



# **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO**

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
CENTRO DE GEOCIENCIAS CAMPUS JURIQUILLA

Desarrollo de un sistema aeromagnético con drones para exploración  
geofísica con aplicación en Maar De Rincón De Parangueo Y Caldera Los  
Humeros

## **T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA (EXPLORACIÓN GEOFÍSICA)

**PRESENTA:**

**ANDRES ARZATE MONTERRUBIO**

Tutor:

Dr. Fernando Corbo Camargo  
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA



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.

**DECLARO CONOCER EL CÓDIGO DE ÉTICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO, PLASMADO EN LA LEGISLACIÓN UNIVERSITARIA.**

**CON BASE EN LAS DEFINICIONES DE INTEGRIDAD Y HONESTIDAD AHÍ  
ESPECIFICADAS, ASEGURO MEDIANTE MI FIRMA AL CALCE QUE EL PRESENTE  
TRABAJO ES ORIGINAL Y ENTERAMENTE DE MI AUTORÍA.**

**TODAS LAS CITAS DE, O REFERENCIAS A LA OBRA DE OTROS AUTORES  
APARECEN DEBIDA Y ADECUADAMENTE SEÑALADAS, ASÍ COMO  
ACREDITADAS MEDIANTE LOS RECURSOS EDITORIALES CONVENCIONALES.**

**ANDRES ARZATE MONTEERRUBIO**

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized 'A' followed by a horizontal line and a vertical stroke.

	<b>ÍNDICE</b>	<b>2</b>
<b>1. RESUMEN</b>		<b>6</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN</b>		<b>7</b>
<b>2.1 OBJETIVOS</b>		<b>10</b>
<b>2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>		<b>10</b>
<b>3. CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE</b>		<b>11</b>
<b>3.1 FUNDAMENTOS</b>		<b>11</b>
<b>3.2 VARIACIONES DEL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE</b>		<b>15</b>
<b>3.3 PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE LAS ROCAS</b>		<b>16</b>
<b>3.4 DEFORMACIÓN DEL CAMPO PRIMARIO: ANOMALÍAS MAGNÉTICAS</b>		<b>17</b>
<b>3.5 TIPOS DE MAGNETÓMETROS</b>		<b>19</b>
<b>4. SISTEMA DE ADQUISICIÓN AEROMAGNÉTICO CON DRONES</b>		<b>24</b>
<b>4.1 ANTECEDENTES</b>		<b>24</b>
<b>4.2 ENSAMBLE MAGNETÓMETRO-DRON</b>		<b>27</b>
<b>4.3 PRUEBAS DE RUIDO</b>		<b>32</b>
<b>4.4 ESTRATEGIA DE VUELO Y ADQUISICIÓN DE DATOS AEROMAGNÉTICOS</b>		<b>35</b>
<b>4.5 FORMATO DE DATOS Y SOFWATRE DE PROCESAMIENTO</b>		<b>38</b>
<b>4.6 VUELOS DE PRUEBA</b>		<b>40</b>
<b>5. RESULTADOS</b>		<b>42</b>
<b>5.1 AEROMAGNETOMETRÍA EN LA CALDERA DE LOS HUMEROS .PUE.</b>	<b>42</b>	
<b>5.2 MAAR DE RINCÓN DE PARANGUEO, GTO.</b>		<b>47</b>
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>		<b>53</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>		<b>55</b>
<b>REFERENCIAS</b>		<b>56</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

### TABLAS

<i>Tabla 1.- Valores promedio de susceptibilidades magnéticas de rocas en el sistema cgs.</i>	<i>pp17</i>
<i>Tabla 2.- Tipos de magnetómetros más comunes basados en diferentes principios físicos.</i>	<i>pp21</i>
<i>Tabla 3.- Aplicaciones de levantamientos magnéticos (modificada de Reynolds, 1997)</i>	<i>pp25</i>
<i>Tabla 4.- Características técnicas del magnetómetro LEMI-026</i>	<i>pp29</i>
<i>Tabla 5.- Tipos de archivos utilizados y generados para la visualización de los datos adquiridos en vuelo.</i>	<i>pp40</i>
<i>Tabla 6.- Archivo de texto decodificado usando el programa lemi046.exe con los datos ordenados por columnas. Las columnas 8, 9 y 10 contienen las tres componentes del campo magnético medido.</i>	<i>pp40</i>
<i>Tabla 7.- Formato del archivo de datos que arroja el sistema de posicionamiento integrado al magnetómetro LEMI-026.</i>	<i>pp41</i>

### FIGURAS

<i>Figura 1.- (a) Campo magnético terrestre producido por un dipolo magnético,(b)componentes del vector de campo magnético en un punto de la superficie terrestre</i>	<i>pp14</i>
<i>Figura 2.- Líneas de igual Intensidad de Campo Magnético Terrestre obtenidas a partir del modelo magnético de referencia global el IGRF.</i>	<i>pp14</i>
<i>Figura 3.- Ejemplo del registro de la variación diurna del campo magnético terrestre durante un periodo de tres días en el polo norte (arriba) y en el polo sur (abajo) en donde se observa que las máximas variaciones se registran alrededor de medio día en ambos hemisferios (Breiner, 1973).</i>	<i>pp16</i>
<i>Figura 4.- Ejemplo de una anomalía magnética (arriba) producida por el flujo de un campo magnético incidente sobre un cuerpo magnetizable en el subsuelo (a). Suma vectorial del campo magnético de referencia (IGFR) y del campo anómalo (<math>\Delta F</math>), equivalente al campo magnético observado (b). (Reeves, 2005). La anomalía resultante de esta suma vectorial (c) es interpretada en términos de la distribución de las rocas del subsuelo, en este caso un dique inclinado..</i>	<i>pp18</i>
<i>Figura 5.- Ejemplo de varios cuerpos de forma regular que pueden producir anomalías magnéticas que se observan en superficie como líneas de monopolos, líneas de dipolos, monopolos o dipolos, lo cual depende en gran medida de su geometría, de su profundidad y de la dirección del campo primario en el lugar (Breiner, 1973).</i>	<i>pp20</i>
<i>Figura 6.- Aspectos del laboratorio de drones en el Lab. de Exploración del CGEO en 2015, en donde se diseñaron e imprimieron con impresora 3D diferentes componentes para sujetar cámaras y magnetómetros, así como para repuestos de piezas dañadas entre otros.</i>	<i>pp26</i>
<i>Figura 7.- Magnetómetro LEMI-026 dentro del contenedor de PVC (arriba izquierda) y sin cubierta (arriba izquierda) en donde se muestra la ubicación de los tres sensores magnéticos (FGS). En la parte inferior de la figura se muestra el panel frontal del instrumento.</i>	<i>pp29</i>

**Figura 8.-** Diferentes tipos de sujetadores utilizados durante el proceso de pruebas de campo. Todos excepto el diseñado con cañas de pescar (abajo izquierda) resultaron inapropiados por los campaneos experimentados durante el vuelo. . pp31

**Figura 9.-** Imágenes del sistema de suspensión del dron con el magnetómetro en movimiento. De izquierda a derecha se muestran los diferentes tipos de sujetadores utilizados: 1) hilo de pesca de 25 kg, 2) sistema de suspensión rígido en la base del dron con tubo telescópico de aluminio, 3) manguera de ½" fija al dron, 4) sistema de suspensión de fibra de vidrio retráctil con gimbal de un eje, y 5) sistema de suspensión de fibra de vidrio retráctil con gimbal de tres ejes y dos juegos de libertad en el sujetador del magnetómetro. Este último fue utilizado en la fase final de pruebas por haber dado los mejores resultados de estabilidad. pp32

**Figura 10.-** Series de tiempo de las tres componentes del campo magnético (líneas azul verde y rojo) y campo magnético total del LEMI móvil (board) comparado con el registrado en la base. Como puede observarse, a pesar de la gran variabilidad de las componentes individuales el campo total el valor del campo magnético total coincide con el observado en el magnetómetro base. pp33

**Figura 11.-** Diferencias entre el magnetómetro en vuelo vertical (N002) y el magnetómetro base (N003) en un vuelo experimental para evaluar el efecto de la cercanía del dron con el magnetómetro suspendido. La distancia más corta (2 m) corresponde al intervalo 280 a 450 segundos y la separación más grande (5 m) corresponde al intervalo 450 a 600 segundos de vuelo. pp34

**Figura 12.-** Marco de referencia del campo magnético terrestre (ejes con líneas continuas) y marco de referencia del magnetómetro en vuelo (ejes punteados). Para poder llevar a cabo la interpretación de cualquiera de las componentes individuales del campo es necesario corregir por efecto de la rotación que experimenta el magnetómetro durante el vuelo así como por variaciones diurnas. pp35

**Figura 13.-** Alternativas de rutas de vuelo de adquisición de datos aeromagnéticos. Los levantamientos realizados en Rincón de Parangueo y en la caldera Los Humeros fueron realizados utilizando el plan de vuelo de la izquierda (b). pp37

**Figura 14.-** Atenuación de la amplitud de la anomalía magnética y reducción de la resolución lateral como función de  $1/r^3$ . pp39

**Figura 15.-** Diferentes aspectos de pruebas realizadas previas a la sistematización de los vuelos y previas a las pruebas definitivas en zonas de interés geológico. pp43

**Figura 16.-** Ubicación de la caldera de Los Humeros (arriba) y aspecto general del campo geotérmico. Los vuelos fueron realizados en una zona contigua. pp45

**Figura 17.-** Sistema aeromagnético de adquisición (SAM) utilizado para el levantamiento en la caldera de Los Humeros (izq.) en donde se observan los diferentes componentes. A la derecha de la figura se muestra el magnetómetro en vuelo con el sistema de suspendido verticalmente con estabilizador de vuelo multiaxial. pp47

**Figura 18.-** a) Mapa de geológico de caldera Los Humeros. ( Gerardo Carrasco-Núñez Javier Hernández) b) Levantamiento aeromagnético realizado con dron, campo total. c) Levantamiento del Servicio Geológico Mexicano, campo total. pp48

**Figura 19.-** Ubicación del cráter maar de Rincón de Parangueo (RP) forma parte del cinturón volcánico mexicano (arriba a la der.) y se alinea con otros edificios volcánicos (izq. y abajo der.)

