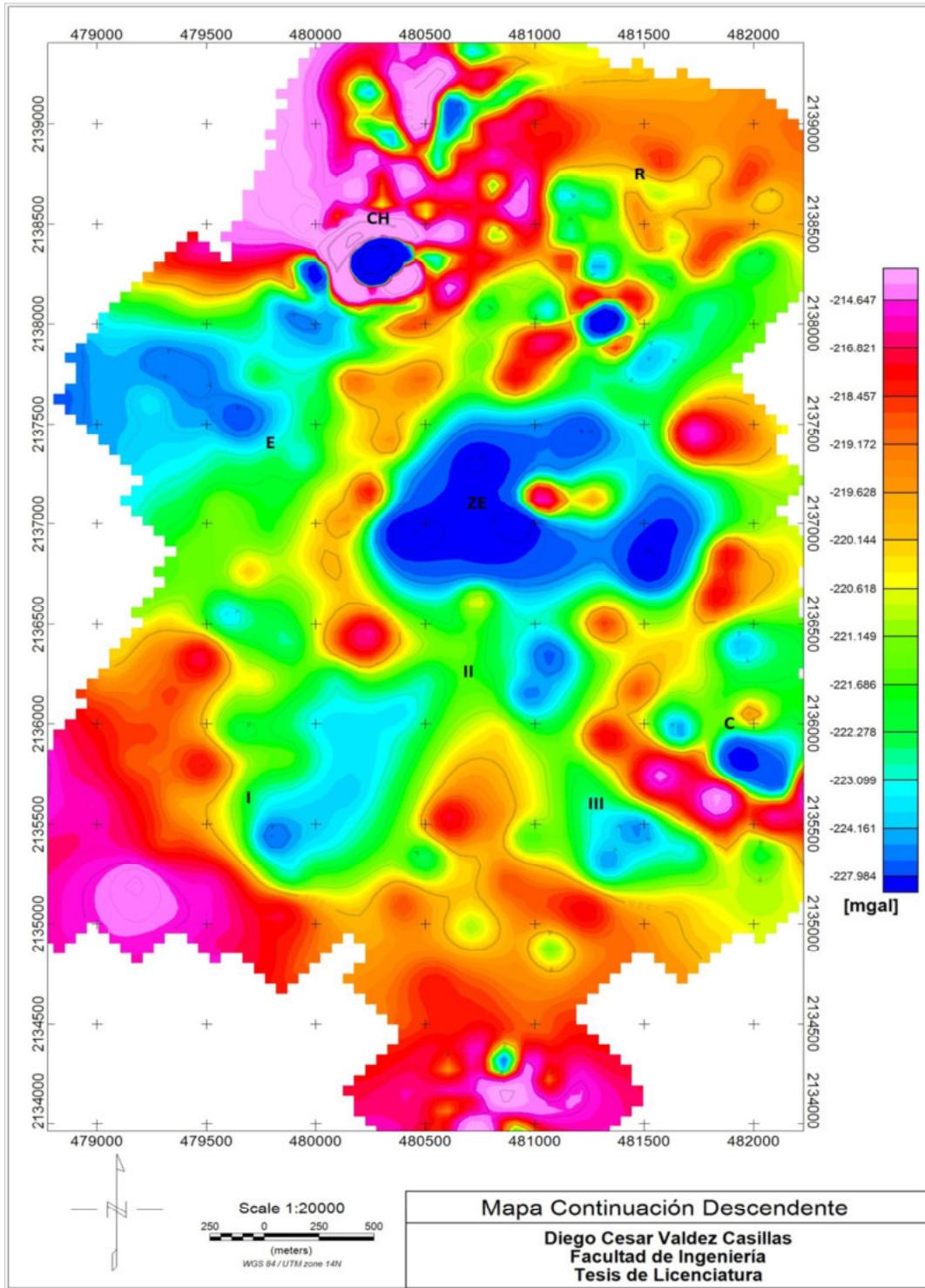


Fig. [26] Mapa Gravimétrico, Continuación Descendente a una distancia de 70.10 m. Donde (I) Núcleo Poniente, (II) Núcleo Oriente, (III) Núcleo Sur Oriente, (C) Instalaciones de la cantera, (E) Estadio Olímpico Universitario y campos deportivos, (R) Colonia Romero de Terreros, (CH) Colonia Chimalistac, (ZE) zona central.

### 4.2.4 Primera derivada vertical datos gravimétricos

La distribución de las anomalías en los mapas de la Anomalía Residual Fig. [24] y en el mapa de la continuación descendente Fig. [26], es similar a las halladas en el mapa de la primera derivada vertical, de la cual su principal característica es acentuar los valores asociados a las anomalías someras, no se observa distorsión en el mapa de la Fig. [27] además de tener las mismas características en su forma que las encontradas en los mapas anteriores. Las anomalías que más destacan son: un bajo gravimétrico encontrado en la parte central del mapa que abarca la parte de la zona Escolar (ZE) y los Institutos de Investigación de forma cerrada. En la región donde se encuentra los núcleos de la reserva ecológica se presentan anomalías con valores bajos de -223 mgal, los cuales tiene forma cerrada.

En la parte norte, en específico la parte NW (CH) es donde las anomalías tienen mayor valor y disminuye conforme la anomalía se desplaza al NE del mapa (R), esto forma un borde que separa los altos gravimétricos de los valores medios de acuerdo con la escala de color. Se puede establecer que la distribución de la parte Sur donde se encuentra más altos gravimétricos recorre ciertas partes hasta llegar al Norte del mapa, si bien la unión de las anomalías esta mejor definida en el mapa residual gravimétrico. Estas anomalías al representar lo más superficial podrían estar asociadas a las coladas de lava del volcán Xitle, por su distribución y orientación.

Al realizar la comparación de los mapas gravimétricos asociados a las fuentes someras, se observan las mismas características en la dimensión y ubicación de las anomalías. Por lo que no es necesaria la aplicación de algún otro método para definir las.

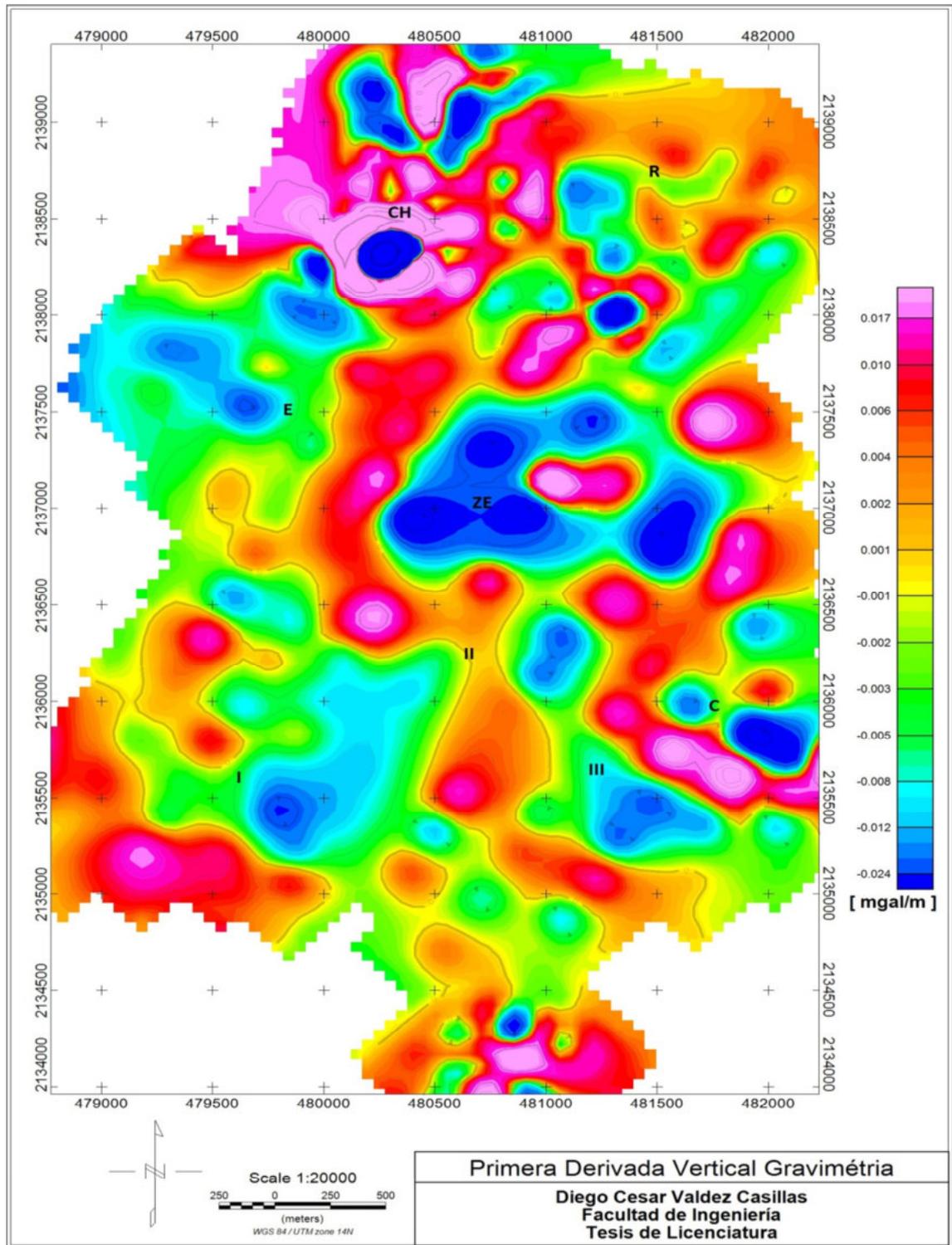


Fig. [27] Mapa gravimétrico, 1<sup>era</sup> derivada vertical. Donde (I) Núcleo Poniente, (II) Núcleo Oriente, (III) Núcleo Sur Oriente, (C) Instalaciones de la cantera, (E) Estadio Olímpico Universitario y campos deportivos, (R) Colonia Romero de Terreros, (CH) Colonia Chimalistac, (ZE) zona central.

### 4.2.5 Mapa de la Anomalía Magnética de Campo Total.

Debido a que la toma de datos fue realizada en diferentes etapas, la malla tuvo características irregulares, para la obtención del mapa correspondiente a la Anomalía Magnética de Campo Total (AMCT). Las correcciones aplicadas a los datos de campo se realizaron en una hoja de cálculo, para posteriormente graficarlos en el programa Oasis Montaj<sup>®</sup>, mediante el método de interpolación por mínima curvatura. Cabe mencionar que en la parte de la colonia Romero de Terreros los datos presentaban una gran cantidad de ruido, se optó por dejarlos fuera del análisis magnético.

El resultado alcanzado se muestra en la fig. [28], la intensidad del campo magnético está medido en [nT] donde los colores más cálidos representan las anomalías con valores altos y los colores fríos las anomalías con valores bajos. Las variaciones más significativas se encontraron en la parte Norte correspondiente a la colonia Chimalistac (CH) (418.4 a 0.3 nT). En la parte central del mapa correspondiente a la zona escolar (ZE) existen diferentes anomalías magnetométricas con valores de -135 a 190.8 (nT).

En la reserva ecológica núcleo poniente (I) hay una variación de 0.3 a 418.4 nT que cubre esta área, los otros dos núcleos (oriente (II) y sur oriente (III)) tienen unos valores de -502 a -698 nT, además de existir una anomalía con valores altos en la Facultad de Ciencias Políticas (CP) de 190 nT, por último en las instalaciones de la cantera (C) del equipo de fútbol de la universidad existe un alto magnético con variaciones de 190 a 418 nT la cual no tiene forma cerrada.

La ubicación y forma de las anomalías pueden variar al aplicar la reducción al polo, pues a diferencia del campo gravimétrico, las anomalías observadas en el presente mapa fig. [28] pueden no estar ubicadas directamente sobre las fuentes que la producen, por lo cual, tendremos que observar que cambios se producen con las anomalías descritas.

Al comparar la anomalía de Bouguer y la Anomalía Magnética de Campo Total se observa que en la parte (CH) es donde los valores más altos se encuentran en ambos mapas y conforme se aleja al NE empieza a disminuir la anomalía, sin embargo, al no incluir los datos de la Colonia de Romero de Terreros por tener mucho ruido en la parte magnética, no se sabe si esta tendencia continúa como sucede en el mapa de la anomalía de Bouguer. En la parte central no se observa una semejanza entre ellos y solamente en los núcleos (II y III) de la reserva ecológica, las anomalías con valores bajos están presentes, además de la distribución de las anomalías con valores altos que parecen unirse se asemejan a las observadas en las anomalías que describen las partes superficiales de la parte gravimétrica.

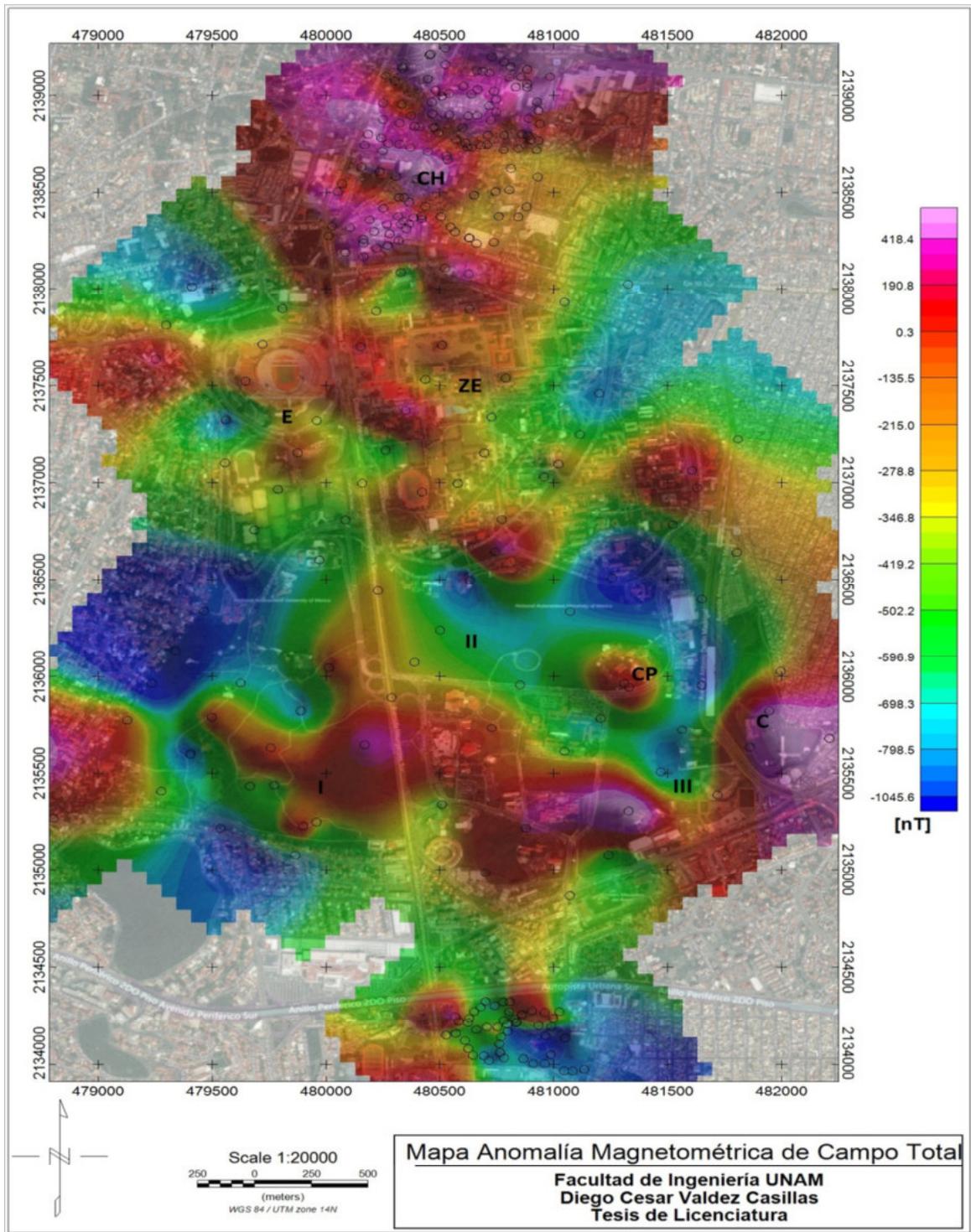


Fig. 28. Mapa Anomalia Magnetométrica de Campo Total. Donde (I) Núcleo Poniente, (II) Núcleo Oriente, (III) Núcleo Sur Oriente, (C) Instalaciones de la cantera, (E) Estadio Olímpico Universitario y campos deportivos, (CH) Colonia Chimalistac, (ZE) zona central, (CP) Facultad de Ciencias Políticas y Sociales.

Para las diferentes técnicas de filtrado se ha usado el programa Oasis Montaj (Geosoft®) mediante el módulo MAGMAP filtering, del cual el procedimiento que se realiza es el mismo que se describe en la parte gravimétrica, para posteriormente poder aplicar los filtros al mapa de anomalía magnética y su interpretación.

### 4.2.6 Reducción al Polo.

El método de reducción al Polo (RTP, por sus siglas en inglés), es aplicado al mapa de anomalía magnética de campo total, con el objetivo de tener la ubicación de las anomalías sobre las fuentes que la producen, siendo una transformación matemática que elimina el efecto bipolar de la anomalía magnética. El procesamiento que realiza el filtro es recalcular los datos de intensidad de campo magnético igual a 90 grados y teniendo una declinación magnética 0 grados, con lo cual se trata de mejorar la respuesta debida a la geometría de los cuerpos que lo originan.

El mapa de reducción al polo es realizado en Magmap, como es descrito en los antecedentes la reducción al polo tiene como objetivo un mapa donde en lugar de tener anomalías dipolares, se obtiene un mapa con anomalía monopoles, la fórmula utilizada por el programa es la siguiente:

$$L(\theta) = \frac{[\text{sen}(I) - I \cdot \cos(I) \cdot \cos(D - \theta)]^2}{[\text{sen}^2(I_a) + \cos^2(I_a) \cdot \cos^2(D - \theta)] \cdot [\text{sen}^2(I) + \cos^2(I) \cdot \cos^2(D - \theta)]} \quad 4.3$$

Si ( $|I_a| < |I|$ ),  $I_a = I$

Donde  $I$  Inclínación magnética, la Corrección de la magnitud de la inclinación (nunca menor que  $I$ ) y  $D$  es la declinación magnética.  $I_a$  donde por default es 20 grados, Si  $|I_a|$  es especificado menor que  $|I|$ , entonces se procede a tomar el valor de  $I$ . (Geosoft®, 2015).