**Figura 20.-** Cráter de Rincón de Parangueo (izq.) (Aranda-Gómez et al., 2004) en donde se muestra con línea continua el perfil gravimétrico interpretado (der.). El modelo de la estructura interna del cráter muestra la diatrema del mismo ubicada en el sector central del cráter. pp50

**Figura 21.-** Levantamiento aeromagnético en el cráter de Rincón de Parangueo. Del lado izquierdo se muestra el proceso de acoplamiento del magnetómetro al dron utilizando el sujetador extensible de fibra de carbón mientras se mantiene a una altura constante con el tren de aterrizaje retraído. A la derecha se muestra el sistema aeromagnético en operación. pp51

**Figura 22.-** a) Mapa de campo magnético total obtenido a partir de un vuelo aeromagnético con duración efectiva de ~15 minutos. En la parte central se puede observar una anomalía de carácter dipolar asociada a la diatrema de cráter. b) Mapa campo magnético total obtenido con magnetometría terrestre. c) Ortofoto del cráter con perfiles de vuelo aeromagnético (líneas negras paralelas) y perfiles terrestres (líneas de triángulos) se observa como las mediciones terrestres tuvieron que rodear las zonas inundadas. pp54

**Figura 23.-**a) modelo estructural del cráter Maar Rincón de Parangueo b) perfil Gravimetría sobre perfil I-2 c) Magnetometría terrestre sobre I-2, Yutis 2014 d) perfil Aeromagnético con dron sobre I-2. pp56

## 1. RESUMEN

En esta investigación se desarrolló un sistema de exploración aeromagnética, utilizando magnetómetros tipo *fluxgate* que fueron especialmente diseñados para ser transportados por un dron y utilizados en modo de adquisición continua. Este magnetómetro, modelo LEMI-026, se diseñó a partir de un convenio del Laboratorio de Exploración Geofísica del Centro de Geociencias (CGEO) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), con el Laboratorio de Electromagnetismo de la Academia Ucraniana de Ciencias. Como resultado, se logró construir un magnetómetro ligero y de bajo costo, con una frecuencia de 250 muestras/segundo. Dicho magnetómetro no se produce comercialmente y se espera que a partir de los resultados de este trabajo se lleven a cabo los cambios necesarios para mejorar su desempeño y versatilidad.

Como parte de este trabajo se desarrollaron las componentes mecánicas y electrónicas necesarias del sistema aeromagnético para su adecuado funcionamiento, entre las que se encuentran el sujetador del magnetómetro al dron, que fue una parte fundamental para mantener al magnetómetro en posición vertical. También, se llevaron a cabo las pruebas necesarias para validar los procedimientos de vuelo y de adquisición, como también, para el procesado de los datos y su análisis cuantitativo e interpretación cualitativa. De igual manera, se realizaron pruebas de ruido y pruebas de vuelo en diferentes aeronaves, se experimentaron diversos tipos de ensamblajes magnetómetro-dron para hacer más estables los vuelos del sensor triaxial y optimizar su funcionamiento. Uno de los mayores retos fue reducir el “campaneo” (movimiento del sistema de suspensión oscilatorio) del magnetómetro en vuelo, lo cual se logró a un mínimo mediante el diseño de un sujetador con tres grados de libertad y un estabilizador mecánico con dos grados de libertad adicionales. Con ello, se estandarizó el procedimiento de adquisición y el procesamiento de los datos, lo cuales pueden alcanzar los 150,000 datos en vuelos de sólo 10 minutos.

Finalmente, se llevaron a cabo vuelos de prueba en zonas de interés geológico para demostrar el correcto funcionamiento del sistema desarrollado. Uno de los levantamientos fue realizado en el cráter maar Rincón de Parangueo, sitio que fue seleccionado debido a la existencia de mediciones magnéticas terrestres con el propósito de comparación. De manera paralela, se hizo otro levantamiento en la caldera de Los Humeros, en el marco del proyecto “Innovación en la aplicación de técnicas modernas de prospección geotérmica a partir de la integración de métodos geológicos, geoquímicos y geofísicos, caso de estudio del campo



volcánico-geotérmico de Los Humeros” (Consortio SENER-CONACYT CeMie-Geo, P05).

## **ABSTRACT**

As part of this research, an electromagnetic scanning system was developed using fluxgate magnetometers specially designed to be transported by a drone and used in continuous acquisition mode. This allows the generation of polygons or magnetic data profiles in areas with all kind of topographies and areas not accessible on foot as well as time efficient data recollection. From an agreement of the Geophysical Exploration Laboratory of the Center for Geosciences (CGEO) of the National Autonomous University of Mexico (UNAM), with the Electromagnetism Laboratory of the Ukrainian Academy of Sciences, a Magnetometer model LEMI-026, fluxgate type, light and low cost, was developed for the acquisition of aeromagnetic data with a frequency of 250 samples/second. This magnetometer is not produced commercially, and it is expected that the necessary changes will be made from the results of this work to improve its performance and versatility.

This work developed the necessary mechanical and electronic components of the aeromagnetic system for proper operation, including the drone magnetometer fastener which was a critical part of keeping the magnetometer upright. In addition, the necessary tests were carried out to validate the flight and procurement procedures, and for the processing of the data for quantitative analysis and qualitative interpretation. Similarly, noise tests and flight tests were performed on different aircraft, various types of magnetometer-drone assemblies were tested to make triaxial sensor flights more stable and optimize its operation. One of the biggest challenges was to reduce the "pendulating" (movement of the oscillating suspension system) of the in-flight magnetometer, which was achieved to a minimum by designing a rod with three degrees of freedom and a mechanical stabilizer with two additional degrees of freedom. This standardized the process of acquiring and processing the data, which can reach 150,000 data on flights of only 10 minutes.

Finally, test flights were carried out in areas of geological interest to demonstrate the proper functioning of the developed system. One of the surveys was carried out in the maar Rincón de Parangueo crater, a site that was selected for terrestrial magnetic measurements for the purpose of comparison with magnetic data measured with the aeromagnetic system. In parallel, another survey was carried out in the Los Humeros caldera, within the framework of the project "Innovation in the application of modern

geothermal prospecting techniques from the integration of geological, geochemical and geophysical methods, case study of the volcanic-geothermal field of Los Humeros" (Consortio SENER-CONACYT CeMie-Geo, P05).

## 2. INTRODUCCIÓN

Los métodos y equipos de exploración geofísica han estado evolucionando tanto en el procesado de los datos a través del desarrollo de software de procesamiento e interpretación, como en la tecnología de adquisición siendo un ejemplo de ello la exploración aérea con drones.

Su uso y aplicaciones en estudios relacionados con las Ciencias de la Tierra son variadas, dentro de las cuales se destacan la realización de mapas geológicos, topográficos, sedimentológicos, mineralógicos, de riesgo geológico y naturales, geofísicos, estructurales, así como control y monitoreo de explotaciones mineras, estudios costeros, de suelos en la agricultura, evaluación de yacimientos petroleros, estudios estratigráficos, estudio de volcanes, entre otros ([Guardado et al., 2017](#)).

En el área de la geofísica y en particular de la exploración, la posibilidad de incorporarles distintos tipos de sensores como son los gravimétricos, electromagnéticos o radio-magnetotélúricos está facilitando enormemente la toma de información de una forma rápida y económica. Un sistema aeromagnético con drones permite realizar levantamientos aeromagnéticos a altitudes de al menos 50 m sin la necesidad de aeródromo y el costo de las horas de vuelo de los aviones grandes ([Caron et al. 2014](#); [Wood et al. 2016](#); [Parshin et al., 2016](#); [Gavazzi et al., 2016](#); [Parshin et al., 2018](#)), como también, permite cubrir en cuestión de minutos extensiones de terreno que tardarían días en cubrirse utilizando magnetometría terrestre. Además, tiene la ventaja adicional de que es posible explorar zonas de difícil acceso y controlar tanto la velocidad como la altura de adquisición del dron que transporta al magnetómetro de acuerdo con las necesidades del terreno.