La toma de datos se realizó en varias etapas del 2013-2016, por lo que los valores de declinación e inclinación se obtuvieron de los datos de la página de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA por sus siglas en inglés), los correspondientes valores son para la inclinación de 47.1583°, declinación 5.06484° y IGRF 40672 nT.

La reducción al polo es una forma de remover la distorsión magnética, con la correlación entre los altos magnéticos y sus fuentes. El mapa obtenido después de la aplicación del filtro de reducción al polo se presenta en la fig. [29]. Obsérvese que el cambio en las anomalías magnéticas en comparación del mapa de la Anomalía Magnética de Campo Total fig. [28], define mejor la forma de las anomalías con valores altos.

En el mapa de la RTP fig. [29], en la parte Norte en la colonia Chimalistac (CH) una anomalía con valores de -285.3 a 500.9 nT abarca al NW y disminuye hacia el NE. Los cambios que

más destacan son la distribución de las anomalías magnéticas con valores altos están mejor definidas en comparación del mapa de la anomalía de magnética de campo total.

El cambio más significativo se encuentra en la parte central (ZE) donde la variación promedio es de -190 a 296 [nT]. Comparando con el mapa fig. [28], en la anomalía magnética del campo total, las anomalías de valores más altos se encuentran unidas con dirección Norte.

Los núcleos de la reserva ecológica (poniente (I), oriente (II)) tienen valores medios a altos, el núcleo suroriente (III) se observan valores bajos los cuales se extienden hasta la cercanía de las instalaciones de la cantera (C), con anomalías cerradas de pequeña longitud. En el mapa de la AMCT los valores de las anomalías tienen tendencia que, al aplicar la reducción al polo fig. [29] prevalecieron definiendo la ubicación de anomalías con valores altos en la parte central con dirección NE.

En la parte Oeste, al comparar los mapas de AMCT y la reducción del polo, se distingue una anomalía magnética con una distribución más en dirección W con valores bajos, esta anomalía no tiene forma cerrada, además que bordean la parte central (ZE).

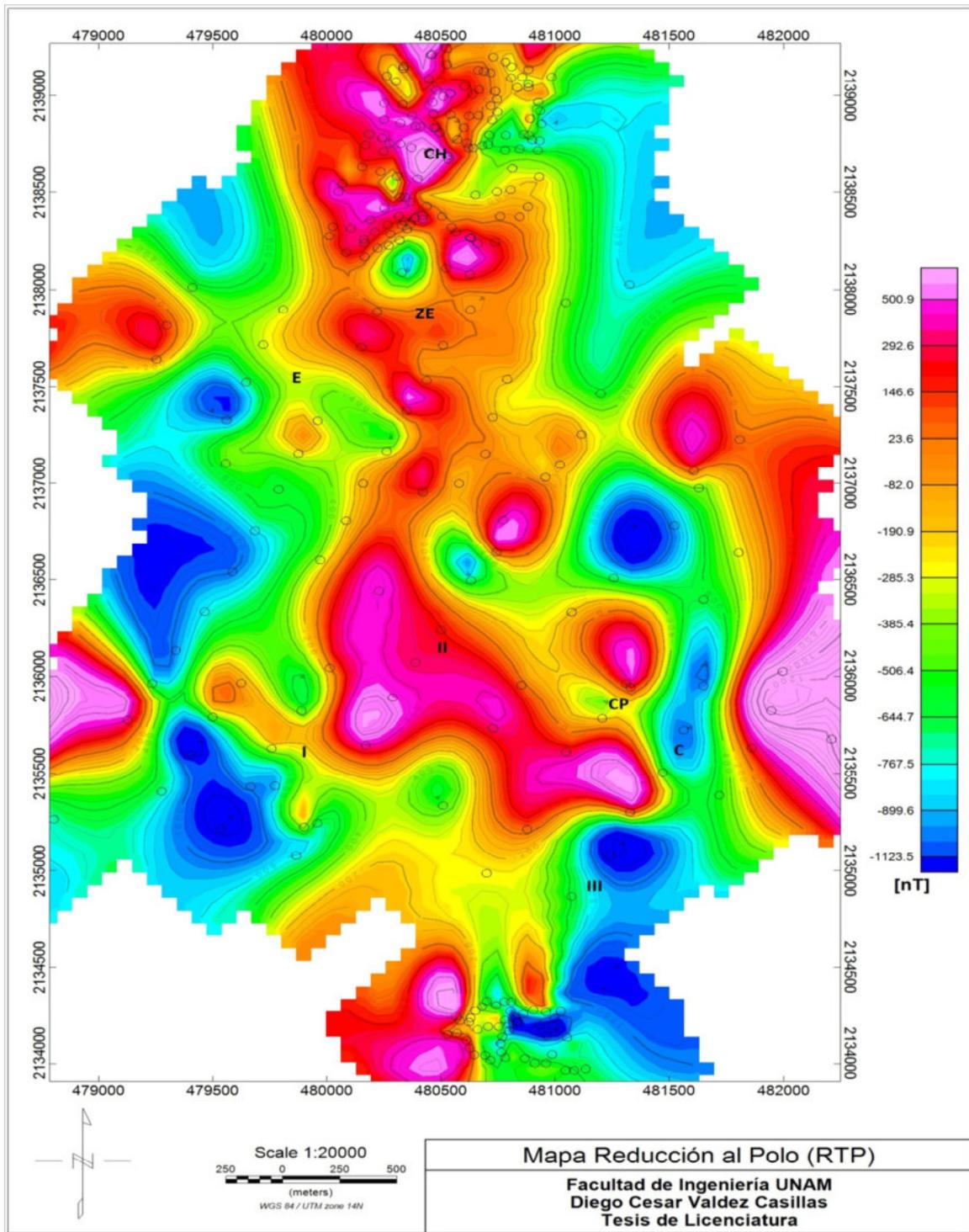


Fig. [29] Mapa Anomalia Magnetométrica RTP (Reducción al Polo). Donde (I) Núcleo Poniente, (II) Núcleo Oriente, (III) Núcleo Sur Oriente, (C) Instalaciones de la cantera, (E) Estadio Olímpico Universitario y campos deportivos, (CH) Colonia Chimalistac, (ZE) zona central.

### 4.2.7 Anomalías Regional/Residual para datos magnéticos

Para el análisis de las anomalías encontradas en el mapa magnetométrico es necesario realizar el procedimiento de separación de las anomalías Regional/ Residual, contribuyendo a la descripción de las fuentes someras/profundas, según sea el caso. Debido a la característica dipolar del campo magnético, es necesario aplicar la reducción al polo para obtener mapas en las cuales las anomalías que se obtengan tengan características con tendencia monopolar, aplicado a las anomalías regional/residual.

El procedimiento para la separación de las anomalías Regional/ Residual también se realizó en el programa Oasis Montaj, la descripción del método de separación de las anomalías es similar al que se menciona en la sección 4.3.2.

#### 4.2.7.1 Anomalía Regional

En este caso se realizó la separación de las componentes regional- residual donde, en la parte regional se acentúan las formas con características de fuentes profundas. En el mapa de la anomalía regional fig. [30], destaca la anomalía que recorre la parte central del mapa, la cual recorre de la parte Sur a Norte, pasando por el núcleo de la reserva (II), la zona central (ZE), terminando en la colonia Chimalistac (CH), con valores que van de 800 a 23.6 nT. En esta región los valores más altos se encuentran en los extremos y en la parte central del mapa (ZE), se observa una distribución homogénea de la anomalía con valores que van de -194 a 146 nT y como se mencionó anteriormente aumenta gradualmente en los extremos.

Al perímetro de estas anomalías con valores altos, las anomalías empiezan a decrecer encontrándose varias anomalías de valores bajos algunas de ellas no tienen forma cerrada, de las cuales destacan dos, una ubicada en las cercanías del núcleo de la reserva ecológica, la cual presenta una forma alargada en un rango de valores que oscilan de -596 a -874 nT y la segunda ubicada al NE del mapa con valores de -321 a -596 nT. Al comparar con la anomalía magnética de campo total, las anomalías que se mantienen es la que se encuentra ubicada entre los tres núcleos de la reserva ecológica, así como las anomalías de componente bajos son las que tienen un incremento, con la desventaja de encontrarse en los bordes del mapa de la anomalía regional.

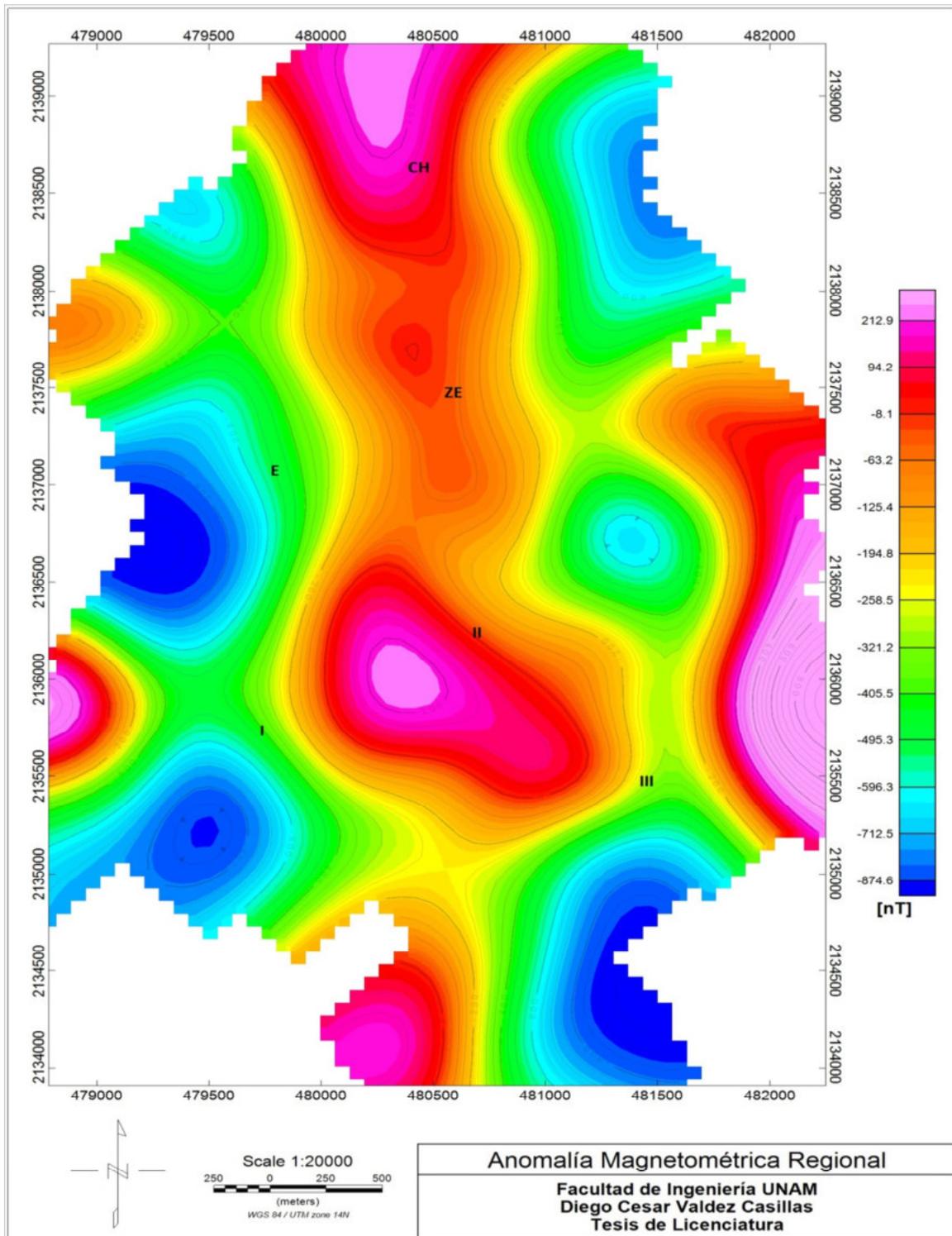


Fig. [30] Mapa Anomalía Magnética, Anomalía Regional. Donde (I) Núcleo Poniente, (II) Núcleo Oriente, (III) Núcleo Sur Oriente, (CH) Colonia Chimalistac, (ZE) zona central.

### 4.2.7.2 Anomalía Residual.

Al igual que en la parte gravimétrica el residual magnético se obtuvo en el programa Oasis con la siguiente ecuación

$$L(r) = e^{-hr} \quad 4.4$$

Donde  $h$  es la distancia en unidades de longitud ascendente al plano de observación y  $r$  es el número de onda (radianes/unidad de longitud). Teniendo una desviación estándar de 0.992, donde las fuentes que se utilizó son de una profundidad media a una somera, dando como resultado la obtención del mapa residual fig. [31], de lo cual se puede interpretar lo siguiente:

En el mapa residual como se observa en la fig. [31] la parte norte las anomalías con valores altos presentan una mayor distribución en el mapa, en la zona de la colonia Chimalistac (CH), la intensidad tiene valores de 471 a 303.2 nT, presentándose también anomalías de extensión pequeña, con forma alargada y algunas regiones con partes más bajas. Al unirse las anomalías con tendencia alta dan cierta forma en lo que podría ser la distribución de las fuentes más someras.

En la parte central (ZE) se observa una distribución con variaciones de valores de intensidad magnética de altos a medios, estos valores están asociados a la zona escolar. Las anomalías relacionadas a los núcleos de la reserva ecológica (I, II, III) presentan anomalías de valores medios a valores altos en un rango de 26.1 a 471 nT, estas anomalías están ligadas, con lo cual podría representar la distribución que recorrió la colada de lava del volcán Xitle. En la zona SE-E se encuentra enlazadas anomalías con valores bajos que van desde (III) bordeando CP con valores de -569 a -235 nT. Se observa la distribución de las anomalías con característica alta en la parte central del mapa y algunas anomalías de valores bajos que se pueden asociar a fuentes someras.

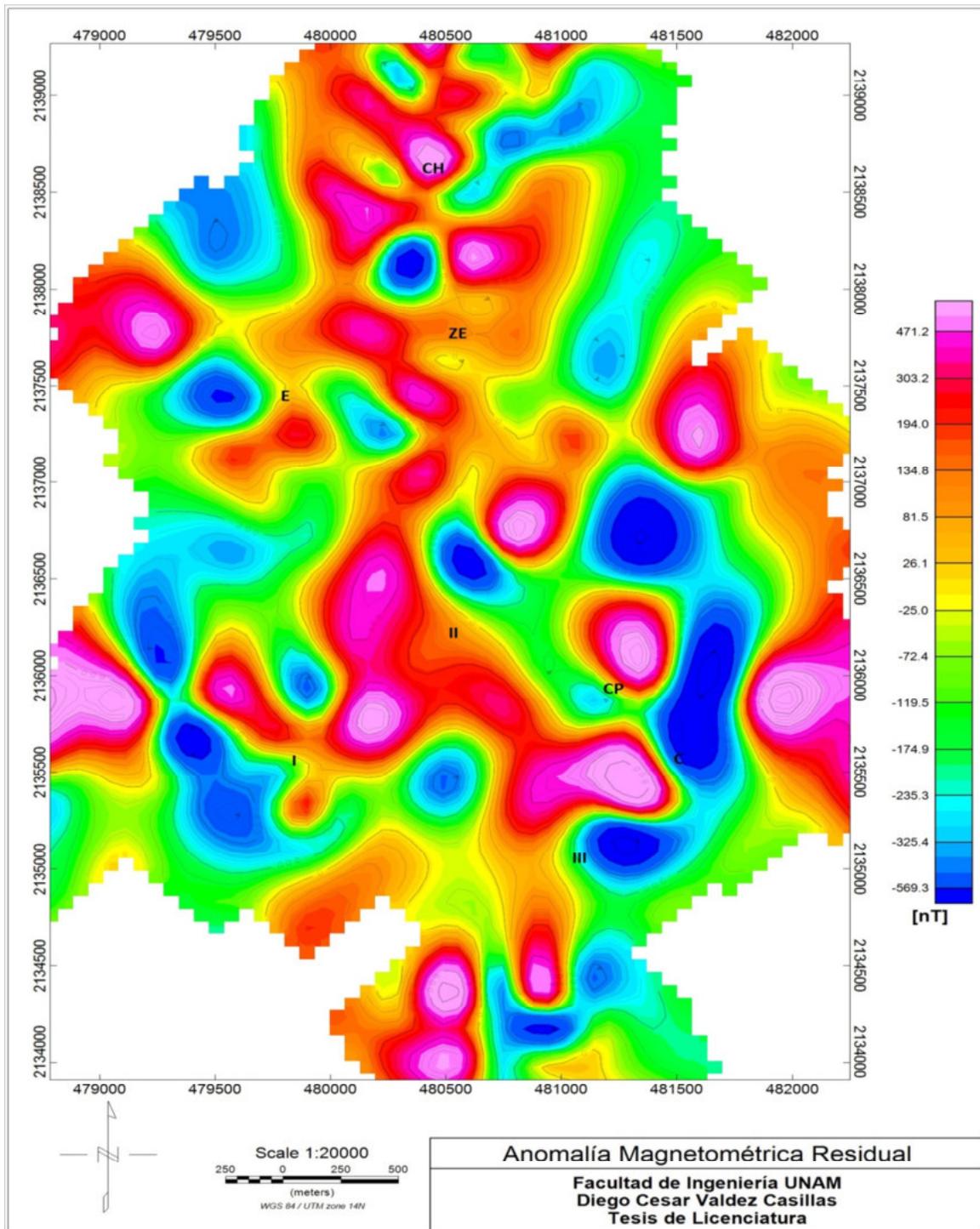


Fig. [31] Mapa Anomalía Magnética, Anomalía Residual. Donde (I) Núcleo Poniente, (II) Núcleo Oriente, (III) Núcleo Sur Oriente, (C) Instalaciones de la cantera, (CH) Colonia Chimalistac, (ZE) zona central.

### 4.2.8 Continuación Ascendente/Descendente para datos magnetométricos

Las anomalías magnéticas fueron obtenidas con el mismo procedimiento de la anomalía gravimétrica en el software Oasis. En primer lugar, se obtuvo la continuación ascendente, y posteriormente la continuación descendente.

La distancia que se escogió es para la continuación ascendente fue de 274.5 m por ser donde las características de las fuentes de origen profundo se acercaban al valor máximo obtenido en el análisis espectral. Como se observa en el mapa de la Continuación Ascendente fig. [32], resaltan las mismas características encontradas en el mapa de la anomalía magnética regional, a continuación, se describen las mismas:

Las anomalías encontradas en la parte norte (CH) con valores de 33.7 a -101.18 nT, la cual se une con la parte central con una distribución (ZE) de -101 a -167.6 nT, los núcleos de la reserva en las regiones (II y III), son los tienen los valores de -536.1 a -341.5 nT, siendo que la anomalía en la parte central se enlaza con el alto magnético que se encuentra en la parte E.

La continuación ascendente al aplicarla disminuye la incidencia de las fuentes más someras resaltando aquellas que tienen características profundas. Al realizar la comparación del regional magnetométrico fig. [30] y la continuación ascendente fig. [32], se presentan algunas pequeñas diferencias, el alto magnético que se ubicaba al S-SE del mapa, se liga con la anomalía encontrada en el centro del mapa, además la anomalía de forma circular que se encuentra al centro tiene valores medios. Por lo demás la forma de las anomalías es similar, resaltando en la continuación ascendente la parte central.

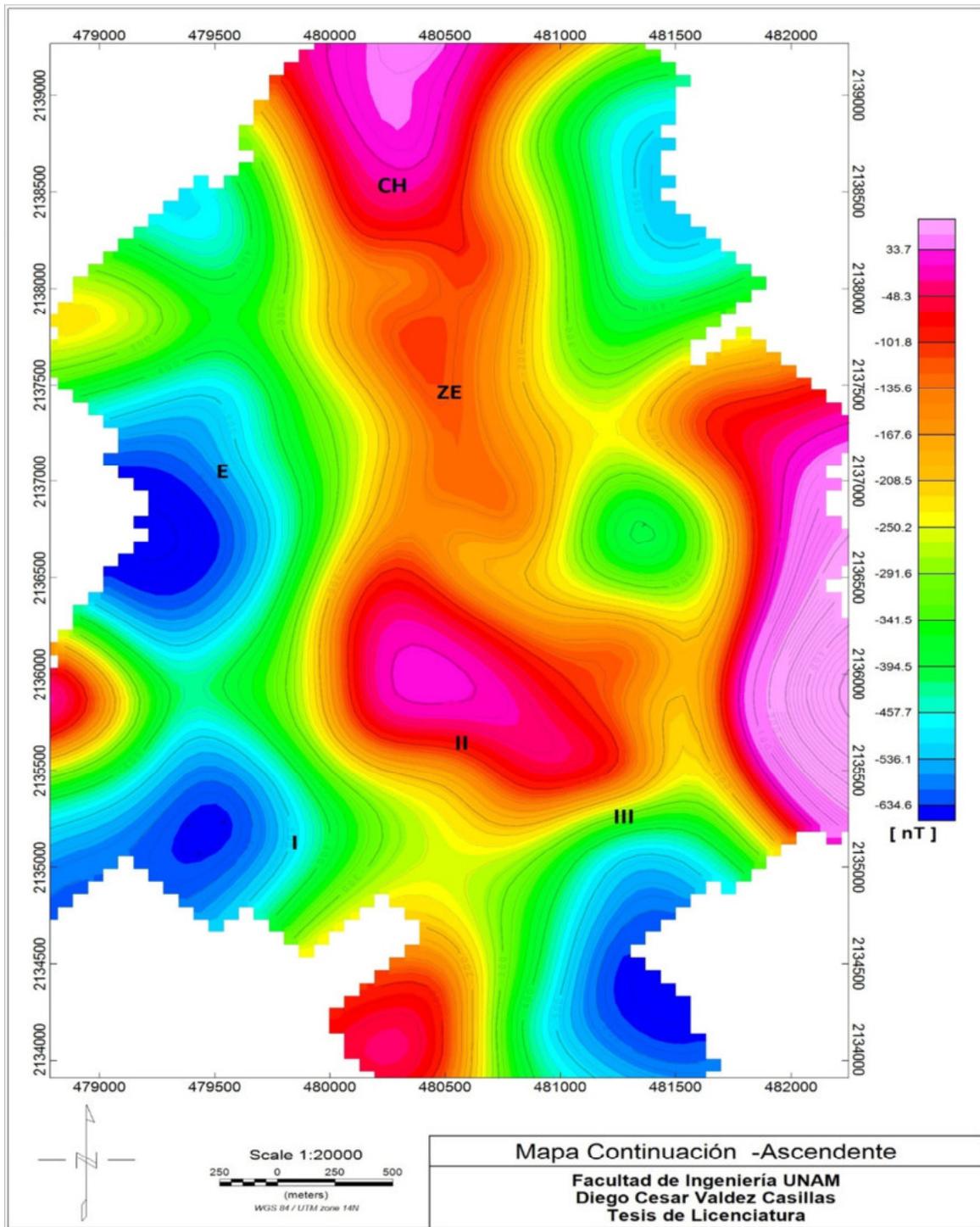


Fig. [32] Mapa Anomalía Magnetométrica, Continuación Ascendente, con una distancia de 274.5 [m]. Donde (I) Núcleo Poniente, (II) Núcleo Oriente, (III) Núcleo Sur Oriente, (CH) Colonia Chimalistac, (ZE) zona central.

En cuanto al mapa de la continuación descendente, el mapa obtenido fig. [33] la distancia que se utilizó para realizar la continuación descendente fue de 72.55 m, era la que presentaba menores distorsiones, pasando este punto se encontraba más afectado por el ruido. Como el objetivo son las fuentes más someras, como pueden ser las coladas de lava del Xitle, en ese caso representa las anomalías con tendencia más superficial, para tener una mejor descripción de estas se realizó la aplicación de diferentes filtros para su respectiva descripción. Las anomalías encontradas en la continuación descendente son similares a las ubicadas en el mapa residual magnetométrico fig. [31]. Las características que cambian son en la parte Norte (CH) los valores de la anomalía aumentaron, así como el área que cubren en comparación con el mapa residual.

Con respecto a la parte central abarcando el núcleo (I) de la reserva ecológica, la anomalía tiene el mismo aspecto disminuyendo sus valores, esto puede deberse a las características del filtro, así como la profundidad en que se aplicó la continuación descendente, cabe mencionar que como se comentó anteriormente más allá de la profundidad de 72.55 m el mapa empezaba a presentar distorsiones

Por lo que para comparar las anomalías asociadas a las componentes residuales es necesaria la aplicación de otros filtros como puede ser la 1ª derivada vertical y la señal analítica para observar las semejanzas entre ellas para una descripción general de las anomalías someras presentes en el área de estudio.

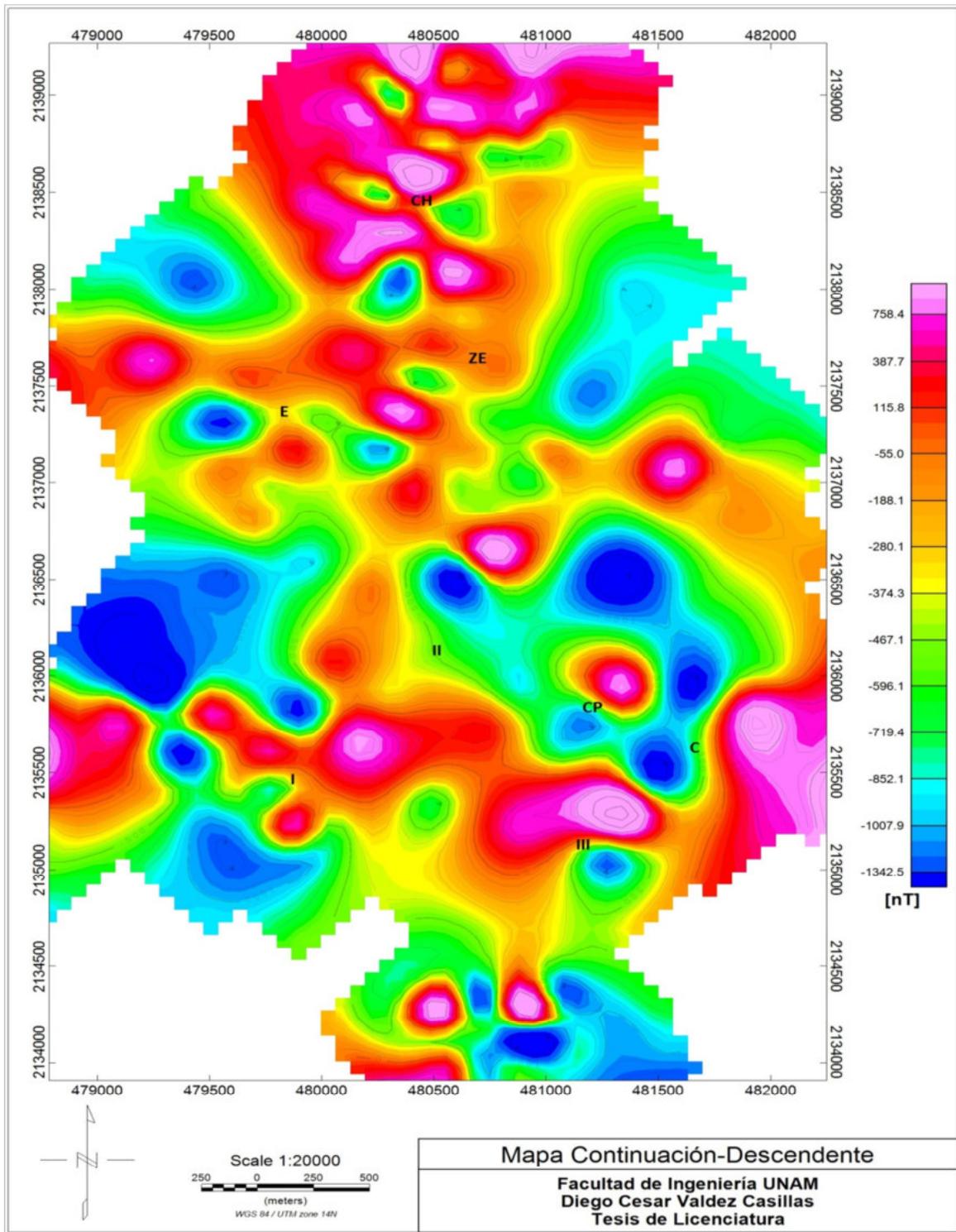


Fig. [33] *Mapa Anomalia Magnetométrica Continuación Descendente distancia 72.55 m. Donde (I) Núcleo Poniente, (II) Núcleo Oriente, (III) Núcleo Sur Oriente, (C) Instalaciones de la cantera, (CH) Colonia Chimalistac, (ZE) zona central.*

### 4.2.9 Derivada vertical.

La aplicación de la primera derivada vertical en este caso se utilizó como complemento de los mapas residual y continuación descendente, para tener una mejor certeza de la ubicación de las fuentes someras existentes en el mapa.

La derivada vertical (gradiente vertical), es un buen método para resolver anomalías de intensidad magnética total cuando se suprime los datos con contenido regional. (Fairhead, 2004), y debido al objetivo de tener un mejor detalle de las fuentes de carácter superficial para su descripción es útil emplear la primera derivada vertical. En la aplicación MAGMAP la derivada en dirección z está dada por la siguiente ecuación:

$$L(r)=(r)^n \quad 4.5$$

Donde n es el orden de diferenciación y r es el número de onda (radianes/unidad de longitud), siendo  $r=2\pi k$  y k está en ciclos/unidad de longitud.

La aplicación de la derivada vertical en los datos magnéticos se emplea para mejorar la resolución de las fuentes geológicas superficiales, por lo que se aplicó el filtro de derivada vertical de primer orden en la malla de la anomalía magnética reducida al polo, obteniendo el mapa de la primera derivada vertical fig. [34], del cual podemos realizar la siguiente descripción:

En la parte norte se mantiene la anomalía con una distribución entre pequeños bajos magnéticos alrededor de los altos magnéticos. Como en las descripciones anteriores este alto magnético se desplaza al W y a la parte central (ZE) del mapa donde se observa anomalías de valor medio y algunas con valores más bajos de menor extensión, como se observaban en el mapa residual. En las instalaciones de la cantera (C) se emplaza un bajo magnético sobre esta región, el cual rodea la zona definida como CP. En los dos primeros núcleos de la reserva (I y II) los valores obtenidos son de valores medios a altos, en el núcleo ubicado más al sur la tendencia es de una anomalía con valores más altos (III) rodeada de anomalías con tendencia más baja.

Al comparar la respuesta referente a las anomalías someras, la 1ª derivada vertical tiene semejanza con el regional magnético, las locaciones son similares, siendo que en la 1ª derivada vertical las anomalías ubicadas en la parte Norte tiene mayor distribución que en los mapas anteriores, además se observa una forma con las anomalías con tendencia al Norte y que empieza disminuir en la región NE, la parte central tiene las mismas características donde se observa una distribución de las anomalías con valores altos a lo largo del mapa.

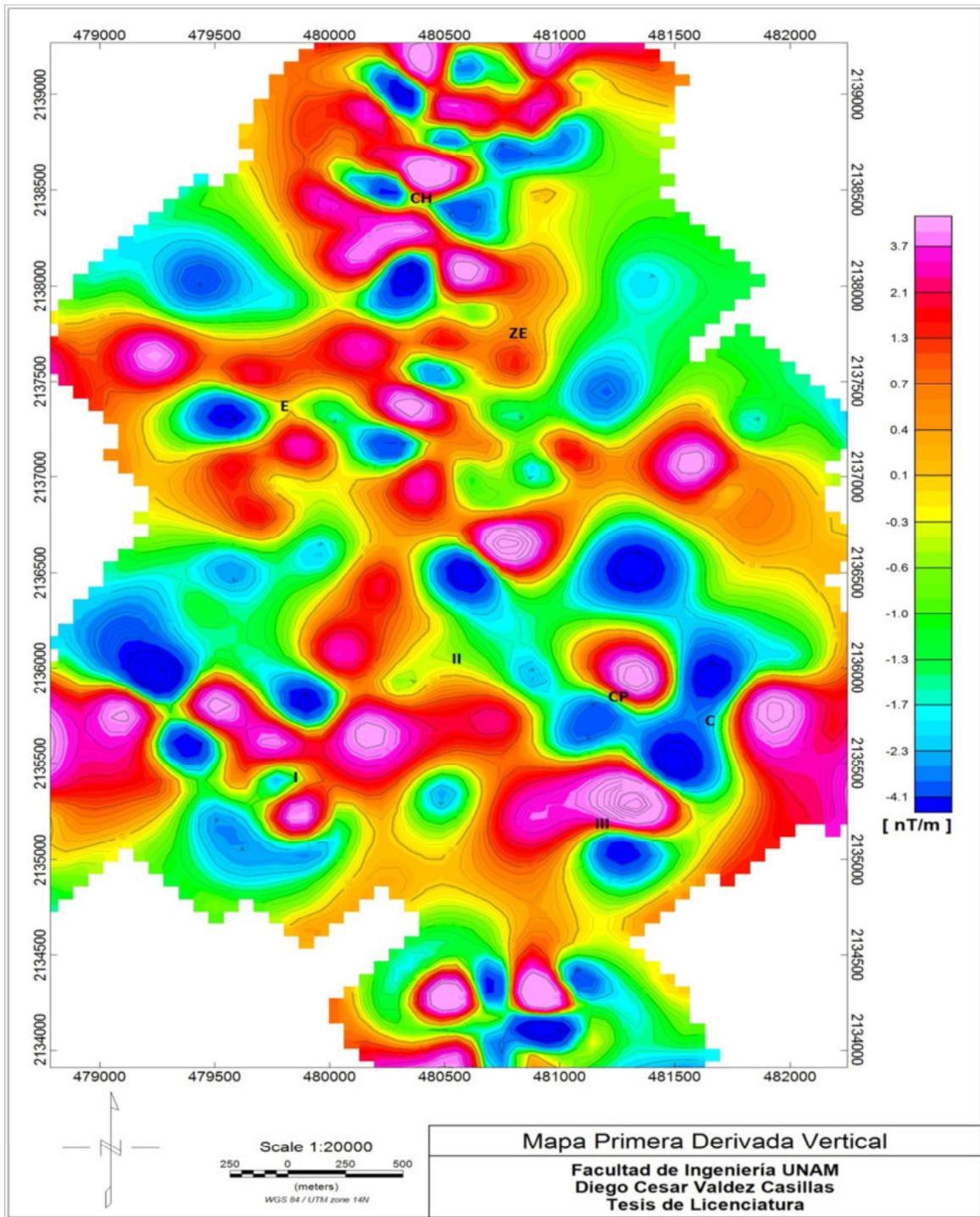


Fig.34 Mapa Anomalia Magnetometrica, Primera Derivada Vertical. Donde (I) Núcleo Poniente, (II) Núcleo Oriente, (III) Núcleo Sur Oriente, (C) Instalaciones de la cantera, (E) Estadio Olímpico Universitario y campos deportivos, (CH) Colonia Chimalistac, (ZE) zona central.

### 4.2.10 Señal Analítica.

La señal analítica incorpora otra forma de análisis para la componente residual, debido a que, al aplicar este método, hace que la respuesta magnética del cuerpo no dependa de la dirección de la magnetización, con lo cual se podría tener una mejor descripción de los cuerpos causantes de las anomalías someras.

En el mapa fig. [35], la escala de color asociada presenta valores de 8.5 (colores fríos) a 0.9 nT/m (colores cálidos). Se observa en la parte norte, una anomalía de valores altos ubicada en la colonia Chimalistac (CH), con valores violetas la cual llega hasta la parte NE del mapa, esta anomalía también se puede asociar a una zona donde se presenta algunos afloramientos de basalto.

En la parte central (ZE) las anomalías son de valores medios a bajos, en los cuales se observa el aspecto de las anomalías, una de ellas ubicada en la parte de la zona escolar donde la anomalía parece presentar una similitud al desplazamiento que debió haber presentado el flujo de lava, y a un costado se presentan valores más bajos.