A diferencia de los sistemas de adquisición aeromagnética comerciales con drones, que utilizan por lo general magnetómetros de protones, un magnetómetro *fluxgate* cuenta con tres sensores calibrados para medir las tres componentes perpendiculares del campo magnético ([Primdahl, 1979](#); [Gavazzi et al., 2016](#)), lo cual permite la interpretación de las componentes individuales del campo magnético o bien la del campo magnético total. Además de incrementar las posibilidades de ubicación de cuerpos anómalos, los sensores *fluxgate* son más ligeros, sensibles, robustos y económicos, pues suelen costar una fracción de lo que cuestan los de protones o los de cesio.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un Sistema Aeromagnético para Drones (SAMpD) de adquisición utilizando dos magnetómetros *fluxgate* LEMI-026, construidos bajo un convenio con el Laboratorio de Electromagnetismo de la Academia de Ciencias de

Ucrania. En total se construyeron dos sensores, de los cuales uno de ellos fue utilizado como referencia, como base, para la corrección de la variación diurna durante el periodo de adquisición. El otro, fue transportado por un dron multirrotor de seis hélices (DJI *Matrice 600*) al cual se fijó, utilizando un *gimbal* (estabilizador mecánico), diseñado para reducir al máximo el balanceo del sensor y con ello poder disminuir los errores en la adquisición de los datos. A pesar de los balanceos, principalmente durante los cambios de dirección de vuelo, el LEMI-026 cuenta con un sensor de verticalidad que registra los ángulos de inclinación o *tilt* de cada dato adquirido, con el fin de corregir por este efecto si se desea interpretar alguna de las componentes por separado. La frecuencia de adquisición de los magnetómetros es de 250 Hz y cuentan con un GPS integrado con una frecuencia de 10 Hz; por esta diferencia en la frecuencia de adquisición, entre magnetómetro y GPS, se diseñaron protocolos de vuelo de adquisición y procedimientos para el filtrado de las series espaciales, con lo cual se generó una base de datos compatible con la posición a un promedio de 10 mediciones por segundo. Una vez filtrada la base de datos aeromagnética, se corrigen los datos por el *tilt* y por la variación diurna utilizando la serie de tiempo filtrada de la estación base de referencia. A partir de esta operación es posible obtener la anomalía del campo magnético total o de cualquiera de sus componentes.

Este sistema de exploración aeromagnética desarrollado fue probado en dos sitios de investigación, con diferentes extensiones y características, topográficas y geológicas, con lo cual se puede evaluar la aplicabilidad de la técnica en distintas circunstancias. Se presentan los resultados obtenidos del estudio piloto dentro del cráter maar Rincón de Parangueo, Gto., en donde existen datos magnéticos terrestres, a efecto de comparar sus resultados. También, se presentan los resultados obtenidos en una pequeña área dentro de la caldera de Los Humeros, Pue. Estos últimos resultados se compararon con datos aeromagnéticos del Servicio Geológico Mexicano (SGM, 1996) en ausencia de datos magnéticos terrestres.

## **2.1 Objetivo**

Desarrollar, evaluar y validar un sistema aeromagnético de bajo costo y de alta precisión para su futura utilización por el Laboratorio de Exploración geofísica del CGEO-UNAM.

## **2.2 Objetivos específicos**

- 
- Probar y evaluar el funcionamiento de un sistema aeromagnético con el magnetómetro *fluxgate* LEMI-026.

- Seleccionar, entre las posibilidades disponibles, el dron más versátil para transportar dicho magnetómetro.
- Desarrollar las componentes mecánicas y electrónicas necesarias del sistema aeromagnético
- Llevar a cabo las pruebas de ruido necesarias para validar los límites de resolución de los datos adquiridos.
- Llevar a cabo pruebas de campo levantamientos aeromagnéticos con drones para establecer los parámetros óptimos de vuelo y adquisición.
- Generar cartas de anomalía de campo magnético total en las zonas de prueba seleccionadas, Rincón de Parangueo y caldera de Los Humeros.
- Protocolizar la adquisición de datos y su integración a reportes.

### 3. CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

#### 3.1 Fundamentos teóricos

La Tierra actúa como un imán gigantesco y la dirección e intensidad del campo magnético varían de un punto a otro sobre la superficie terrestre. De este imán surge el flujo magnético que se propaga desde el polo negativo hacia el positivo, las intensidades de ambos polos son iguales en magnitud, pero de signo contrario. Existe una analogía con la ley de Coulomb ([Griffiths, 1998](#)) de cargas eléctricas, pero entre polos magnéticos, de ahí que la expresión para las fuerzas magnéticas establece que si dos polos magnéticos  $m_1$  y  $m_2$  están separados por una distancia  $r$ , la fuerza entre ellos está dada por ([Telford et al., 1976](#)):

$$F_m = \frac{m_1 m_2}{\mu r^2} \cdot r_1 \quad (1)$$

donde  $F_m$  es la fuerza del polo magnético  $m_1$  sobre el polo  $m_2$ ,  $r_1$  es el vector unitario que separa  $m_1$  de  $m_2$  y  $\mu$  es la permeabilidad magnética.

La fuerza magnética es atractiva si los polos son de diferente signo y repulsiva si estos son del mismo signo. El campo magnético generado por un polo  $m$  localizado a una distancia  $r$  del polo, es definido como la fuerza sobre un polo unitario:

$$H = \frac{F_m}{m'} = \frac{m}{\mu r^2} \quad (2)$$

El campo magnético se representa por líneas de fuerza continuas que fluyen del polo sur magnético hacia el polo opuesto, la densidad de estas líneas se define como el número de líneas de campo por unidad de área ([Cunningham, 2016](#)). La unidad del campo magnético en el sistema internacional (SI) es el *Oersted*, donde un Oersted es la intensidad del campo en un punto en donde se ejerce una fuerza de una *dina* (1 dyn = 1 g·cm/s<sup>2</sup> =

$10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2 = 10^{-5} \text{ N}^2$  ) sobre un polo magnético unitario. Sin embargo, en geofísica se prefiere usar como unidad el gamma ( $\gamma$ ) o el nano-Tesla (nT), debido a que el *Oersted* es una unidad muy grande. La relación de unidades es:  $10^{-5}$  Oersted = 1 gamma = 1 nano Tesla (nT) (Sabins, 1986).

Cuando un material se ubica en un campo magnético puede adquirir por inducción una magnetización en la dirección del campo, la cual se pierde cuando el material es removido de dicho campo. Este proceso es conocido como magnetización inducida o polarización magnética. La intensidad de la magnetización inducida  $I$  es proporcional a la fuerza de la fuerza de magnetización  $F$  del campo inducido:

$$I = \kappa F \quad (3)$$

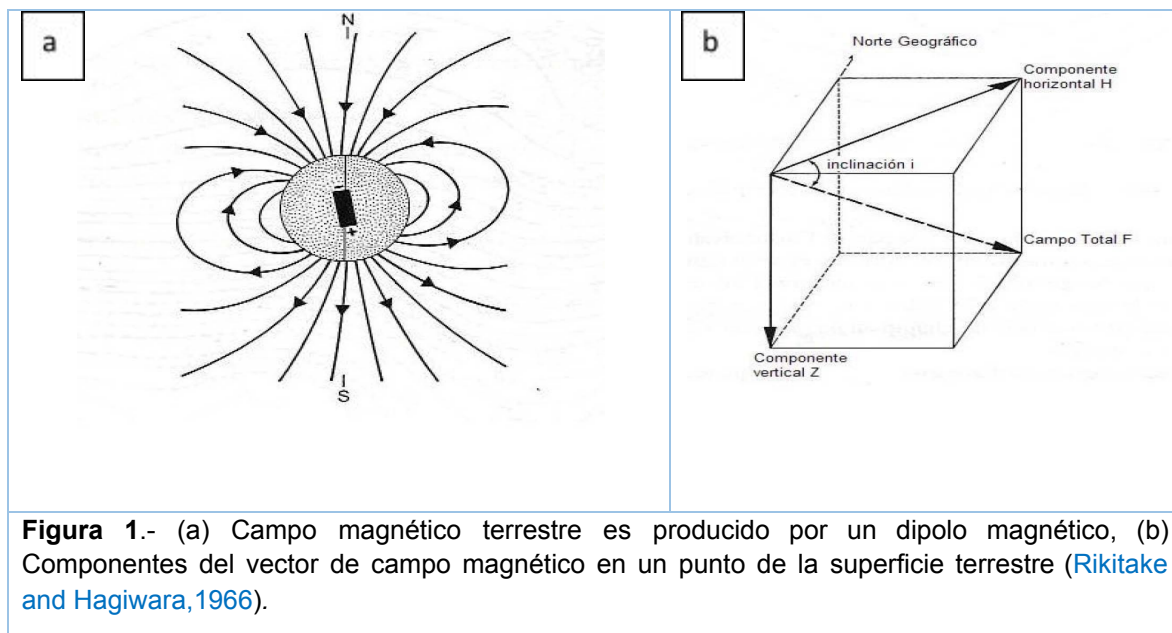
donde  $\kappa$  representa la constante de proporcionalidad y se conoce como susceptibilidad magnética (Cunningham, 2016).

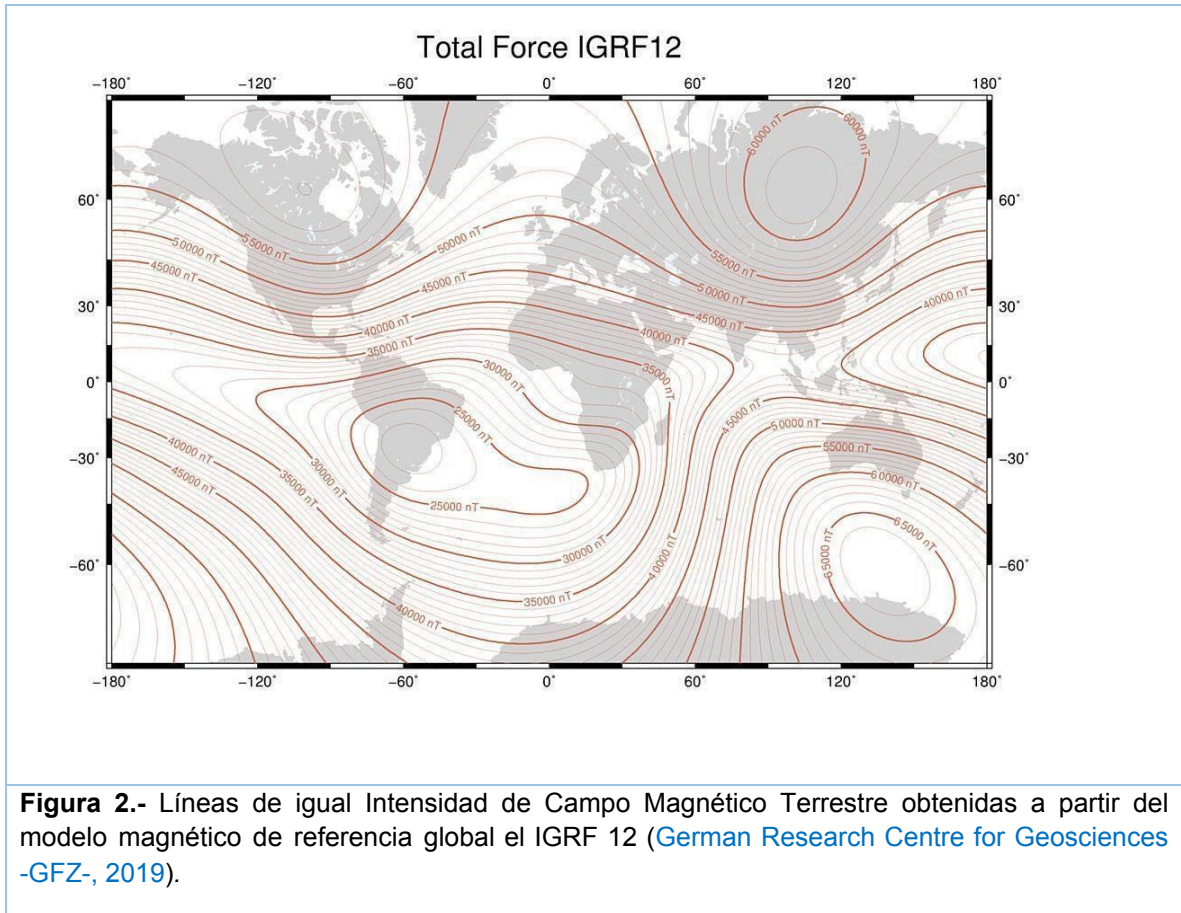
Telford et al. (1976), estableció que todos los materiales que se someten a un campo externo pueden ser clasificados, con base a su comportamiento magnético, en tres grupos principales: los materiales paramagnéticos son aquellos que tienden a alinearse a lo largo de su dimensión mayor en la dirección del campo externo y su valor de  $\kappa$  es positivo; los diamagnéticos son materiales que tienen susceptibilidades magnéticas negativas, por ejemplo la anhidrita y sal de roca; y los materiales ferromagnéticos son aquellos en que la interacción entre átomos y grupos de átomos es tan fuerte que existe un alineamiento de momentos dentro de una región muy grande del material. La susceptibilidad magnética no tiene unidades, pero difiere por un factor de  $4\pi$  entre los sistemas Centímetro Gramo Segundo (CGS) y el Sistema Internacional (SI) (Reynolds, 1997). La magnetización de una roca no depende solo del campo magnético al cual se encuentra expuesto, sino también a su magnetización remanente. La magnetización remanente en las rocas es función de su composición mineralógica, su evolución y de los cambios en el campo geomagnético a lo largo de su historia geológica (Urrutia-Fucugauchi, 1977).

El campo magnético terrestre, esquematizado en la (fig. 1 a), se representa localmente por un vector del campo total que lleva la nomenclatura de  $F$  y sus componentes reciben la nomenclatura de horizontal  $H$  y vertical  $Z$  (fig. 1b). La prospección magnética se basa en el análisis de las anomalías magnéticas, que son aquellas variaciones debidas a la distorsión local del campo magnético terrestre. Dichas anomalías magnéticas modifican localmente la dirección y magnitud del vector que representa el campo. Estas anomalías son producidas por la distribución y la presencia de cuerpos con contenido de magnetita, un mineral común en la naturaleza, y en menor medida por ilmenita y pirrotita. Para las anomalías magnéticas inducidas, la inclinación del campo magnético en el lugar

determina las características de su distorsión. Las anomalías magnéticas remanentes tienen la característica que dependen más de la inclinación del campo magnético de otras épocas geológicas que ha quedado grabado en las rocas de manera permanente, dependiendo de su dirección y época de formación. La forma de dichas anomalías depende por una parte de la inclinación del campo, actual o pasado, y por otra, de la posición, dimensiones, forma y naturaleza de los cuerpos anómalos (Reeves, 2005).

En un punto cualquiera de la superficie terrestre, una aguja metálica suspendida libremente adquirirá una dirección de acuerdo del campo magnético terrestre en ese punto. El cual generalmente tendrá una componente vertical  $Z$  y una componente horizontal  $H$  en la dirección del norte magnético. La inclinación ( $I$ ) se define como el ángulo entre el campo magnético total ( $F$ ) y el plano horizontal (ver fig. 1b), y el ángulo entre el norte geográfico y el norte magnético es lo define como declinación ( $D$ ). El campo magnético terrestre posee una variación entre  $\sim 19000$  nT en la región ecuatorial hasta  $70,000$  nT en los polos (Kearey et al., 2011; fig. 2).





**Figura 2.-** Líneas de igual Intensidad de Campo Magnético Terrestre obtenidas a partir del modelo magnético de referencia global el IGRF 12 (German Research Centre for Geosciences -GFZ-, 2019).

El *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF), es un modelo matemático del campo geomagnético terrestre, en términos de armónicos esféricos, que describe el comportamiento del campo magnético regional en función de la latitud (<https://www.ngdc.noaa.gov/AGA/vmod/igrf.html>) y es dado por la ecuación:

$$V(r, \theta, \phi, t) = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} [g_n^m(t) \cos(m\phi) + h_n^m(t) \sin(m\phi)] P_n^m(\cos \theta) \quad (4)$$

donde  $r$  es la distancia radial desde el centro de la tierra,  $L$  es el máximo grado de expansión  $\phi$  es la longitud Este,  $\theta$  es la latitud,  $a$  es el radio terrestre,  $g$  y  $h$  son coeficientes de Gauss,  $P$  es una función normalizada de Schmidt de grado  $l$  y de orden  $m$ .

El IGRF representa el campo magnético de referencia y se utiliza para estudios magnéticos locales y/o regionales, es útil para la separación del campo magnético de referencia de las anomalías detectadas en la superficie para la interpretación geológica de las mismas. Sin embargo, debido a las variaciones seculares del campo magnético, en la distribución interna de rocas en el interior de la Tierra o a cambios en el patrón de radiación solar, este modelo se actualiza cada cinco años para tomar en cuenta las



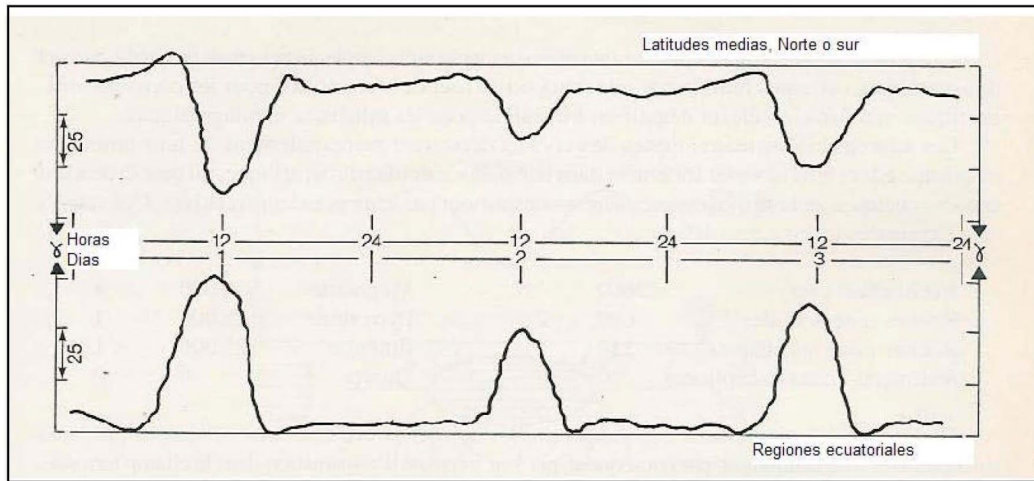
variaciones ocurridas en el periodo, siendo la vigencia del IGRF actual hasta finales de 2019 (<https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>).

### **3.2. Variaciones del campo magnético terrestre.**

El campo magnético terrestre sufre variaciones en tiempo y espacio producto de diversas fuentes internas y externas. Las variaciones más importantes del campo magnético terrestre son de carácter temporal:

- a) La variación secular con valores de decenas de nT al año. En algunos sitios alcanza hasta 150 nT/año y de 6 a 10 minutos/año para la declinación e inclinación magnética.
- b) Las variaciones periódicas, con periodos de doce horas, un día, veintisiete días, seis meses, y un año. Estas variaciones pueden llegar a tener valores de hasta 100 nT.
- c) Las variaciones no periódicas, asociadas a las tormentas magnéticas, con fluctuaciones de hasta 500 nT.
- d) Las pulsaciones magnéticas que son variaciones con periodos muy cortos y amplitudes muy pequeñas.

Como se mencionó anteriormente, las variaciones diurnas (fig. 3) son las más importantes desde el punto de vista de la exploración magnética, por lo que se deben de tomar en cuenta durante el procesado de los datos. Esto se lleva a cabo utilizando un magnetómetro de referencia en una estación base, el cual debe medir en todo momento que se hagan mediciones con el magnetómetro móvil. Es decir, este magnetómetro base se coloca antes y durante todo el tiempo que se adquieran datos móviles. Con ello será posible corregir los valores adquiridos durante el lapso de tiempo medido. Para un siguiente periodo de medición, el procedimiento se repite.