Los núcleos Poniente (I) y Sur - Oriente (III) de la reserva ecológica parecen conectados por medio de una anomalía con valores de 8.5 a 2.8 nT/m, el núcleo oriente (II) tiene valores de 3.1 a 1.4 nT/m, presentándose una región donde las anomalías son menores a las ubicadas a su alrededor.

En el mapa de señal analítica, las anomalías son similares en ubicación a las encontradas en el residual y 1ª derivada vertical, las extensiones de las anomalías cambian un poco a los hallados en los mapas anteriores. Así, al comparar los mapas de anomalía residual, continuación descendente y 1ª derivada vertical, se puede observar los contornos de las anomalías, y es posible utilizarlo como complemento para el trazado de las secciones para realizar el modelado.

Se puede observar que algunas anomalías tienen la misma ubicación, cambiando solamente su longitud y magnitud, lo cual puede deberse según sea el caso a las características del filtro aplicado en cada mapa. Lo que se puede observar es un contorno que abarca gran parte del mapa, y ubicado al NE las anomalías tienen una reducción, así también cercano al núcleo II de la reserva ecológica. Al comparar el mapa residual gravimétrico con la señal analítica, algunas regiones donde se localizan las anomalías con tendencia alta son similares y en la parte central también encontrándose anomalías de tendencia baja.

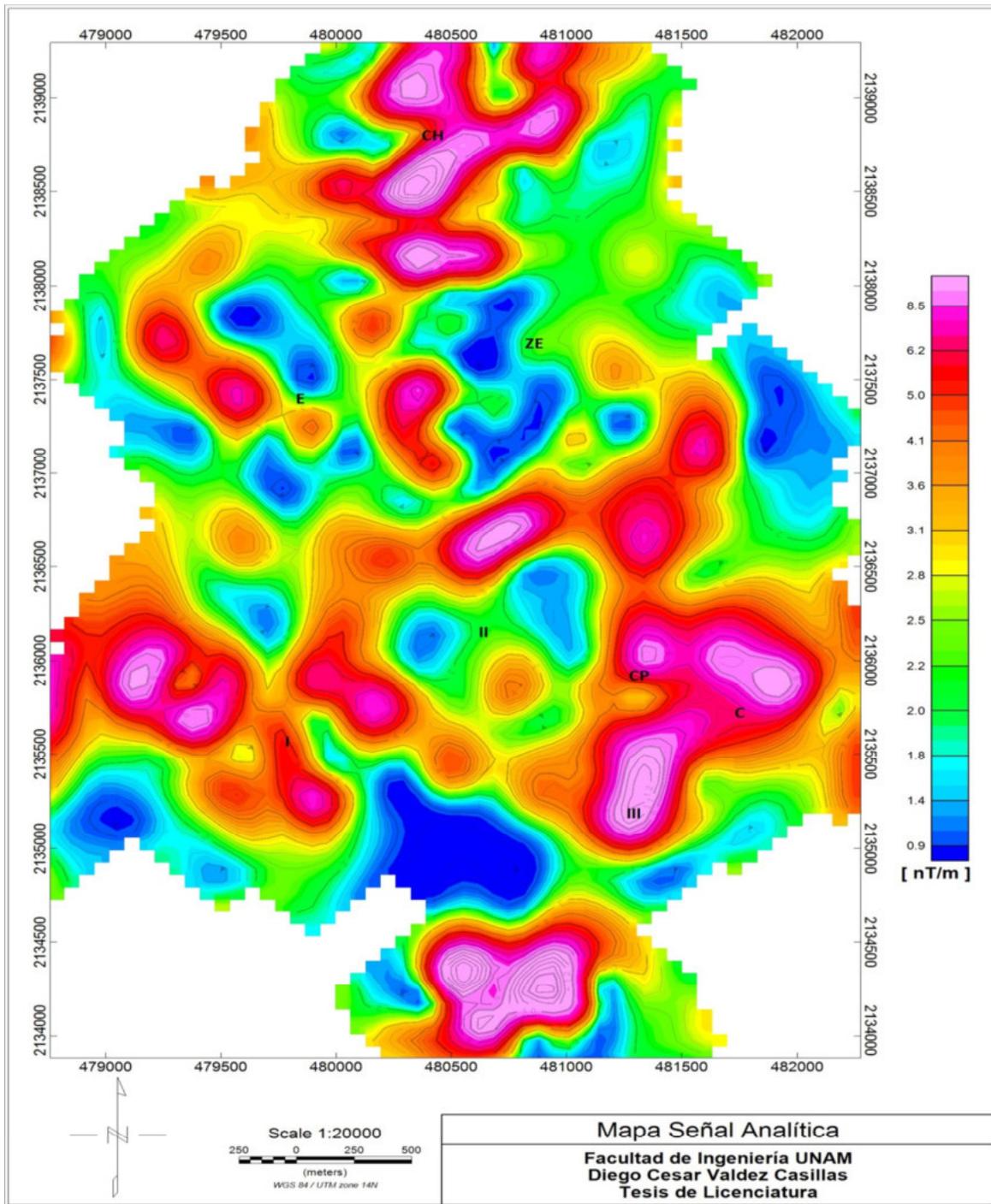


Fig. [35] Mapa Anomalia Magnetométrica, Señal Analítica. Donde (I) Núcleo Poniente, (II) Núcleo Oriente, (III) Núcleo Sur Oriente, (C) Instalaciones de la cantera, (E) Estadio Olímpico Universitario y campos deportivos, (CH) Colonia Chimalistac, (ZE) zona central, (CP) Facultad de Ciencias Políticas y Sociales.

### 4.3. ANÁLISIS ESPECTRAL

Para la realización del análisis espectral en la parte gravimétrica se utilizó la anomalía de Bouguer. El proceso con el que se obtuvo el espectro fue por medio del programa Oasis Montaj, obtenido de la opción Spectrum Calculation and Display, el cual despliega el espectro de potencia de la malla procesada para este fin.

Los datos obtenidos fueron exportados a Excel, donde se desplegaron los datos y se procedió al cálculo de las pendientes del espectro de potencias, para un posterior ajuste lineal por medio de mínimos cuadrados.

Al graficar el espectro, la gráfica Ln (Potencia) vs Número de onda, fig. [36], se define varias pendientes que pueden ser considerados como diferentes profundidades, la primera parte corresponde a fuentes profundas (en azul), la siguiente pendiente una zona intermedia (en rojo), una tercera pendiente a fuentes someras (en verde), la última parte en algunas ocasiones está relacionada con ruido.

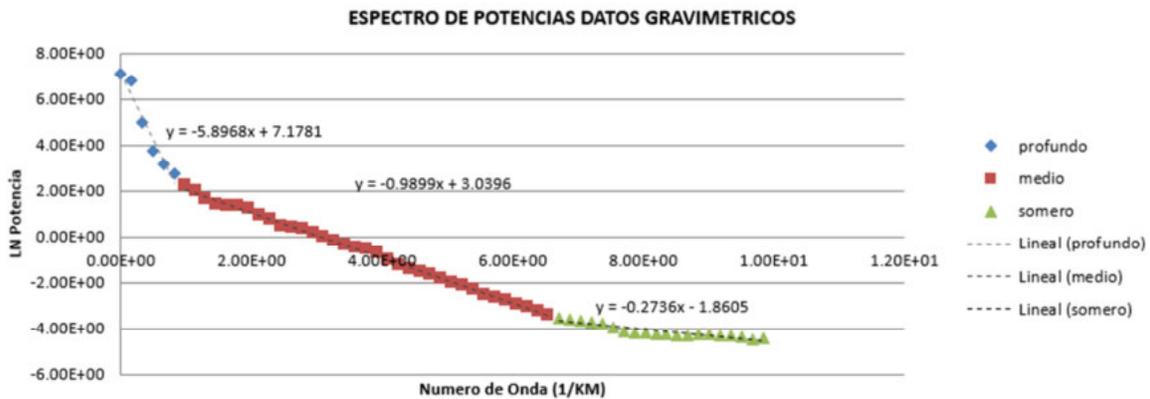


Fig. [36] Espectro de potencias-gravimétricos del cual se obtiene la pendiente “m” para encontrar la profundidad de las fuentes por medio de la ecuación  $z = -\frac{m}{4\pi}$

De los datos obtenidos del mapa de anomalía de Bouguer Completa Tabla [4], podemos interpretar que el número de onda curva azul con una pendiente de 5.8968 se encuentra la respuesta a la fuente gravimétrica profunda. La profundidad obtenida de la ecuación  $z = -\frac{m}{4\pi}$ , nos da un valor de 0.4625 Km, el siguiente intervalo de la curva roja con pendiente 0.9899 correspondiente a la respuesta de la fuente gravimétrica en una profundidad media, con una profundidad de 0.07877 Km, por último, del intervalo que corresponde a una fuente somera con una pendiente 0.27736, se obtiene una profundidad de 0.02177 Km.

TIPO DE FUENTE	PENDIENTE	PROFUNDIDAD [km]	PROFUNDIDAD [m]
PROFUNDA	5.8968	0.46252	469.25
MEDIA	0.9899	0.07877	78.77
SOMERA	0.2736	0.02177	21.77

Tabla [4]. Profundidades datos gravimétricos, obtenidas del análisis del espectro de potencias

Análisis espectral para los datos magnetométricos. Para el análisis espectral correspondiente a los datos magnetométricos, el espectro radial se obtuvo de la RTP por siglas en inglés, debido a que es el mapa donde se considera que las fuentes del filtrado tienen una característica similar a un polo, como suele suceder en la parte gravimétrica. Como se observa en la figura [37], la gráfica Ln (Potencia) vs Número de onda, la curva no aparece tan pronunciada como en el caso del espectro de potencias para la parte gravimétrica, dividiendo la misma en tres pendientes para las fuentes profundas (color azul), media (color rojo) y somera (color verde).

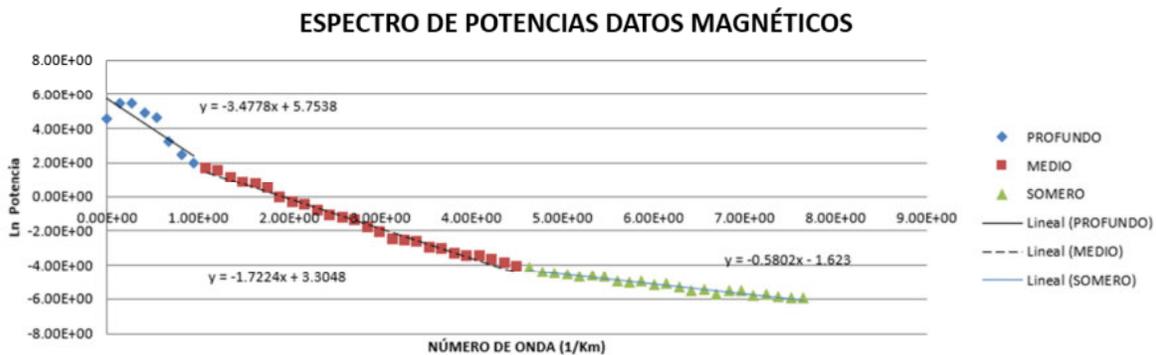


Fig. [37] Espectro de potencias- Magnético, del cual se obtiene la pendiente “m” para encontrar la profundidad de las fuentes por medio de la ecuación  $z = -\frac{m}{4\pi}$

Del análisis de los resultados obtenidos en la Tabla [5] podemos decir que el número de onda presente en el estudio presenta las siguientes características del intervalo de 0 a 1, que corresponde a la respuesta de la fuente profunda en un rango de 0.27675 Km, el intervalo del número de onda que va del rango de los 1 a 4.5 corresponde a la respuesta de las fuentes de una profundidad media en un rango de 0.1370 Km, por último existe en el intervalo del número de onda que va de los 4.5 a 8, como consecuencia de las fuentes someras encontradas a la profundidad de 0.04617 km. La profundidad como en el caso de los datos gravimétricos fue obtenida con la ecuación  $z = -\frac{m}{4\pi}$ , esto nos da referencia acerca de la respuesta de las fuentes, debido al rango que se obtiene con el número de onda.

TIPO DE FUENTE	PENDIENTE	PROFUNDIDAD [km]	PROFUNDIDAD[m]
PROFUNDA	3.4778	0.27675	267.75
MEDIA	1.7224	0.13706	137.06
SOMERA	0.5802	0.04617	46.17

Tabla [5]. Profundidades para los datos Magnéticos, obtenidas del análisis espectral de potencias

### 4.4. MODELADO

Con los mapas obtenidos de las partes gravimétrica y magnetométrica, puede realizarse una descripción de las características en la zona de estudio. Esto se complementa con el proceso de modelación, donde, las anomalías gravimétricas y magnetométricas son utilizadas para generar un modelo teórico que se aproxime a la respuesta provocada por las anomalías del subsuelo en el área de estudio.

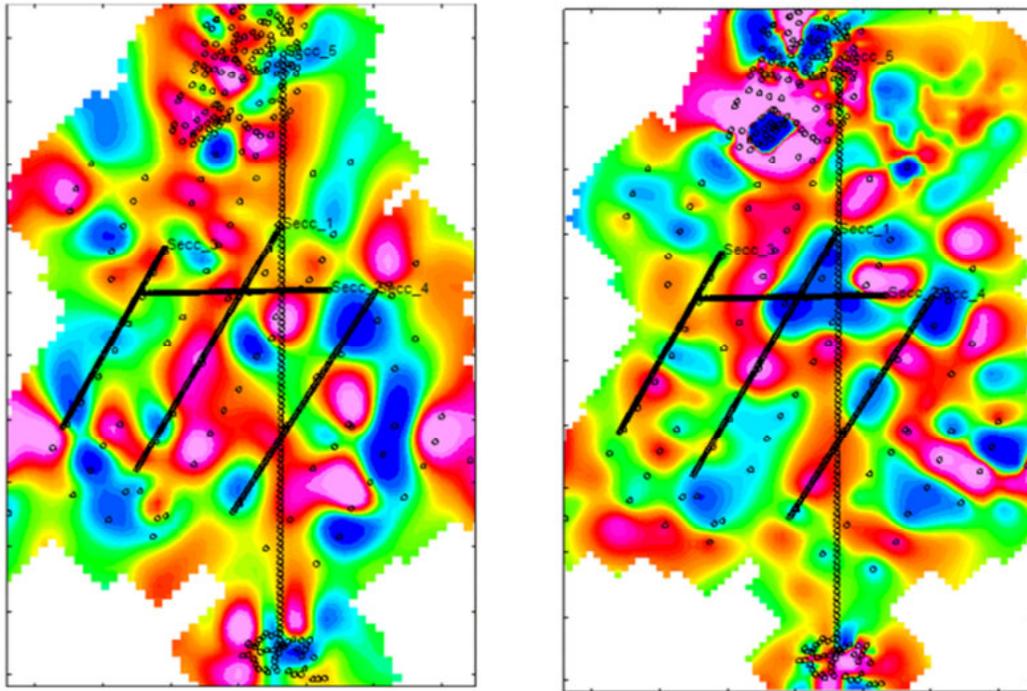
El modelado describe las características de los cuerpos, como son la profundidad, dimensiones, asistido de las propiedades de las rocas como son densidad y susceptibilidad magnética. El proceso para realizar el modelo en ambos métodos potenciales es muy parecido, teniendo como única diferencia la naturaleza del campo magnético que al ser dipolar se tiene que agregar otras variables como el valor del campo magnético, así como la inclinación y declinación.

En la modelación directa para los datos gravimétricos y magnéticos, se traza un perfil de acuerdo con la distribución de las estaciones y se visualiza la gráfica correspondiente a la anomalía observada. Posteriormente, se crea un modelo geológico idealizado, puesto que varían los parámetros (densidad o susceptibilidad magnética), creando una anomalía calculada, estos dos perfiles (calculado y observado) son comparados, si no hay similitud entre ellas, son ajustadas hasta que ambas sean afines.

Para realizar la modelación directa, se utilizó la extensión GM-SYS del programa Oasis Montaj®, donde es posible modelar las anomalías gravimétricas y magnéticas. En el proceso de modelación se utiliza los métodos de Talwani et al., 1959 y Talwani y Heirtzler (1964), así como la aplicación de los algoritmos descritos en *Won y Bevis (1987)*, los cuales modificaron un algoritmo en el que se realiza el cálculo de la aceleración gravitacional debido a un polígono, aplicando la relación de Poisson para usarse en las expresiones de la aceleración gravitacional correspondiente a un polígono, así también obtuvieron un segundo algoritmo para calcular la anomalía magnética debida a un polígono magnetizado por un campo externo (*GM-SYS, User's Guide, 2004*). GM-SYS utiliza un algoritmo para la rutina de inversión de Marquardt, para linealizar e invertir los cálculos, estos algoritmos son usados para datos magnéticos y gravimétricos.

Como referencia de los antecedentes presentados en la parte 2.1.4, los estratos más superficiales pueden estar relacionados con rocas andesíticas y basáltica, además de estratos de composición de tobas, brechas y en algunos casos depósitos lacustres o aluviales. Así, también Delgado (1998), menciona que el material encontrado es predominantemente lava basáltica. Basado en los estudios realizados por Petróleos Mexicanos, la perforación más cerca al área de estudio es el pozo Copilco -1, de una profundidad de 2258 m, en la Fig.[12] se muestra las rocas encontradas en las diferentes unidades, en el pozo Copilco -1 con una composición de tobas volcánicas, flujos de lava, brechas y conglomerados, se puede considerar al pozo Copilco -1 como base de la litología que puede encontrarse, lo cual puede variar en algunos perfiles al no hallarse en las cercanías del mismo.

Para el trazado de los perfiles, como se plantea en la figura [38], se muestra la disposición para ambos mapas potenciales. Los mapas que se utilizaran para la realización de los modelos gravimétricos y magnetométricos son de fuentes someras, de esta manera se utilizó los mapas que destacan esta característica, con lo cual para ambos métodos potenciales se utilizara los mapas residuales. La disposición de los perfiles está dado por el lugar donde se encuentran las estaciones ubicadas en la parte de C.U., además de presentarse algunas anomalías que se consideraron de interés debido a su extensión y forma, considerando en mayor medida la parte central de ambos métodos potenciales.