**Figura 3.-** Ejemplo del registro de la variación diurna del campo magnético terrestre durante un periodo de tres días en el polo norte (arriba) y en el polo sur (abajo), donde se observa que las variaciones máximas se registran alrededor del mediodía en ambos hemisferios (Breiner, 1973).

### 3.3 Propiedades magnéticas de las rocas

Debido a que las variaciones del campo magnético medido por los magnetómetros, con su corrección diurna, es mucho menor al del valor del campo magnético Total, y si se utiliza el modelo IGRF como una representación matemática del campo geomagnético terrestre, se obtiene la distribución de los cuerpos magnéticos en la corteza, denominado anomalía del campo magnético local o residual.

Las rocas que producen anomalías magnéticas son aquellas que difieren de las rocas encajonantes por su intensidad de magnetización  $I$ . Esta propiedad se puede describir como la facultad de un material para polarizarse magnéticamente bajo la influencia de un campo exterior  $F$ . Algunos valores medios experimentales (Reynolds, 1997) en unidades c.g.s.  $\times 10^6$  se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.-Valores promedio de susceptibilidades magnéticas de rocas en el sistema CGS. (Reynolds 1997).

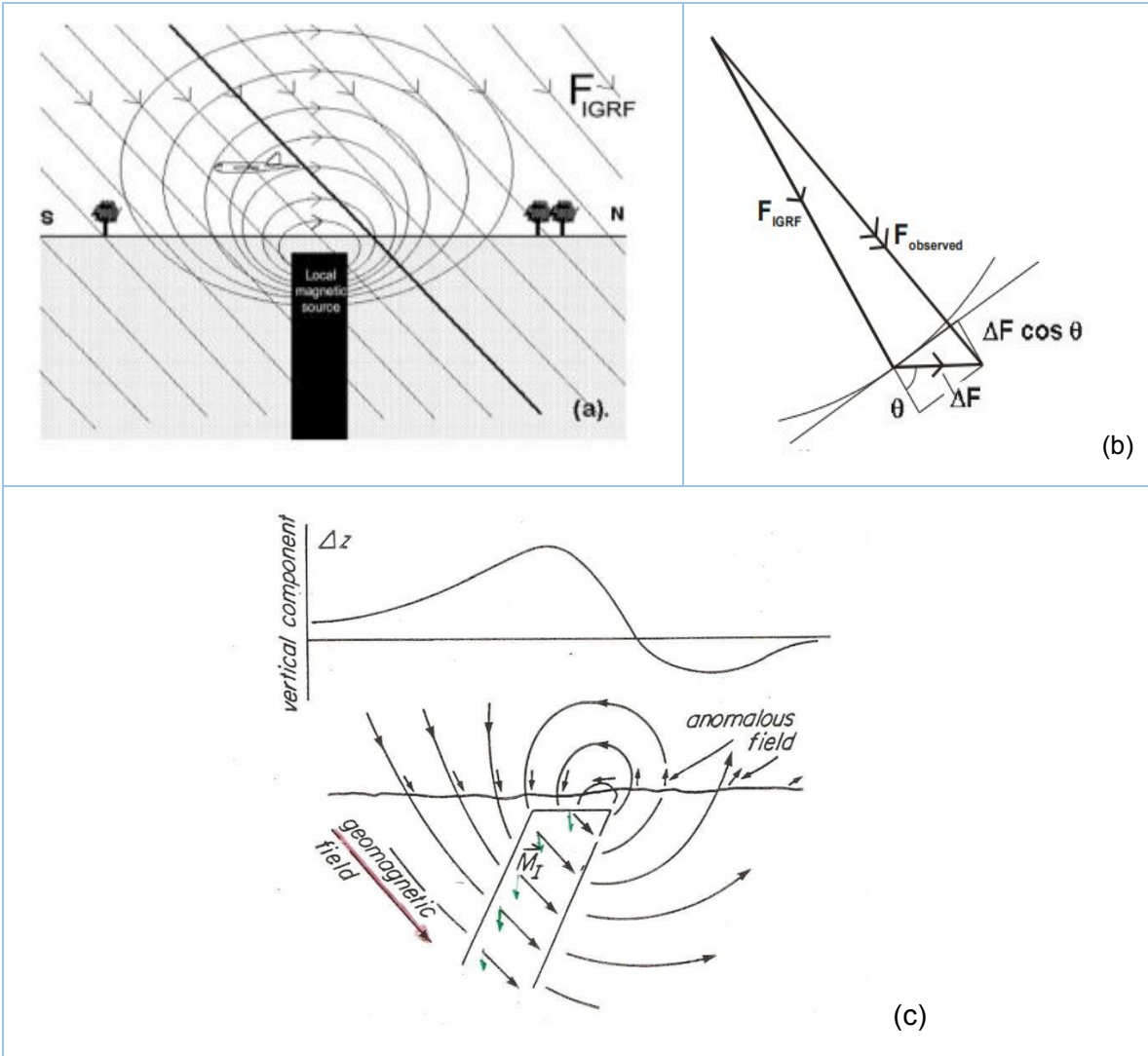
Mineral or rock type	Susceptibility*
<i>Sedimentary</i>	
Dolomite (pure)	- 12.5 to + 44
Dolomite (impure)	20 000
Limestone	10 to 25 000
Sandstone	0 to 21 000
Shales	60 to 18 600
<b>Average for various</b>	<b>0 to 360</b>
<i>Metamorphic</i>	
Schist	315 to 3000
Slate	0 to 38 000



Como se puede observar, ciertas familias de rocas difieren notablemente en la susceptibilidad magnética y, en consecuencia, en la intensidad de magnetización bajo el campo magnético terrestre.

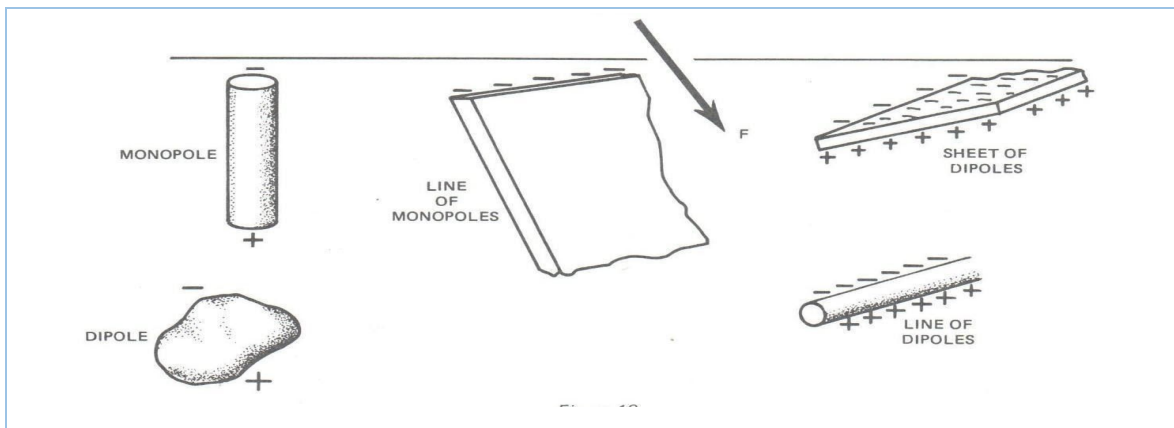
### 3.4. Deformación del campo magnético primario: Anomalías magnéticas

Los minerales y las rocas magnéticas se polarizan bajo el efecto del campo magnético terrestre y perturban el campo magnético en sus alrededores. El efecto neto de la interacción entre el campo magnético primario y el campo inducido se puede conocer a partir de la suma vectorial de ambos (Reeves, 2005, fig. 4). La anomalía magnética resultante es positiva cuando la suma vectorial del campo primario más el campo secundario (campo inducido localmente) es mayor que el campo normal y es negativa cuando el vector resultante es menor



**Figura 4.-** (a) Ejemplo de una anomalía magnética producida por el flujo de un campo magnético incidente sobre un cuerpo magnetizable en el subsuelo. (b) Suma vectorial del campo magnético de referencia (IGFR) y del campo anómalo ( $\Delta F$ ), equivalente al campo magnético observado (Reeves, 2005). (c) La anomalía resultante de esta suma vectorial es interpretada en términos de la distribución de las rocas del subsuelo, en este caso un dique inclinado.

En general las anomalías magnéticas pueden ser consideradas como causadas por varias distribuciones de fuentes monopulares o dipolares, además, de que es posible producir cualquier anomalía simple a partir de la superposición de las firmas monopulares y dipolares observadas. La magnitud de las anomalías puede variar considerablemente de un lugar a otro dependiendo de la dirección del campo magnético local. Todas las formaciones rocosas paramagnéticas, colocadas en el campo magnético terrestre, se pueden considerar como un dipolo, un monopolo, o un conjunto de dipolos o monopolos (Breiner, 1973). Ello se aprecia en la figura 5, donde se muestran ejemplos con cuerpos de forma regular, a latitudes medias, que pueden producir anomalías dipolares o monopulares. Observados desde la superficie y dependiendo de la inclinación del campo en el sitio, ciertos cuerpos pueden tomar la forma y las características de monopolos o de líneas de monopolos. El análisis de las anomalías permite definir si se pueden caracterizar como producto de dipolos o de monopolos.



**Figura 5.-** Ejemplo de varios cuerpos de forma regular que pueden producir anomalías magnéticas que se observan en superficie, como líneas de monopolos, líneas de dipolos, monopolos o dipolos, lo cual depende en gran medida de su geometría, de su profundidad y de la dirección del campo primario (vector gris marcado con F) en el lugar (Breiner, 1973).