*Fig. [38] Se muestra los cinco perfiles sugeridos, en los mapas residual gravimétrico (parte derecha) y mapa residual magnetométrico (parte izquierda), tres de ellos con orientación SW-NE, el otro con*

*orientación W-E y un último con orientación S-N, los cuales cubren las anomalías más importantes. Los cuales cubren la parte central del mapa.*

Los resultados del análisis espectral en ambos métodos potenciales dieron como resultado profundidades que variaban, en el caso de las fuentes profundas de 469.25 m en la parte gravimétrica y en un rango de 270 m en la parte magnetométrica, las anomalías someras ubicadas en una profundidad de 46 m en la parte magnetométrica y en la parte gravimétrica de 21.77 m. Además de la información de los estudios del pozo Copilco -1, con las cuales se propuso características de densidad e intensidad magnética para los estratos. De lo cual puede establecer que la parte gravimétrica está asociada a fuentes más profundas en comparación con los resultados obtenidos en la parte magnetométrica.

Con esta información se propuso para el análisis de la zona de Ciudad Universitaria 5 secciones tomando como límites para la profundidad del modelo las aproximaciones de los resultados obtenidos del análisis espectral. Los tres perfiles con orientación SW-NE, en la parte gravimétrica atraviesan altos gravimétricos que se ubican en dos de los núcleos de la reserva ecológica, además de la anomalía de valores bajos ubicado en el centro del mapa, respecto a la parte magnetométrica los perfiles cruzan en su mayoría anomalías con valores altos. La sección W-E atraviesa de forma horizontal la anomalía con valores bajos en la parte gravimétrica, en la parte magnetométrica atraviesa las anomalías de valores altos de los núcleos de la reserva ecológica y dos bajos magnéticos ubicados al E del mapa. Y por último la sección S-N es la más larga de los cinco perfiles el cual atraviesa todo el mapa cruzando la parte central de Ciudad Universitaria.

Con esta información se propuso los siguientes modelos para la descripción de las características encontradas en el proceso del modelado, a continuación, se presenta una descripción de cada sección:

#### 4.4.1 Primera sección

Las características en común en ambos perfiles son las siguientes: una longitud de 1870 m, con una orientación de SW-NE la cual abarca sitios como son el núcleo Poniente (I) de la reserva ecológica, el núcleo Oriente de la reserva ecológica (II) y la parte central de la zona escolar Fig. [39]. Altitud mayor en la parte SW disminuyendo conforme el perfil se situaba a la parte noreste. Las variaciones de las anomalías en cuanto a la parte magnética se encontraban en un rango de 514 nT a -440 nT, y en la parte gravimétrica la variación del perfil ronda los 2.75 mgal a -2.95 mgal. Del mapa residual magnetométrico el perfil cruza al inicio una anomalía con valores bajos, posteriormente una anomalía con valores altos la cual disminuye conforme se dirige al NE. En el mapa residual gravimétrico empieza en una zona con valores donde la anomalía tiene valores de bajos a medios, posteriormente hay un incremento en la anomalía, llegando a cruzar en forma diagonal la anomalía de valores bajos que se encuentra en el centro del mapa.

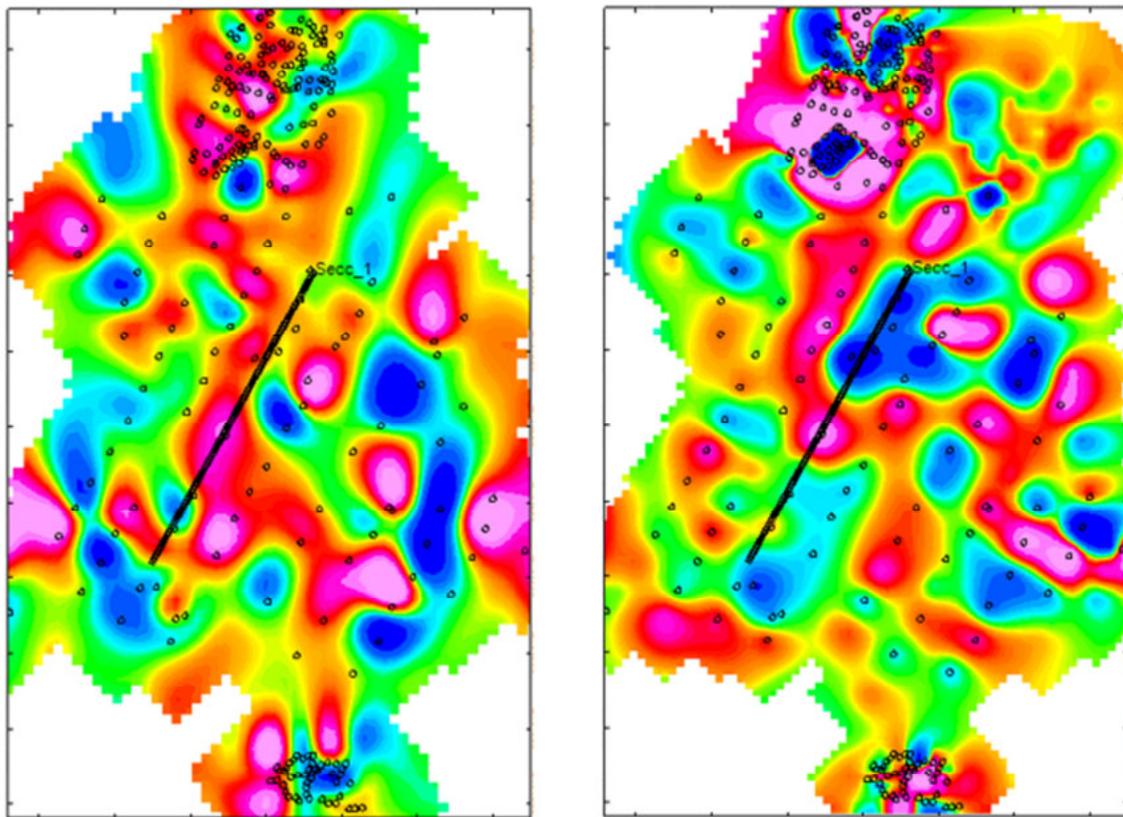


Fig. [39] Se muestran a la izquierda el mapa residual magnetométrico y en la derecha mapa residual gravimétrico, en ambos casos trazado el primer perfil con orientación SW-NE, para su descripción se dividió en 3 secciones, las cuales cruzan diferentes anomalías.

Para el modelo se consideró la cantidad de 4 unidades y un basamento. Tomando la altitud de 2300 m.s.n.m. hasta una profundidad de 1840 m. Un rango de variación de las unidades con valores de  $\rho=2670$  a  $1240 \text{ kg/m}^3$  y susceptibilidad magnética de 0.1225 a 0.0001 SI. A continuación, se realiza la descripción del modelo correspondiente a la fig. [40], tomando en cuenta las anomalías magnetométricas se dividió en tres partes para su descripción.

1) En la región SW es el comienzo de los perfiles, la cual abarca la zona del núcleo Poniente de la reserva (I), los resultados obtenidos en el perfil gravimétrico muestran un perfil muy suavizado donde se presenta un pequeño alto gravimétrico, en comparación la parte magnetométrica se observan los cambios más pronunciados en esta zona empezado con un alto magnético, el cual disminuye, para posteriormente volver a incrementarse. En el modelado estos cambios están relacionados con variaciones de la primera unidad que van de espesores de 90 a 20 m aproximadamente, estas variaciones son similares en la segunda unidad, así también se puede observar un aumento en el espesor de la unidad más profunda, con lo cual parece contribuir al cambio de espesor de las unidades más superficiales.

2) Siguiendo la descripción anterior en ambos perfiles se presenta la porción donde las anomalías de ambos métodos presentan valores más altos, siendo que en la parte magnetométrica esta anomalía se mantienen constante en una mayor extensión, ubicándose en la cercanía de Avenida de los Insurgentes y parte de los campos deportivos, para posteriormente presentar una pendiente que se extiende más en la parte gravimétrica. En el modelado en este caso la variación de los espesores de las unidades es muy diferente, se observa en la unidad más superficial y la última unidad un incremento en los espesores, teniendo una reducción de las unidades intermedias.

3) En la parte NE, abarca el fin de la pendiente descrita anteriormente, con un bajo en ambos métodos potenciales, seguido de una variación de los perfiles (existiendo tres bajos magnéticos y solamente dos en la parte gravimétrica). En el modelo en este caso las unidades más superficiales van disminuyendo hacia el NE teniendo aprox. una variación del espesor de 80 a 40 m, aumentando el espesor de la unidad 2 y 4, llegando a un espesor de 40 m aprox. en la segunda unidad, la tercera unidad en este caso la intermedia va disminuyendo en dirección del Norte del mapa con un espesor de 20 m.

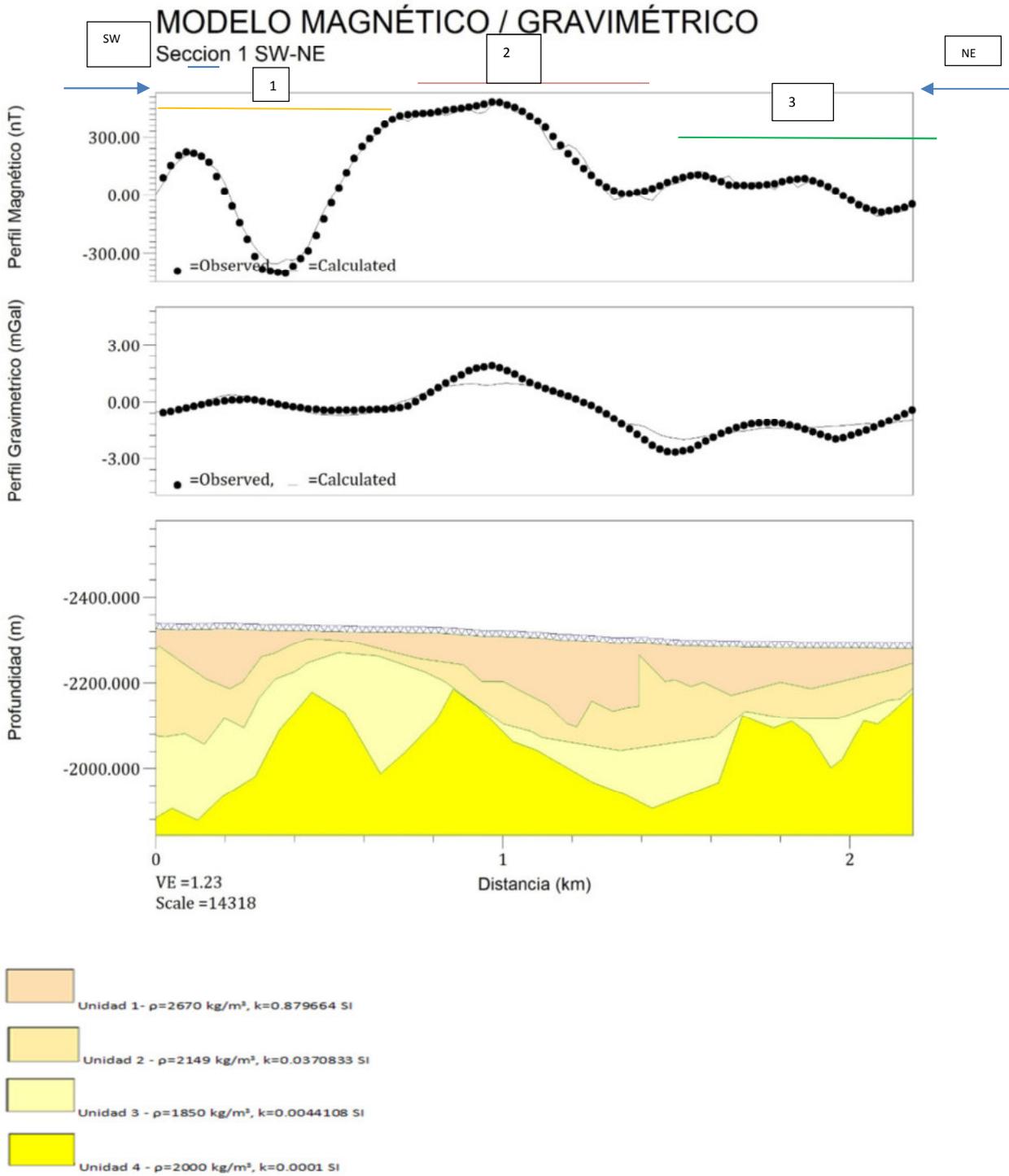


Fig. [40] Primera sección. Para el análisis de las anomalías se dividió ambos perfiles en tres partes (1), (2), (3), como se planteó en los mapas de residual gravimétrico y magnetométricos, donde se observa diferente variación en los perfiles debido a la variación de las anomalías halladas donde cruza la sección. Las unidades

presentan características similares para la litología de la unidad 1 Basalto, unidad 2 brecha, unidad 3 toba, unidad 4 arcilla.

### 4.4.2 Segunda sección.

En la segunda sección se propuso los perfiles observados en la fig. (41) con una longitud de 1409 m, con una orientación de W-E, la cual empieza en las cercanías de los campos deportivos y terminando cerca de la zona de los institutos de investigación científica, los perfiles cortan de manera horizontal las anomalías centrales, sobresale el bajo gravimétrico ubicado en el centro del mapa, las características topográficas la altitud disminuye hacia la parte Este. Las variaciones de los perfiles en cuanto a la parte magnetométrica se encuentran en un rango de los 348.47 nT a -155.36 nT y la parte gravimétrica se encuentra en un rango de variación de 1.51 mgal a -3.72 mgal.

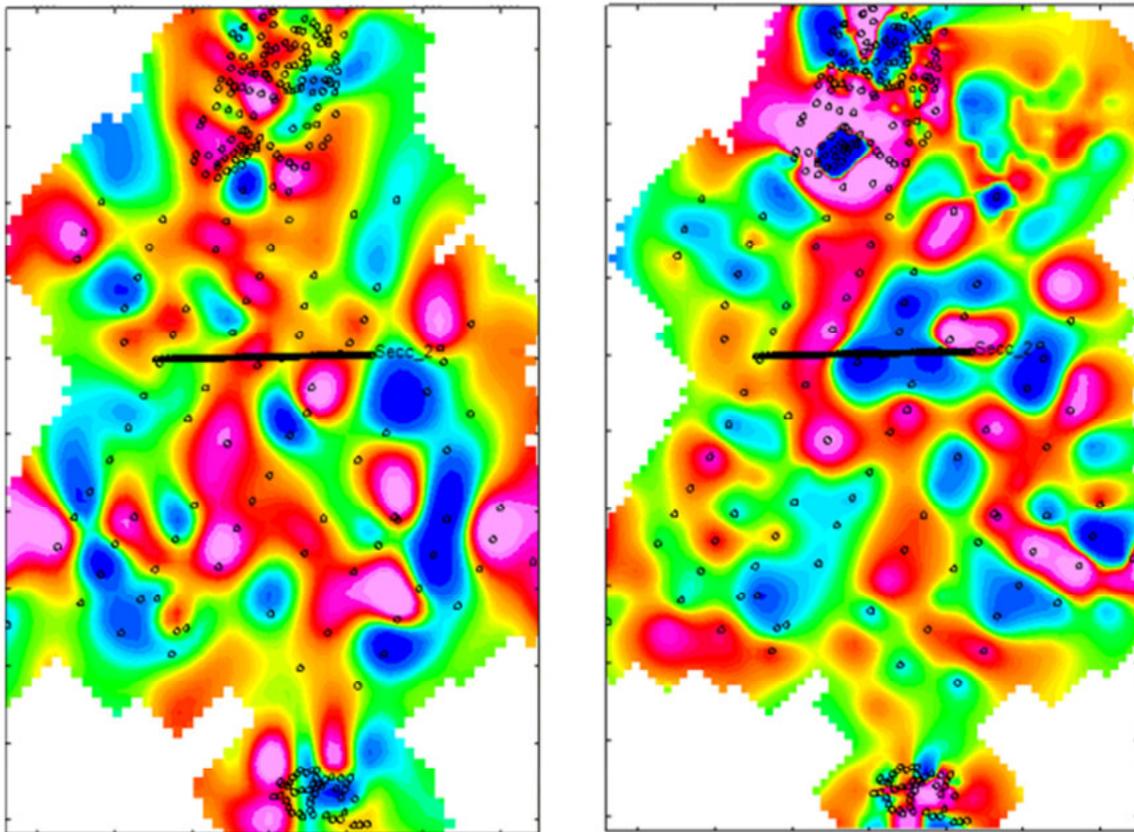


Fig. [41]. Se muestran a la izquierda el mapa residual gravimétrico y residual magnetométrico en la parte derecha, en ambos casos trazado del segundo perfil el cual tiene una orientación W-E, para la descripción de las anomalías se dividió en 3 secciones.

Para la descripción del modelo de la fig. (42) se planteó en tres partes, la descripción es la siguiente:

- 1) En la parte W donde se ubican los campos deportivos hasta la Avenida Insurgentes, en el perfil gravimétrico se observa una anomalía sin una variación considerable, teniendo un incremento hacia (2), en la parte magnetométrica comienza con un bajo magnético el cual va aumentando conforme se acerca a la segunda parte. En el modelo el cambio magnetométrico puede asociarse con el aumento de la primera unidad donde en esta región tiene un espesor aproximado de 180 m la cual tienen un efecto en perfil magnetométrico, con respecto a la parte gravimétrica no hay mucha variación hasta la parte central que puede asociarse a una cuarta unidad, la cual contribuye a la disminución de las unidades dos y tres.
- 2) En la parte central, hay una variación en los perfiles un descenso en la parte gravimétrica, en comparación con el alto y bajo magnetométrico esto se asocia a la parte central del modelo con una variación de la primera unidad la cual tiene una reducción representativa al inicio del modelo con un rango de variación de espesor de 40 a 80 m aprox., aumento de la segunda unidad. Además, la tercera unidad en un principio tiene un aumento el cual comienza a reducirse en la parte central, así como la variación de la cuarta unidad, lo que al parecer contribuye al descenso observado en el perfil gravimétrico.
- 3) La última parte está asociada a lo que corresponde al Este del mapa, donde en el perfil magnetométrico se presenta una anomalía alta la cual va disminuyendo hasta el final del perfil, en la parte gravimétrica continua la anomalía con características bajas y llegando al final del perfil vuelven a incrementarse al Este del mapa. En el modelo se observa un pequeño incremento en el espesor de la primera unidad, aumento de la segunda unidad, así como un cambio en la litología de la tercera unidad, lo cual influye en la parte gravimétrica.

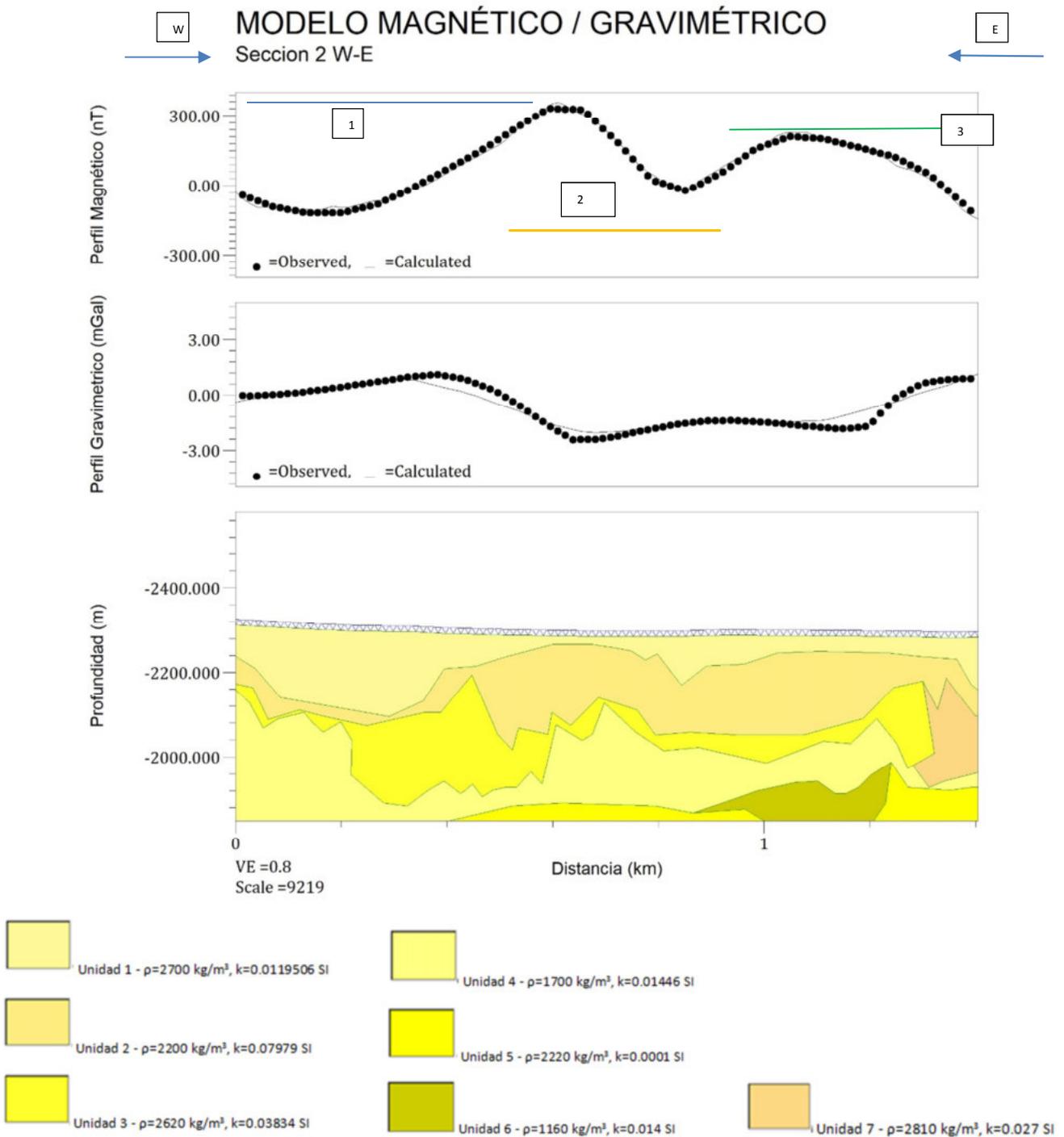


Fig. [42] Segunda sección. Modelo profundo Para el análisis de las anomalías se dividió ambos perfiles en tres partes, el perfil tiene una orientación W-E. Donde existe mayor variación en la parte profunda. Las unidades

presentan características similares para la litología de la unidad 1 basalto, unidad 2 brecha, unidad 3 toba, unidad 4 arcilla con intercalaciones de toba, unidad 5 toba, unidad 6 arcilla, unidad 7 toba.

### 4.4.3 Tercera sección

El tercer perfil fig. [43] es que se encuentra ubicado más al Oeste del mapa con una longitud de 1602 m, con una orientación SW-NE, con una ubicación en las cercanías del núcleo Poniente de la reserva ecológica, Jardín Botánico y los campos deportivos. Las características de la topografía en la parte SW aumentan y disminuye en la parte NE, para su análisis se dividió el perfil en tres partes como lo presenta la fig. [44]. La variación de las anomalías en los perfiles en cuanto a la parte magnética es de 294 nT a -595 nT y la parte gravimétrica se encuentra en un rango de variación de a 1.23 -1.23 mgal.

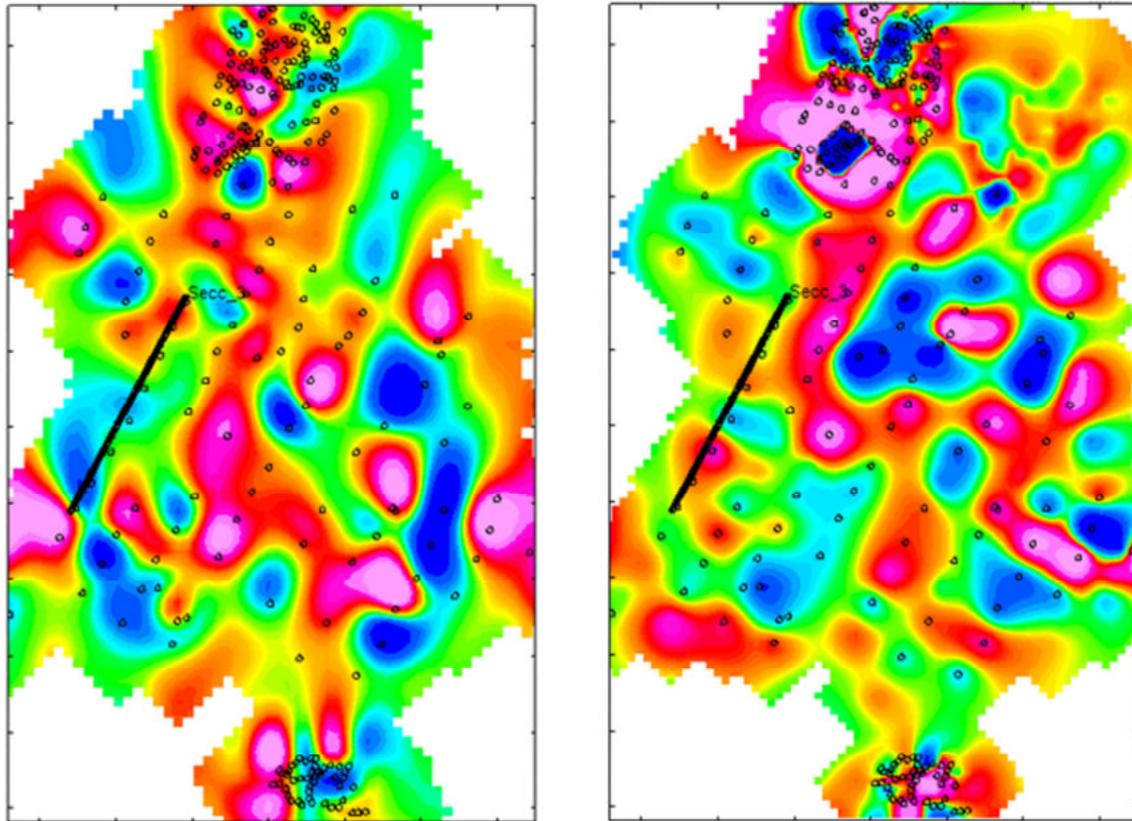


Fig. [43] Se muestran a la izquierda el mapa residual magnetométrico y en la derecha el mapa de residual gravimétrico, en ambos casos trazado el tercer perfil con una orientación SW-NE.

Para la descripción del modelo de la fig. (44) se planteó en tres partes, la descripción es la siguiente:

- 1) Los perfiles en este caso son muy diferentes entre sí, el perfil magnético aumenta de SW a NE y el gravimétrico las variaciones que se observan no son tan notorias. En la parte más al SW, donde se ubicarían parte de la reserva ecológica y el jardín botánico hay una disminución en el perfil magnético y posteriormente se incrementa el cual puede ser asociado con el fin del mapa con lo que puede deberse a una carencia de estaciones, el perfil gravimétrico se observa un aumento gradual en el perfil. La primera unidad tiene un aumento en su espesor, así como en la segunda unidad, las variaciones en las primeras unidades son similares, lo cual puede ser asociado con el perfil gravimétrico, la variación de las unidades que se presenta al inicio se asocia con un aumento en la anomalía magnetométrica.
- 2) El perfil en ambos casos se observa un aumento en la anomalía seguido de un descenso, siendo lo que difiere en ambos casos la magnitud de la anomalía, y teniendo una semejanza en el perfil de ambos, del cual se asocia en el modelo a la tercera unidad la cual al aumentar influye en las unidades superiores influyendo en su espesor dando forma al perfil magnetométrico.
- 3) En la última parte asociada al NE del mapa, en el perfil magnetométrico se observa un aumento de las anomalías teniendo los valores más altos en el NE del mapa, en el caso gravimétrico la anomalía se comporta sin cambio. En este caso se observa un incremento en el espesor en la primera unidad, en la segunda unidad el espesor disminuye, así también el espesor de la tercera unidad tiene un decremento en de sus espesores.

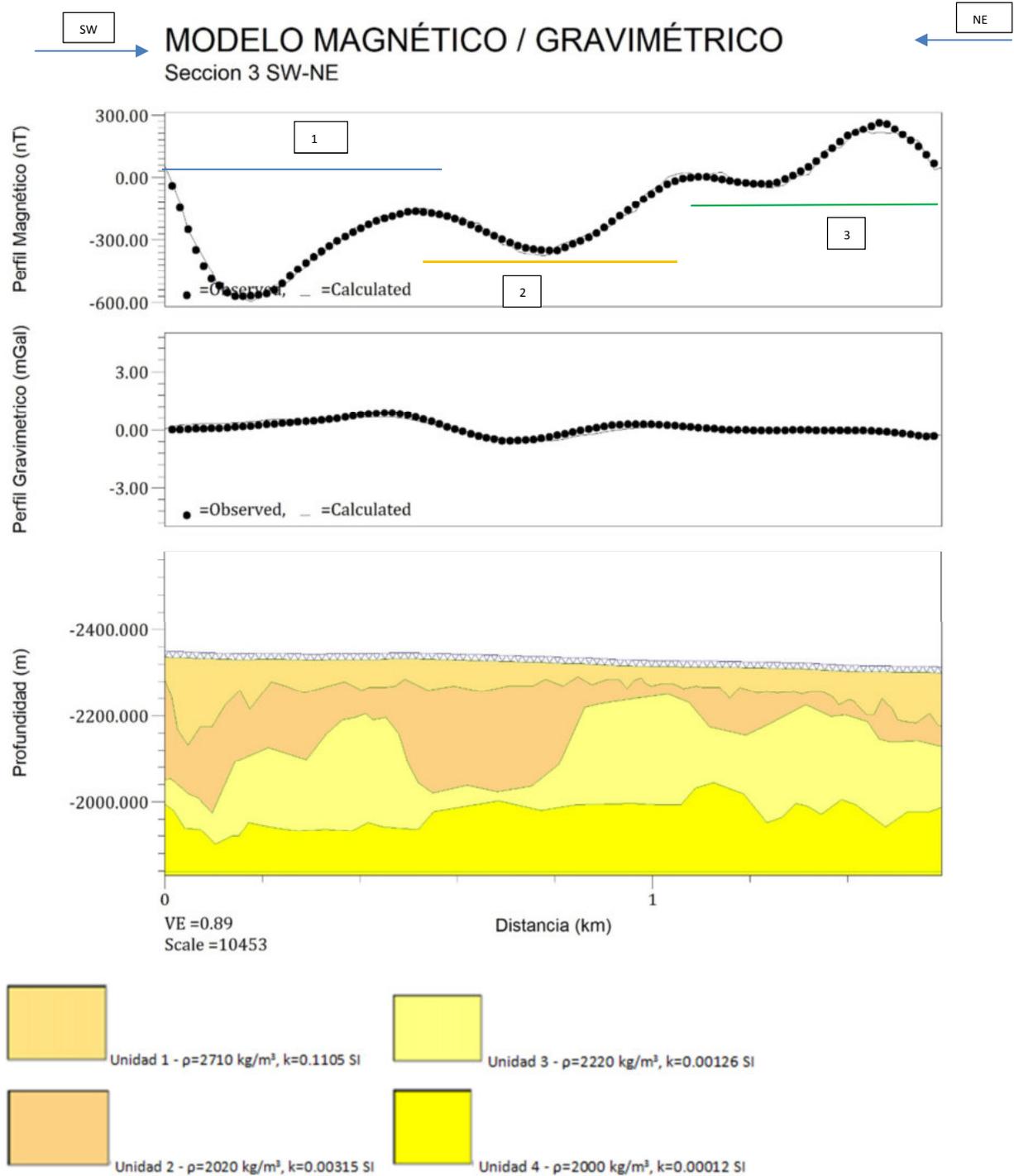


Fig. [44]. Tercera sección. Para el análisis de las anomalías se dividió ambos perfiles en tres partes (1), (2), (3), con una orientación SW-NE, la mayor variación en ambos perfiles se encuentra en la región NE. Las unidades presentan características similares para la litología de la unidad 1 Basalto, unidad 2 brecha, unidad 3 toba, unidad 4 arcilla.

#### 4.4.4 Cuarta sección

En la cuarta sección fig. (45), se tiene las siguientes características: una longitud de 2034 m, con una orientación de SW-NE, cerca de las instalaciones de posgrado, instalaciones de los institutos de humanidades, reserva ecológica núcleo Oriente, facultad de ciencias políticas y cercanas a las instalaciones de investigación científica en la fig. [45]. Las características de la topografía son que en la parte SW es mayor que en la parte NE. La variación de los perfiles en cuanto a la parte magnética es de 348.61 nT a -840nT y en la parte gravimétrica es de 1.69 mgal a -2.08 mgal. En estos últimos modelos es lo que al parecer se encuentra menor variación en los modelos realizados, a continuación, se establece la descripción de los modelos.

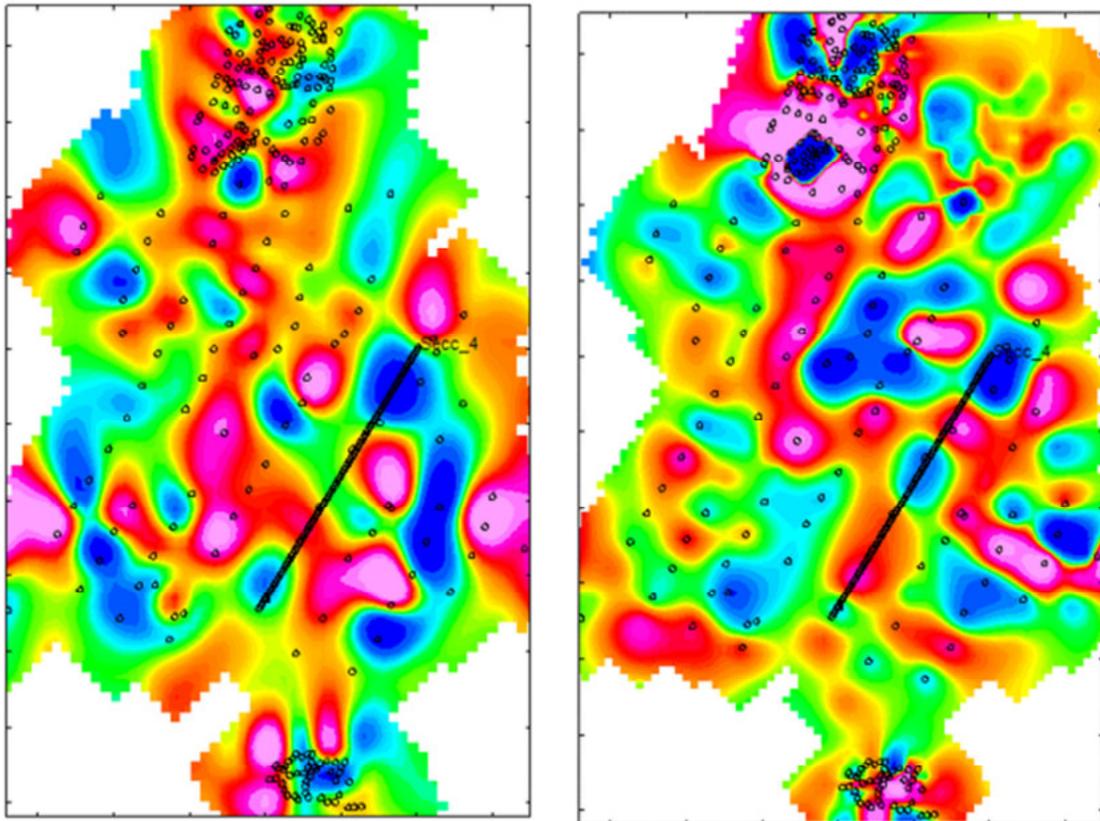


Fig. [45] Se muestran a la izquierda el mapa residual magnetométrico y en la parte derecha el residual gravimétrico, en ambos casos trazado el cuarto perfil con una orientación SW-NE, para su descripción se dividió en 3 secciones (1), (2), (3), abarcando diferentes anomalías observadas en ambos mapas.