### 3.5. Tipos de Magnetómetros

La historia de los magnetómetros para la exploración es corta, tuvo sus inicios a mediados de la Segunda Guerra Mundial con la invención de magnetómetros electrónicos. El avance tecnológico generado en tiempos de guerra facilitó el desarrollo de la magnetometría ya que los componentes de los magnetómetros, como *chips*, baterías y

electrónica en general, se fue reduciendo tanto de tamaño como de precio al mismo tiempo que aumentaban en precisión (Reeves, 2005). Este desarrollo trajo consigo también la creación del magnetómetro de precesión de protones y eventualmente de los magnetómetros de bombeo óptico. El magnetómetro conocido como *fluxgate*, que utiliza tres bobinas de inducción magnética ortogonales para medir las tres componentes del campo magnético en el espacio (Primndahl, 1979), fue una de las primeras herramientas de guerra aérea (segunda guerra mundial) para la búsqueda de submarinos con el fin de destruirlos, convirtiéndose así en los primeros levantamientos aeromagnéticos (Reford and Sumner, 1964; Hanna, 1990)

En la actualidad, existe una gran diversidad de magnetómetros usados para la exploración geofísica, donde existen versiones de magnetómetros muy sencillas, las cuales van desde una simple barra de alta susceptibilidad magnética hasta magnetómetros que dependen de gases súper enfriados, en general siendo más precisos mientras mayor sea su complejidad. La tabla 2 presenta una lista del tipo de magnetómetros más comunes, tanto para exploración geofísica como para mediciones en laboratorio (Macintyre, 1999).

<b>Tabla 2.- Tipos de magnetómetros más comunes basados en diferentes principios físicos. (Macintyre, 1999)</b>		
<b>TIPO</b>	<b>RESOLUCIÓN (nT)</b>	<b>CARACTERISTICAS</b>
Zeeman óptico	$10^4$	-Utilizados para campos solares fuertes
Variómetro clásico	$10^{-1}$	-Utilizados en muchos observatorios -Generalmente menos sensibles -Respuesta pobre a pulsaciones -Por su diseño simple es muy confiable
<b>Fluxgate</b>	$10^{-1}$	-Presentes en casi todos los observatorios modernos -Uso en satélites para campos débiles -Sensibles al estrés y temperatura -Existen versiones de bajo ruido para pulsaciones
Protones	$10^{-1}$	-Ideal para mediciones de campo total -Mala respuesta a pulsaciones -Utilizados a manera de referencia en observatorios -Uso extenso en el campo de la Geofísica
de Bombeo Óptico	$10^{-2}$	-Mediciones de campo total -Son utilizados en satélites -Diseño electrónico complejo -Alta frecuencia de medición -Amplio Rango de frecuencias
Loop de inducción	$10^{-4}$	-Mide la tasa de cambio del campo -Frecuencia de medición baja -Utilizados en algunos satélites -Ideales para medir pulsaciones
Sonda corriente tierra	$10^{-5}$	-Buenos para levantamientos geológicos -Buenos para mediciones de pulsaciones -Diseño muy simple -Presenta dificultades para su calibración

SQUID	$10^{-5}$	-Uso extensivo para el muestreo de rocas -Electrónica muy compleja -Problema de evaporación de Helio líquido
-------	-----------	--

## Magnetómetros para Exploración Geofísica

En general, los magnetómetros más comunes para el uso en exploración geofísica son: el magnetómetro de protones, basado en la oscilación de moléculas de H<sub>2</sub>O; el de cesio, basado en el efecto Zeeman; y el tipo *fluxgate* basado en la inducción magnética directa en un material altamente permeable.

### Magnetómetro de Protones

Los magnetómetros de protones se desarrollaron casi al mismo tiempo que los magnetómetros *fluxgate*, pero se basan en un principio físico diferente en su medición. Su construcción y uso son relativamente sencillos, por lo que los hace un instrumento muy utilizado en los trabajos de prospección Geofísica (Lowrie, 1997). La parte principal de este instrumento consta de un recipiente en el cual se encuentra una gran cantidad de átomos de hidrógeno, los cuales son excitados por un campo magnético artificial producido por una bobina. Una vez que se interrumpe la corriente excitadora, en la bobina ocurre una interacción entre los átomos de hidrógeno y el campo geomagnético local, produciéndose un giro en los espines atómicos llamado "precesión". Al medir la frecuencia de oscilación de los espines, la cual es proporcional a la intensidad del campo en el sitio, es posible conocer la magnitud **F** del campo magnético total. La frecuencia de precesión ronda los 2,000 Hz para un campo terrestre de aproximadamente 50,000 nT, la cual se puede medir con un contador digital en valor absoluto de la intensidad de campo total con una precisión de hasta 0.1 nT. El magnetómetro de protones sólo mide la magnitud del vector del campo magnético, cuya dirección es prácticamente paralela a la del vector sin perturbación, es decir, mide el campo magnético total más la componente de la perturbación en la dirección del campo total (Breiner, 1973).

Una de las características principales de este tipo de magnetómetros es que los datos medidos son independientes a la orientación del sensor, lo cual permite que el magnetómetro se opere sin cuidado de su orientación, lo cual facilita su operación de manera móvil. Adicionalmente, los magnetómetros de protones tienen una buena resolución y permite visualizar de forma digital las mediciones en tiempo real. Sin embargo, debido a que solo miden la magnitud del campo magnético total, es imposible analizar las componentes individuales en caso de que sea esto necesario, aunado a que la señal disminuye bruscamente en presencia de un gradiente de campo magnético muy

intenso, es decir mayor a 600 nT por metro. La amplitud de la señal del sensor es del orden de los microvoltios por lo que debe ser medida con una precisión de 0.4 Hz, lo cual resulta difícil de medir en la cercanía de corrientes eléctricas alternas y por ende en zonas urbanas es difícil obtener buenos datos.

#### Magnetómetro de bombeo óptico

En este tipo de magnetómetro la luz, con una longitud de onda adecuada, es absorbida por una célula de vapor alcalino (Campbell, 2003). Con dicha absorción, los niveles altos de energía se cargan y remiten energía a los niveles más bajos. Parte de esta remisión sigue una ruta “prohibida” a un nivel que es conocido por ser sensitivamente cambiado por la fuerza electromagnética local. Cuando la absorción se detiene debido a la carga completa de ese estado energético particular, las ondas de radiofrecuencia dentro de un rango determinado por ese nivel “prohibido” pueden bajar de nivel para que se pueda volver absorbente una vez más. La célula de rubidio cambia entre transparente y opaco, respondiendo a una fuente de luz oscilando en la frecuencia *Larmor* precedida (Liang, Z.P. and Lauterbur P.C. et al., 2000), que corresponde al nivel seleccionado de energía que es capaz de cambiar de posición con la fuerza electromagnética local. En la actualidad se han desarrollado magnetómetros más precisos de rubidio que aíslan un solo subnivel energético.

El Magnetómetro de rubidio común tiene una sensibilidad limitada a aproximadamente 0.2 nT. El magnetómetro mide el campo total y las variaciones a lo largo de todas las direcciones del campo. La ventaja de este instrumento es que opera bien en campos magnéticos débiles y tiene un tiempo rápido de respuesta, lo que le da un mejor uso en satélites. El principal problema del instrumento es la corta duración de sus células de absorción y lo complicado de los circuitos del instrumento.

El helio también es utilizado en magnetómetros de bombeo óptico. El campo eléctrico de baja radiofrecuencia de estos átomos puede ser excitado a un estado metaestable que tiene relativamente una vida larga y se divide en subniveles por el efecto del campo magnético en el ambiente. A partir de este estado base, el bombeo y la detección del campo geomagnético, de este estado, es similar a lo descrito anteriormente para las células de rubidio. Los magnetómetros de helio comerciales mencionan poseen una sensibilidad de alrededor de 0.01 nT (Macintyre, 1999).

#### Magnetómetro Fluxgate

Los magnetómetros *fluxgate* son llamados así por la manera en que periódicamente se intercala la medición de los sensores magnéticos cambiando su flujo magnético. En instrumentos de este tipo la heterogeneidad de las propiedades de magnetización de alta permeabilidad, encontrada en partículas ferromagnéticas, puede ser utilizada como un indicador de la fuerza del campo local (Primdahl, 1979).

El instrumento se compone de dos núcleos cilíndricos paralelos de un material de alta permeabilidad magnética con devanados en serie, pero en sentido inverso, de tal manera que al pasar por ellos una corriente eléctrica los campos producidos son iguales y de sentidos contrarios. Si se aplica una corriente alterna sinusoidal de intensidad  $I$  a los devanados de dichos núcleos, el campo magnético  $\mathbf{B}$  en su interior seguirá un ciclo de histéresis producido por el campo inductor  $\mathbf{H}$ . Suponiendo una simetría perfecta del dispositivo, los campos producidos en ambos núcleos  $\mathbf{B}_1$  y  $\mathbf{B}_2$  son iguales y de signo contrario por lo que se anulan entre sí, si se colocara una bobina envolviendo a ambos núcleos no se induciría en ella ninguna corriente. Sin embargo, si existiese un campo magnético externo  $\mathbf{H}_o$ , menor que  $\mathbf{H}$  y paralelo a los ejes de los núcleos, tal que al superponerse al campo producido por la corriente  $I$  el valor máximo del campo inductor cumplan que  $\mathbf{H}_o \pm \mathbf{H}_m > \mathbf{H}_s$  ( $\mathbf{H}_s$  es el valor del campo inductor necesario para alcanzar la saturación y  $\mathbf{H}_m$  el valor máximo del campo producido por la corriente  $I$ ), el estado de saturación de los núcleos se alcanzará en un semiciclo pero no en el otro. Por lo tanto, al aproximarse al punto de saturación el flujo de  $\mathbf{B}_1$  variará de forma más lenta que el campo, lo mismo ocurriría con el flujo de  $\mathbf{B}_2$ , pero existiendo un desfase con respecto al primero, surge como consecuencia de ello un máximo con frecuencia doble de la del campo inductor (Primdahl, 1979; Kearey et al., 2011).