Para la descripción del modelo de la fig. (46) se planteó en tres partes, la descripción es la siguiente:

- 1) En la parte más SW en ambos perfiles, se observa una anomalía de valores bajos, siendo el perfil magnetométrico donde las variaciones son más notables, teniendo un incremento el cual es más pronunciado en la parte magnetométrica, el aumento de la anomalía se presenta más rápido en la parte gravimétrica. Se observa en los primeros metros a la primera unidad con un espesor máximo de 80 m aprox. y además un aumento de la segunda unidad, que al parecer es provocado por un aumento en la tercera unidad. La segunda unidad en esta parte es la que tiene mayor variación en los espesores de las unidades.
- 2) En la parte media del perfil magnetométrico se observa dos altos magnéticos, en cambio en el perfil gravimétrico el perfil se observa un descenso continuo hasta tener un descenso abrupto y un incremento al final de la segunda parte. Un incremento de la primera unidad el cual sobresale en cuanto a su espesor, así como una reducción en el espesor de la primera y segunda unidad, el incremento de la primera unidad puede estar asociada a la respuesta del perfil gravimétrico.
- 3) En la última parte la más cercana al NE, en el perfil magnetométrico la anomalía tiene un descenso pronunciado y posteriormente vuelve a empezar a incrementarse la anomalía, el perfil gravimétrico en cambio aparece un aumento en el perfil y continúa con un descenso de la anomalía gravimétrica. En el modelo, esto se observa como comienza a decrecer el espesor de la primera unidad, hasta un espesor aprox. de 10 m, la segunda unidad empieza a tener un aumento en su espesor, así también un incremento en el espesor de la tercera unidad, en este caso al parecer la variación de los perfiles este asociado al cambio de espesor de la primera unidad.

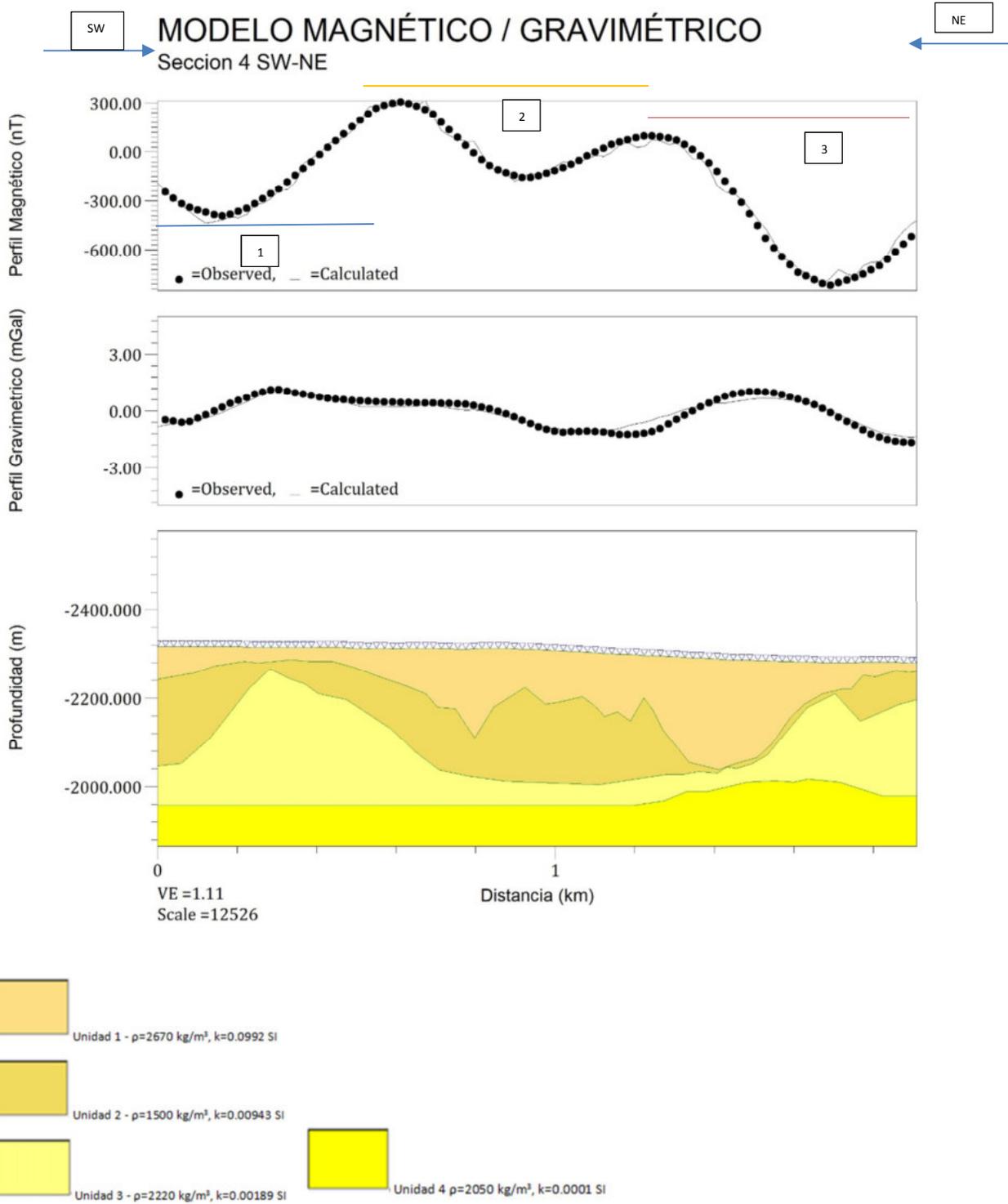


Fig. [46]. Cuarta sección. Para el análisis de las anomalías se dividió ambos perfiles en tres partes: (1), (2), (3). El perfil tiene una orientación SW-NE, en donde se observa que en ambos perfiles presentando

variaciones en las primeras unidades. Las unidades presentan características semejantes para la litología de la unidad 1 Basalto, unidad 2 brecha, unidad 3 toba, unidad 4 arcilla.

### 4.4.4 Quinta sección

En la última sección se observa los dos perfiles propuestos como en los anteriores casos fig. (47), se tiene las siguientes características: una longitud de 4900 m, con una orientación de S-N, siendo el más extenso, empezando en la zona arqueológica de Cuiculco, pasando por Ciudad Universitaria y terminando en la colonia Chimalistac como se muestra en la fig. [47]. Las características de la topografía son que en la parte Sur es mayor que en la parte Norte. La variación de los perfiles en cuanto a la parte magnética es de 500 nT a -584 nT y en la parte gravimétrica es de 3 mgal a -3 mgal.

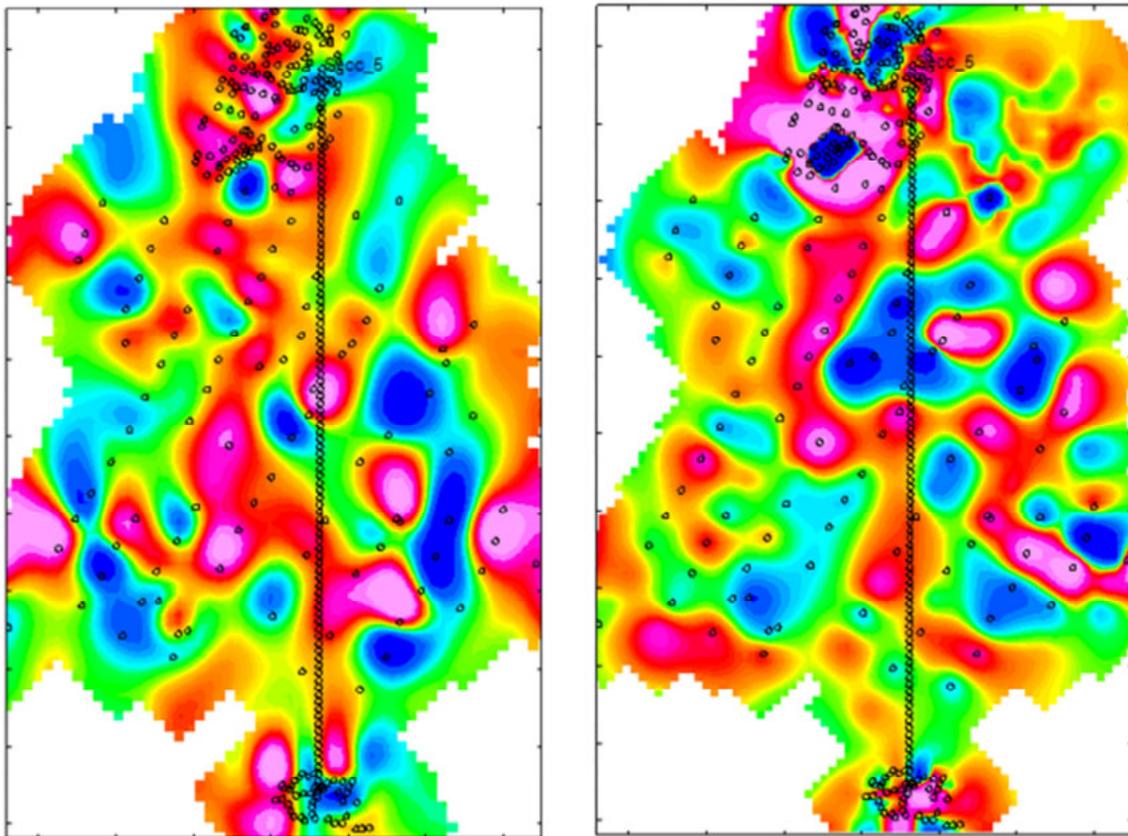


Fig. [47] Se muestran a la izquierda el mapa residual magnetometrico y en la parte derecha el residual gravimétrico, en ambos casos trazado el cuarto perfil con una orientación S-N, para su descripción se dividió en 3 secciones (1), (2), (3), abarcando diferentes anomalías observadas en ambos mapas.

Para la descripción del modelo de la fig. (48) se planteó en tres partes, la descripción es la siguiente:

- 1) Como en los anteriores perfiles la parte magnetométrica es la que presenta más variación en toda la extensión del perfil, empieza con un aumento posteriormente la anomalía empieza a decrecer y se vuelve a incrementarse al final, en el perfil gravimétrico no existe una variación tan marcada solo unos pequeños ascensos y descensos en los valores del perfil. En el modelo se observa un mayor espesor de la primera unidad y variaciones en la forma de la segunda y tercera unidad. Los incrementos en la primera y tercera unidad pueden estar asociados con la variación de la anomalía magnetométrica.
- 2) La sección central que atraviesa Ciudad Universitaria es la que se presenta mayor variación, en el perfil magnetométrico se observa una anomalía alta, posterior descenso de la anomalía con valores más bajos que posteriormente vuelve a incrementarse teniendo pequeñas variaciones al final de la sección analizada. En el perfil gravimétrico las anomalías tienen un pequeño aumento y posteriormente hay un descenso el cual se extiende para volver a incrementarse. En el modelo se observa un incremento en la tercera unidad lo cual contribuye a una pequeña reducción del espesor de las primeras unidades la cual tiene influencia en los perfiles. Las unidades más profundas tienen mayor influencia en la parte gravimétrica, además de las variaciones del espesor de la primera unidad de 40 a 100 m aprox.
- 3) En la última sección la más próxima al Norte, en el perfil magnetométrico se presenta la anomalía con valores más altos la cual posteriormente tiene un descenso y un pequeño incremento al final del perfil, en la parte gravimétrica esto se relaciona con un aumento en el perfil el cual se reduce al final del perfil. En el modelo se presenta como una disminución de las unidades más superficiales y aumento en el espesor de la unidad más profunda, esta última comienza a incrementarse conforme se acerca al Norte de la sección.

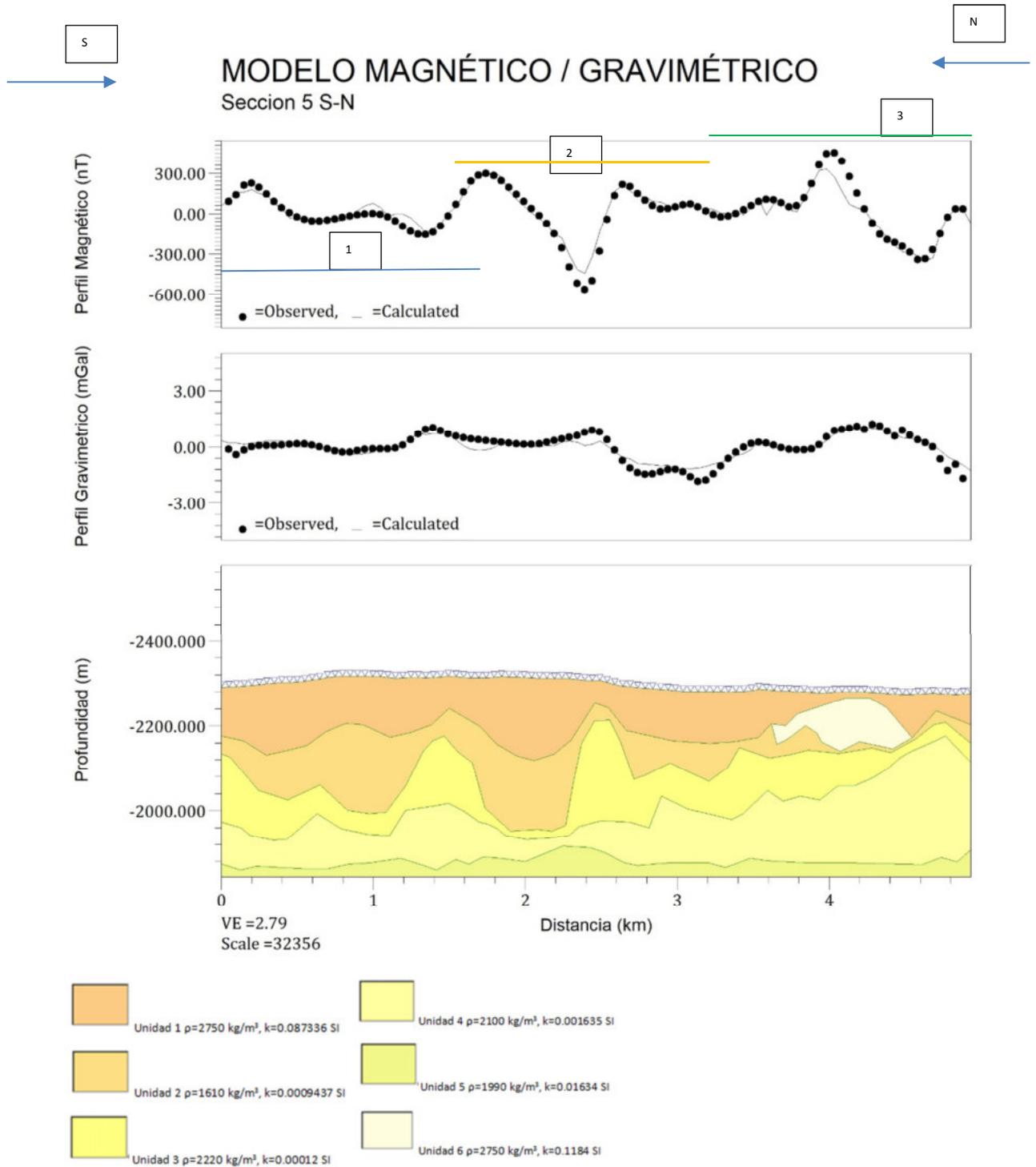


Fig. [48]. Quinta sección. Para el análisis de las anomalías se dividió ambos perfiles en tres partes: (1), (2), (3). El perfil tiene una orientación S-N, en donde se observa que en ambos perfiles presentando variaciones en las primeras unidades. Las unidades presentan características semejantes de la litología de la unidad 1 Basalto, unidad 2 brecha, unidad 3 toba, unidad 4 arcilla con intercalaciones de toba, unidad 5 toba, unidad 6 basalto.



# CAPÍTULO 5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

## 5.1 *Discusión de Resultados.*

Del análisis de los mapas de las anomalías gravimétricas y magnéticas, encontramos la representación de las fuentes someras y profundas, es decir, las anomalías regionales y residuales respectivamente. El objetivo del estudio se centra en las unidades someras, por lo que las anomalías residuales son la de mayor interés, siendo que, en Ciudad Universitaria, la parte superficial está asociada con flujos de lava; añadiendo, también una discusión de las anomalías regionales, las cuales también tienen influencia en la distribución de las anomalías.

La tendencia reportada de los flujos de lava del volcán Xitle es hacia el N y NE cubren un área de 0.96 km<sup>2</sup> y 0.12 km (Delgado et al. 1998). Además como se plantea en la fig.[9] la disminución de litología asociada al derrame del volcán Xitle en la parte noreste de Ciudad Universitaria, esto se puede asociar a los resultados obtenidos en los mapas de la Anomalía de Bouguer y Anomalía de Campo Magnético total, donde las características encontradas similares entre estos dos métodos potenciales, son los valores altos en las anomalías de ambos métodos que recorren de la parte central al norte del mapa, destaca para la parte gravimétrica una anomalía con valores bajos lo cual no se presenta en los mapas magnetométricos. En los modelos el incremento de las anomalías se atribuye a la primera unidad que se asocia con el flujo de lava del volcán Xitle, el espesor de la unidad en la mayoría de las secciones aumentaba en la parte Sur y disminuía en la parte Norte. Esta tendencia también tenía concordancia con el mapa topográfico en la cual conforme se tiene una dirección NE se presenta un descenso en la topografía.

En el mapa de la anomalía de Bouguer, se presenta una anomalía en la parte central del mapa de valores bajos el cual parece seguir una orientación con SW-NE, desde la reserva ecológica y acentuándose en la zona central. En el mapa magnético de campo total, las anomalías con tendencia más alta se encuentran en la parte Norte, desplazándose en la parte central donde se ubica una disminución en dirección NE, la cual al aplicar la reducción al polo las anomalías altas tienen una dirección marcada de Sur a Norte, además de marcarse más las anomalías con valores bajos en los extremos.

Al comparar los mapas regionales obtenidos de ambos métodos, las anomalías con valores altos encontrados en la parte Norte se mantiene en ambos mapas, destacando de la anomalía regional gravimétrica el bajo gravimétrico ubicado en la zona central del mapa, en los extremos al Norte y Sur es donde se hallan los valores más altos y en la parte W se encuentra una anomalía con valores bajos que tienen forma abierta, además al parecer no es posible establecer dónde

puede existir la unión entre las anomalías con valores altos hallado en los extremos Norte y Sur del mapa residual gravimétrico. La anomalía regional magnetométrica es muy diferente al regional gravimétrico en este caso si hay una conexión de las anomalías con valores altos, los cuales cruzan por el centro, el bajo que se produce en la parte gravimétrica se encuentra en diferente ubicación y con una menor longitud en dirección Este del mapa, lo cual podría deberse a otro tipo de anomalía. La mayoría de las anomalías con valores bajos se encuentran al Oeste del mapa. Destaca más el bajo gravimétrico encontrado en la zona central. En los mapas de continuación ascendente las anomalías observadas se encuentran más suavizadas.