Debido a que el campo magnético total puede ser expresado en términos de sus componentes individuales, y que el magnetómetro *fluxgate* permite medir la intensidad de cada componente del campo, entonces es posible obtener la magnitud del campo total a partir de las magnitudes individuales medidas en forma simultánea a partir de:

$$|\mathbf{B}| = (\mathbf{B}_x^2 + \mathbf{B}_y^2 + \mathbf{B}_z^2)^{1/2} \quad (5)$$

Su uso es principalmente en mediciones de manera estática, es decir fija, debido a que el utilizar este tipo de magnetómetros de manera móvil presenta una serie de detalles que deben ser tomados en cuenta para poder tener una interpretación de datos adecuada. Pero gracias a los avances en electrónica se han reducido sustancialmente de tamaño, haciéndolos muy compactos y ligeros, además de contar con inclinómetros los cuales registran la desviación de los sensores del equipo si es que este se desplaza de la vertical. Además de poder medir las tres componentes del campo magnético, este tipo de



magnetómetro tiene la posibilidad de obtener medidas en intervalos de tiempo muy cortos (Barreto, 1996).

### Aplicaciones de exploración magnética en geofísica

Las aplicaciones de la prospección magnética son muy variadas y abarcan dos aspectos: la localización específica de objetos ferromagnéticos y paramagnéticos, y el mapeo con fines geológico-mineros, de recursos naturales y de otros tipos. La tabla 3 muestra los tipos de estudios exploratorios que se pueden llevar a cabo con magnetometría, y particularmente con el sistema aeromagnético SAMpD desarrollado como parte de este proyecto de tesis.

Tabla 3.- Aplicaciones de levantamientos magnéticos (modificada de Reynolds, 1997)	
LOCALIZACIONES	MAPEOS
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Tuberías</li> <li>● Líneas de cables subterráneas o marinas someras</li> <li>● Barcos hundidos someros</li> <li>● Pertrechos y minas de guerra</li> <li>● Barriles metálicos y sitios con desechos tóxicos</li> <li>● Túneles y cavidades en minas</li> <li>● Betas minerales magnéticos o con magnetismo asociado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Zonas arqueológicas</li> <li>● Diques y zonas mineralizadas</li> <li>● Volcanes y calderas</li> <li>● Límites geológicos entre litologías con contraste magnético, incluidas fallas y pliegues</li> <li>● Basamentos ígneos cubiertos en cuencas sedimentarias</li> </ul>

## 4. SISTEMA DE ADQUISICIÓN AEROMAGNÉTICO CON DRONES

### 4.1 ANTECEDENTES

En la literatura existen pocos trabajos de investigación de magnetometría con drones, hasta recientemente alrededor del 2014 en adelante cuando fue el inicio de la venta de drones para consumidor (Caron et al. 2014; Wood et al. 2016; Parshin et al., 2016; Gavazzi et al., 2016; Parshin et al., 2018). Muchos de los estudios realizados anteriormente con aparatos autónomos fueron aviones y avionetas de gasolina de radio (Funaki et al., 2007; Gee et al., 2008; Funaki et al., 2014) pero no poseían las características de vuelo de un dron.

En el mercado internaciones, estos sistemas de adquisición aeromagnética con drones, son inaccesibles debido a los altos costos a los que se comercializan. Parte de la razón es debido a que estos sistemas comerciales orientados utilizan magnetómetros de protones o de cesio lo cual incrementa los costos. Ello es debido a que son más caros y pesados, lo que incide en la utilización de drones más potentes y de mayor costo. Con el propósito de desarrollar un sistema más accesible para extender su uso, se llevó a cabo una búsqueda de los magnetómetros más adecuados para montar en drones comerciales genéricos. Durante el proceso de este trabajo de tesis, el desarrollo de drones comerciales fue en aumento de manera muy importante y apenas recientemente surgió la segunda generación de drones y controladores de vuelo, que permite además de un mejor control de los drones en vuelo, una mayor capacidad de carga y el registro de su ubicación de manera más precisa con ayuda de GPS más pequeños.



Gracias a ello, fue posible acoplar a un dron un magnetómetro para llevar a cabo levantamientos geofísicos aeromagnéticos experimentales de manera rápida y económica, con datos de muy buena calidad y listos para ser interpretados. En este proceso fue necesario diseñar partes de reemplazo para los drones (fig. 6) utilizados en los experimentos, los cuales eran piloteados originalmente de forma manual y controlados a través de un monitor. Parte clave del desarrollo del sistema aeromagnético fue la implementación de un sujetador o *gimbal* que también funciona como estabilizador. El sujetador desarrollado redujo significativamente los movimientos bruscos y vibraciones del sensor magnético, además de que lo mantiene alejado de la principal fuente de ruido más cercana que es la propia aeronave. Se experimentó con diferentes tipos de modelos de

estabilizadores, y se concluyó que la mejor opción para el trabajo de campo es un mecanismo desplegable y móvil, es decir, que se le puede desprender y enganchar a la aeronave en vuelo y en posición estática (*standby*); de esta forma no importan las condiciones del terreno si son malas o accidentadas durante el despegue o el aterrizaje, ya que se puede enganchar con el dron a una altura de aproximadamente tres metros.

### **Tipos de drones**

Actualmente los drones son clasificados por diferentes organismos, asociaciones y gobiernos con base en sus atributos, que incluyen el tipo de aparato, altura de vuelo, peso, velocidad, entre otras características. La mayor parte de estas clasificaciones se basa en la capacidad de carga y en el aumento de la autonomía de vuelo del dron, a pesar de que varían las clasificaciones entre ellas, hay límites de peso que son utilizados de manera común. Según la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), estos límites: 2 kg, 25 kg y >25 kg (DGAC).

La DGAC de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), en la [circular CO AV 23/10 R2 \(2017\)](#) distingue tres tipos de drones: hasta 2 kg de peso, de 2 a 25 kg, y de más de 25 kg. En Estados Unidos (EUA), también existe una clasificación de drones en tres niveles según la *Federal Aviation Administration* (FAA), donde los de mayor peso son hasta 600 kg; en dicha clasificación (Circular 107-2, *Department of Defense*, "*Unmanned Aircraft System Airspace Integration Plan*"), además del peso incluyen otros atributos como el tipo de aeronave, si es de ala fija o de multirrotores.

El dron de ala fija es un modelo popular en vuelos de larga cobertura debido a que es un vehículo capaz de planear. Además, cuenta con un solo motor, por lo que el consumo de energía es mucho menor, siendo al mismo tiempo más propenso a ser desviado por ráfagas de viento y menos dinámico en su capacidad de desplazamiento, carga y giro. Dependiendo del peso de la nave y su carga, pueden variar los tamaños desde unos cuantos centímetros hasta varios metros de envergadura.

El dron multirrotores se construye a partir de tres motores y que pueden llegar a ser hasta de ocho o más en los modelos comerciales. Sus tamaños van desde muy pequeños, como la palma de la mano, hasta superiores a un metro medidos de motor a motor. Debido a la potencia aportada por los rotores y a sus características de vuelo, éstos brindan capacidades mucho mayores que el dron de ala fija al poder sostenerse en un mismo punto y despegar y aterrizar verticalmente. Esto es una gran ventaja en lugares con topografía abrupta, así como por su estabilidad de vuelo, ya que resisten a ráfagas de

viento y tienen mejor capacidad de manipular y cargar herramientas u objetos externamente.

Para este proyecto se utilizaron progresivamente cuatro tipos de drones, que se enumeran temporalmente: 1) *3DR Solo* (cuadricóptero), 2) *FAE-960* (hexacóptero), 3) *DJI S1000* (octacóptero), y 4) *DJI Matrice 600* (hexacóptero). Dos de estos drones (el 1 y el 3), solamente son capaces de realizar vuelos manuales con monitor debido a la falta de controladores compatibles con la electrónica de estos. Ello resulta en una desventaja, ya que se incrementa sustancialmente el riesgo de caídas por posibles fallas humanas. Entre los dos restantes, el *FAE-960* tiene la desventaja de que al portar el magnetómetro se encontraba al límite de su capacidad de carga por lo que se tuvieron varios contratiempos durante el periodo de pruebas y se decidió sustituirlo. Por lo anterior, el dron que fue adoptado para las mediciones es el *DJI Matrice 600*, el cual no solo permite vuelos programados, sino que su capacidad de carga y rendimiento son notablemente mejores que los drones anteriormente mencionados. Se trata de un equipo comercial de alta gama, con una plataforma de seis motores, con cuerpo de fibra de carbono y tres antenas GPS que garantizan poder obtener la posición de la aeronave con un error en la vertical de  $\pm 0.5$  m y en la horizontal de  $\pm 1.5$  m. Así como mejores sistemas de transmisión de imagen y telemetría y con una capacidad de aproximadamente 25 minutos de vuelo y una carga de 11 kg de peso. Este dron pesa aproximadamente 5 kg.