En cuanto a los resultados de los mapas residuales, en la parte gravimétrica, se presenta una tendencia donde las anomalías con tendencia alta cubren parte NW del mapa, rodeando la anomalía con valores bajos del centro del mapa hasta llegar a la parte Sur. Ubicaciones similares en las anomalías se encuentran en la continuación ascendente (donde las anomalías tienden a estar más suavizadas) y la primera derivada vertical, además de reducirse el tamaño de la anomalía baja ubicada en el centro del mapa. En la parte magnética la distribución de las anomalías con valores altos cruza la parte central de Sur a Norte, además en la parte Norte la anomalía decrece en dirección NE, solamente en la primera derivada vertical las anomalías parecen estar más alargadas. En ambos métodos potenciales la distribución de las anomalías de fuente somera tiene una mejor definición en los mapas residuales.

En la colonia Romero de Terreros se extrapolan tendencias similares, esto se plantea por la reducción de la anomalía magnética al NE del mapa, lo cual podría establecerse como una reducción de la unidad más superficial en el análisis de los modelos obtenidos.

En el mapa de señal analítica aplicada a los datos magnetométricos, destaca la forma de las anomalías con valores altos los cuales describen un cierto patrón en la forma y ubicación, las cuales parecen unidas abarcando un gran porcentaje del mapa reduciéndose en dirección NE, con algunas características similares al mapa residual gravimétrico, en la parte central del mapa los valores de la anomalía se reducen, así como en el núcleo oriente (II) de la reserva ecológica, la anomalía de valores altos rodeada de valores altos al SE encontrada en los mapas de primera derivada y continuación descendente desaparece en la señal analítica.

El análisis espectral se realizó en ambos métodos potenciales, los resultados obtenidos para las profundidades aplicadas en cada método dan como resultado un rango de variación de la fuente somera de 21.77 m a 46.17 m y respecto a la parte profunda un rango de 267.75 m a 469.25 m, la diferencia de los resultados encontrados en el análisis espectral de cada método tuvo un rango de variación de 25 m para las fuentes someras. Tomando en cuenta el análisis espectral en un principio se limitó la profundidad de las fuentes, que se representarían en los modelos. La distribución de las unidades para el modelado está basada en la información referente del pozo Copilco -1, además de la información de la estratigrafía del pozo Copilco (Unda, 2016) en la cual se plantea que la litología que pude encontrar sea de lavas, tobas, brechas y arcillas lacustres.

Con la información previamente obtenida se realizaron cinco modelos, teniendo como objetivo la caracterización de las unidades más someras por lo que se utilizó los mapas residuales de ambos métodos potenciales. La distribución de las cinco secciones se estableció para abarcar la zona de Ciudad Universitaria tomando como base las líneas de adquisición de esta zona al ser las más extensas. Cada una compuesta de un perfil magnetométrico y un perfil gravimétrico, en el cual, al realizar el modelado influía en ambas al modificar las unidades. Se puede establecer que, para los perfiles magnetométricos, las unidades que tenían más influencia eran las dos primeras debido a sus valores de susceptibilidad magnética. En el caso de los perfiles gravimétricos las unidades más profundas tenían mayor contribución en el perfil obtenido. La variación del espesor de la primera unidad aumentaba con dirección Sur. Las características de la densidad y susceptibilidad magnética para la realización de los modelos presentan cierto rango de variación, hallándose modificaciones en cuanto el espesor de las unidades. Solamente la sección cinco abarca, tres zonas de adquisición (Zona arqueológica de Cuicuilco, Ciudad Universitaria y la colonia Romero de Terreros).

Las secciones 1, 3 y 4 tiene una orientación SW-NE los cuales cortan de forma diagonal la zona de Ciudad Universitaria, en la cual la sección 1 se encuentra en la parte central del mapa donde la primera unidad disminuye al NE y existe una mayor variación de la cuarta unidad, la tercera sección se ubica al poniente del mapa en donde la primera unidad tiene mayor variación en los extremos, además de la disminución de la segunda unidad y una variación de la tercera unidad. Por último, la sección que está más cerca del SE del mapa, la variación del espesor es mayor al NE del mapa, además de haber una variación de la tercera unidad. En la segunda sección con orientación W-E, existe un mayor espesor de la primera unidad al W, además de una disminución de la tercera unidad en la misma dirección.

Respecto a la sección 5, el que tiene mayor longitud de los 4 anteriores tiene intersecciones con los perfiles 1, 2 y 4, donde al Sur donde se presenta la intersección de las secciones 4 y 5 los modelos tienen similitudes donde existe un aumento de la cuarta unidad y disminución y posterior decremento en el espesor de la misma unidad, además de un aumento de la segunda y tercera unidad.

La intersección de las secciones 2 y 5, en este caso presenta mayor variación de las unidades que conforman los modelos donde existe un incremento del espesor de la tercera unidad, en las secciones 1 y 5 las primeras unidades tienen una disminución en su espesor y aumento de la 4 unidad, además en la sección cinco se presenta una unidad intermedia que no se plantea en las en la primera sección.

Los perfiles calculados en la parte magnetométrica están dominados en su mayoría por un efecto superficial provocado por la primera unidad en cada uno de los modelos obtenidos, esta respuesta se puede observar, principalmente en la componente magnética debido a que existen mayores variaciones en los perfiles magnetométricos en las cinco secciones, el espesor de la primera unidad en la mayoría de los modelos estuvo en el rango de variación 20 m de 200 m

aprox. Los diferentes flujos de lava como se describe en el estudio de Delgado et al 1998, no se pudieron analizar, esto debido a las características similares que contienen las lavas de susceptibilidad magnética y densidad, con lo cual es posible que en la primera unidad en algunos sitios tenga un espesor mayor debido a distintas unidades con propiedades similares o que las propiedades de la primera unidad encubran a otras unidades más pequeñas, solamente se sugiere la presencia de una unidad con valores de susceptibilidad mayores a los establecidos en la primera unidad en la sección S-N. En tanto los perfiles gravimétricos están relacionados en mayor medida a los estratos encontrados entre la segunda unidad y las unidades más profundas los perfiles no tienen una variación tan considerable en comparación de los perfiles magnetométricos y responden a las unidades profundas de cada sección.

Al tener los tres perfiles con orientación SW-NE, lo que se puede plantear es la variación de las unidades de W a E, donde la unidad más somera en dirección NE tiene una disminución de su espesor e incrementándose en la parte poniente, lo cual concuerda con lo planteado en la fig. (8) del trabajo de Siebe donde el flujo de lava tuvo una orientación al NE del Valle de México.

La forma en que están distribuidos los perfiles con dirección SW-NE, en los resultados obtenidos existe mayor variación de la segunda y tercera unidad, de estas tres secciones se presenta mayor variación de la cuarta unidad en la sección central. En contraste el último perfil que se desplaza de S-N, la primera unidad existe variaciones en el principio y final del modelo, presentándose mayor variación en el espesor de la segunda y tercera unidad, siendo que al final del perfil las unidades más someras empiezan a disminuir y las más profundas aumentan de espesor.

# Conclusiones

Se presentan los resultados del estudio gravimétrico y magnetométrico del campo volcánico del Pedregal de San Ángel. El campo, localizado en el sur de la cuenca de México, producto de la erupción del volcán Xitle.

En el análisis de los mapas de Anomalía de Bouguer y Anomalía Magnetométrica de Campo Total, en la región noroeste se encuentra las anomalías con valores más altos los cuales van reduciendo su intensidad en dirección NE. En la anomalía de Bouguer destaca una anomalía circular en el centro del mapa.

En ambos métodos se aplicó el análisis espectral, obteniendo que la respuesta de la fuente profunda con los datos gravimétricos fue de 469.25 m y la parte somera de 21.77 m. Los resultados para las fuentes magnéticas fueron de 267.75 m en la parte profunda y 46.17 m en la parte somera. Existiendo una variación entre ambos análisis 201.5 m en la parte profunda y de 24.4 m en la parte somera.

En los mapas gravimétricos existe una anomalía con valores bajos en el centro del mapa, la cual es asociada a las fuentes profundas, esta hipótesis está basada en el resultado obtenido en el análisis espectral donde para la parte gravimétrica la fuente profunda se ubica a una mayor profundidad en comparación del análisis para la parte magnetométrica.

En ambos métodos potenciales se aplicó la separación de las componentes regional y residual, con diferentes métodos, obteniendo como resultado para las anomalías regionales que el bajo gravimétrico en el centro del mapa se asocia a una fuente profunda, y en la parte magnetométrica se asocia a anomalías con valores altos que cruzan la parte central.

La componente residual en la parte gravimétrica se presenta una tendencia donde las anomalías altas cruzan el mapa cubriendo la parte NW y disminuyendo en el NE, en la parte magnetométrica esta distribución está mejor definida y tienen una similar ubicación de las anomalías con valores altos lo cual puede ser asociado a las coladas de lava del volcán Xitle.

La comparación entre los mapas de señal analítica y residual gravimétrico muestra similitudes en la ubicación de las anomalías con valores altos en la parte noreste extendiéndose al Sur del mapa. Por lo que se puede definir que la distribución de las anomalías de fuentes someras, en la cual presenta una reducción al NE del mapa, tiene tendencias similares y concuerda a la distribución de las coladas de lava del volcán Xitle las cuales disminuyen como se cita en los estudios previos.

Las secciones SW-NE se presentan la variación de las unidades más someras, donde tres secciones tuvieron la misma dirección y se puede establecer la disminución que ocurre de W a E

## Conclusiones

En las 5 secciones los perfiles que tuvieron mayor variación fueron los magnetométricos, en el caso de los perfiles gravimétricos existen variaciones los cuales no son tan abruptos. Donde en los modelos la unidad más superficial tiene mayor influencia en la parte magnetométrica, en contraparte las unidades más profundas tienen mayor influencia en los perfiles gravimétricos.

En los modelos se plantea un mayor espesor de la parte S y NW, donde la unidad más somera presentaba una disminución al NE, las intersecciones de los perfiles planteaban pequeñas similitudes entre ellos cuanto en la forma de las unidades de cada sección.

La distribución de las estaciones en la parte norte no es tan homogénea teniendo en cuenta que la toma se realizó en calles de la Ciudad de México, por lo que en ocasiones no es posible tomar un mallado regular.

Se propone para contar con más datos y tener mayor resolución, la repetición del estudio magnetométrico en la colonia Romero de Terreros y analizar en qué regiones es necesario la toma de datos nuevos para cerrar las anomalías truncadas, planteando la adquisición de datos más al norte, con el objetivo de observar donde se reduce la unidad somera, que podría ser asociada a la colada de lava del volcán Xitle.

El análisis de las diferentes zonas de estudio también podría ser manejadas en forma individual, teniendo una distribución diferente de los datos utilizados en cada zona y así comparar los resultados obtenidos que de forma general se analizan en el presente estudio.

### REFERENCIAS

- [1] Alva-Valdivia, L.M. (2005) "Comprehensive paleomagnetic study of a succession of Holocene olivine-basalt flow: Xitle Volcano (México) revisited", *Earth planets Space*, 57,839-853.
- [2] Blackley, J. (1996) "Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications" first edition, Cambridge University Press.
- [3] Bloomfield, K., (1975). "A late Quaternary monogenetic volcano field in Central México" *Geol. Rundsch.*
- [4] Badilla Cruz R.R. (1977) "Estudio Petrológico de la lava de la parte noreste del Pedregal de San Angel, D.F." *Bol. Soc. Geol. Mexicana*, Tomo XXXVIII, No.1. pp. 40-57.
- [5] Cano, C.M., (2007). "Evolución del Volcán Hoya de Estrada" Tesis
- [6] Cantos, F. J. (1973) "Tratado de Geofísica Aplicada" 2ª Edición
- [7] Cervantes,P., Y Wallace, P., (2003)b. "Magma degassing and basaltic eruption styles: a case study of 2000 year BP Xitle volcano in central México", *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 120 p. 249-270.
- [8] D'Antonio, Marco, (2008) "Reconstrucción del evento eruptivo asociado al emplazamiento del flujo piroclástico El Refugio hace 13 ka volcán Nevado de Toluca (México)" *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25, núm. 1.
- [9] Delgado, H., Cervantes P., (1998). "Geology of Xitle Volcano in Southern Mexico City- A 2000-year- old monogenetic volcano in an urban area"
- [10] Díaz Navarro Ricardo M.C., "Filtrado de métodos potenciales: Gravimetría y magnetometría en el dominio del número de onda".
- [11] Enciso- de la Vega S. (1992) "Propuesta de Nomenclatura estratigráfica para la Cuenca de México" UNAM, Instituto de Geología, Revista volume 10, número 1, 1992, p26-36
- [12] Fairhead D. (2004). "Gravity and magnetics in today's soil & mineral industry"
- [13] Ferrari, L. (2011) "Tectónica y volcanismo en el Cinturón Volcánico Trans-mexicano". Centro de Geociencias e Instituto de Geología de la UNAM.
- [14] Gómez-Tuena A. et al (2005). "Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana" *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, tomo LVII, núm. 3 p, 227-283.

## Referencias

- [15] Gómez Ochoa, D. (2011) "Identificación de rasgos tectónicos mediante la medición de la emisión de dióxido de carbono en suelos del campo volcánico Chichinautzin" Tesis de Licenciatura.
- [16] González-Torres, E.A., et al. (2015) "Revisión de los últimos eventos magmáticos del Cenozoico del sector Norte-central de la Sierra Madre del Sur y su posible conexión con el subsuelo profundo de la Cuenca de México". Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen 67, núm.2.
- [17] Kaufman, A. (1992) "Geophysical Field Theory and Method Part A", Academic Press, Inc.
- [18] L. Estrada (2012). "Prospección Gravimétrica. Universidad Nacional de Tucuman".
- [19] Lomas, B.C.T. (2009). "Dinámica de la frontera forestal en la Sierra Ajusco Chichinautzin. Montecillo, Texcoco, Edo. De México".
- [20] Martin, A.L., (1982). "Monogenetic volcanism in Sierra Chichinautzin, México". Bol, Volcanol., 45.
- [21] Milsom, J. (2003) "Field Geophysics" Wiley, Third Edition
- [22] Morgan A. Lisa (2010) "Geophysical Characteristics of Volcanogenic Massive Sulfide Deposit". US Geological Survey.
- [23] Mooser, F., A. E. M. NAIRN and J.F.W. NEGENDANK, (1974). "Paleomagnetic Investigation of the Tertiary and Quaternary igneous rocks: VII A paleomagnetic and petrologic study of volcanics of the Valley of Mexico". Geol. Rundschau.
- [24] Nabighian, M.N. (2005) "The historical development of the magnetic method in exploration", Geophysics, vol. 70, No.6
- [25] Palacios- Noëlle, (2015) "Patrimonio natural de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel y áreas cercanas: sitios de interés geológico y geomorfológico al sur de la Cuenca de México", Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen 67, núm.2, 2015, p.227-244.
- [26] Pardo L.Y; Vásquez A. (2012); "Modelamiento Geofísico 2D en un área de la vereda los arrayanes, municipio de Facatativá".
- [27] P.Kearey (2002), "An Introduction to Geophysical Exploration", Blackwell science, third edition.
- [28] Phillips, J.D. (2015) "Tools and Techniques: Gravitational Method" Elsevier B.V. U.S. Geological Survey

## Referencias

- [29] Sadek H.S. (1984) "Spectral analysis of aeromagnetic profiles for depth estimation principles, software, and practical application", U.S. Geological Survey
- [30] Siebe, C., (2000). "Age and archaeological implications of Xitle volcano, southwestern Basin of México-City".
- [31] Siebe, C., (2009). "La erupción del volcán Xitle y las lavas del Pedregal hace 1670 +/- 35 años AP y sus implicaciones".
- [32] Siebe, C., Macías, J.L. (2006), "Volcanic hazard in the Mexico City metropolitan area from eruptions at Popocatepetl, Nevado de Toluca, and Jocotitlán stratovolcanoes and monogenetic scoria cones in the Sierra Chichinautzin Volcanic Field". Geological Society of America Special Papers.
- [33] Sheriff, R. (2001) "Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics" 4ta Edición. Formato digital.
- [34] Servicio Geológico Mexicano. Evolución de la Tectónica en México.
- [35] Telford, W.M. (1990) "Applied Geophysics", Cambridge University Press, Second Edition
- [36] Unda, López, J.A. (2016) "Construcción y correlación de columnas geológicas de los pozos profundos del Valle de México", Tesis de Licenciatura
- [37] Urrutia, J., (1995). "Paleomagnetic study of the Xitle – Pedregal de San Ángel lava flow, southern Basin of Mexico".
- [38] Urrutia, J., (2000) "Age and archaeological implications of Xitle volcano southwestern Basin of México-City", Elsevier, Journal of Volcanology and Geothermal Research 104, pag. 45-64.
- [39] Urrutia, J. (2016) "Archaeomagnetic dating of the eruption of Xitle volcano, basin of México: Implications for the mesoamerican centers of Cuicuilco and Teotihuacan". Arqueología iberoamericana 30, p. 23-29.
- [41] Urrutia, J., Martin, A.L., 1993. Implicaciones de los datos paleomagnéticos sobre la edad de la Sierra de Chichinautzin, cuenca de México. Geofísica Internacional, v. 32, p. 523-533
- [42] Velasco, T., F. (2003) "Procesos de evolución magmática en la Sierra de Chichinautzin, Cinturón Volcánico Mexicano".
- [43] W.Lowrie (2007), "Fundamentals of Geophysics", Second Edition, Cambridge University Press
- [44] Valdez Reséndiz Norma (2015). "Cálculo de sismogramas sintéticos en cuatro pozos de la cuenca del valle de México y su calibración con líneas de reflexión" Tesis de licenciatura.

## Referencias

[45] Vazquez E., Jaimes R. (1989). "Geología de la Cuenca de México", Geofísica Internacional Vol.28 Núm. 2.

Bibliografía Complementaria.

Geosoft (2014). "Filtering How- To Guide"

Geosoft (2014). "MAGMAP Filtering How – To Guide"

Geosoft (2014). "Technical Note Depth to Basement Methods"

GM-SYS (2000) "User's Guide Gravity/ Magnetic Modeling Software"