## **4.2 Ensamble Magnetómetro-Dron**

### **Características técnicas del magnetómetro *fluxgate* LEMI-026**

El magnetómetro LEMI-026 está diseñado para medir en movimiento las tres componentes del campo magnético terrestre, pero de igual manera, éste puede ser utilizado como magnetómetro de referencia en una estación base. Los sensores del LEMI-026 están situados dentro de un contenedor de PVC, el cual tiene elementos para fijarlo al dron que lo transporta. La interfase del equipo es muy sencilla (fig. 7), teniendo en su panel frontal el interruptor de encendido, el conector para cable USB, el botón de control (inicio, transferencia, stop), el *slot* para tarjeta de memoria, y los indicadores de carga de batería (led azul) y de sincronización satelital (led rojo).



**Figura 7.-** Magnetómetro LEMI-026 dentro del contenedor de PVC (arriba izquierda) y sin cubierta (arriba derecha) en donde se muestra la ubicación de los tres sensores magnéticos (FGS). En la parte inferior de la figura se muestra el panel frontal del instrumento.

Las características técnicas de este magnetómetro se presentan en la tabla 4, como se puede apreciar y se ha señalado anteriormente posee una frecuencia de adquisición de datos de 250Hz que tiene que ser tomado en cuenta a la hora de diseñar los levantamientos, para no utilizar una velocidad reducida y con ello la redundancia excesiva de datos. También, posee la ventaja con respecto a otros equipos similares en el peso (1.5 kg), capacidad de almacenamiento de datos (8 Mb), y a los largos periodos de adquisición (> 5 h) que permite la batería interna del mismo.

**Tabla 4.-** Características técnicas del magnetómetro LEMI-026.

Rango de medición	$\leq 65,000$ nT
Frecuencia del rango	DC... 100 Hz
Tasa de adquisición de datos	250 Hz
Nivel de ruido a 10hz (con respecto a la magnitud del campo)	$< 0.1$ nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$
ADC (6 canales)	32 bits
Medición del tilt	$\pm 30^\circ$
Resolución inclinómetro	$0.01^\circ$
Rango de operación del equipo, temperatura	-20... + 60° C
Voltaje de la fuente de poder	5 - 0.25 V
Consumo máximo de energía	$< 1.2$ W
Tiempo de medición con una descarga del 80% de la batería interna de 1900 mAh	5 h
GPS Receiver	
Error en las estampas de tiempo	$< 100$ ns
Máxima frecuencia de datos	10 Hz
Interfase digital	USB
Capacidad de la memoria SD	8 GB
Peso	$< 1.25$ KG
dimensiones: unidad (incluyendo sensor y batería)	96 x 96 x h270 mm

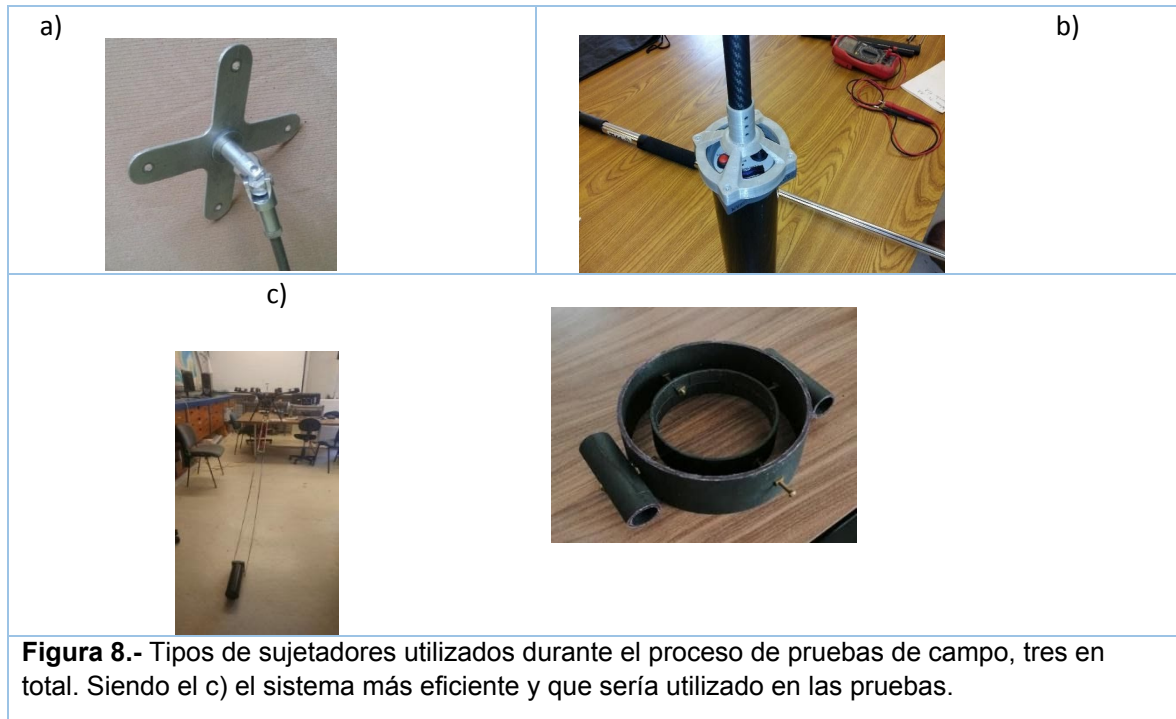
En cambio, el GPS que contiene en su interior algunas veces tiene dificultades para sincronizarse con suficientes satélites al iniciar su operación. Adicionalmente, la frecuencia de adquisición del GPS durante el vuelo es de 10 Hz, es decir solamente 4% de datos de ubicación comparados con los datos magnéticos adquiridos. Sin embargo, ninguna de estas limitaciones impide el correcto funcionamiento del sistema de adquisición aeromagnética, aunque entre los planes está la modificación del instrumento con rangos de frecuencia de adquisición seleccionables, así como la incorporación de un GPS de mayor sensibilidad y precisión.

### **Diseño de sistema de suspensión**

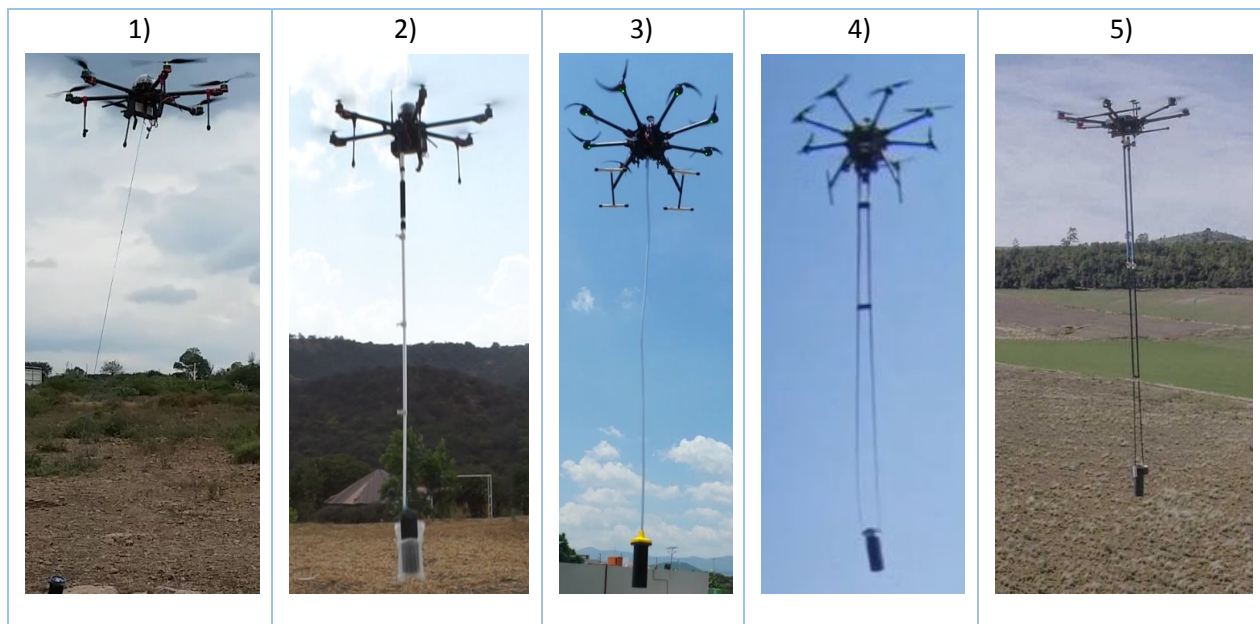
El sistema de suspensión es parte fundamental para contar con una adquisición de datos óptima, es decir, con el menor ruido por efecto del balanceo del magnetómetro durante el vuelo. Este proceso, al igual que la búsqueda del dron más adecuado, fue uno de los factores que requirió tiempo y dedicación, y a la fecha se le continúan haciendo mejoras. La función del sistema de suspensión es mantener al magnetómetro nivelado durante el proceso de adquisición de datos, es decir, estabiliza al instrumento durante su desplazamiento en el aire. Los movimientos bruscos y giros que generan péndulos

pueden crear errores en las lecturas, ruido o simplemente hacerlas inservibles si el sensor no se mantiene nivelado.

La figura 8 muestra los diferentes tipos de sujetadores diseñados y probados en distintas etapas del proyecto. Siendo las cañas de fibra de carbono ensambladas y sujetas con un *gimbal* al dron, con un dispositivo con tres grados de libertad al magnetómetro la más eficiente y elegida para las pruebas de campo (Fig. 8, c; Fig. 9, 5).



Además de esto, al tener el sensor nivelado es posible medir componentes individuales, generalmente z, para tener la posibilidad de analizar las variaciones o gradientes que se emplean para generar los mapas para la interpretación de las anomalías obtenidas.



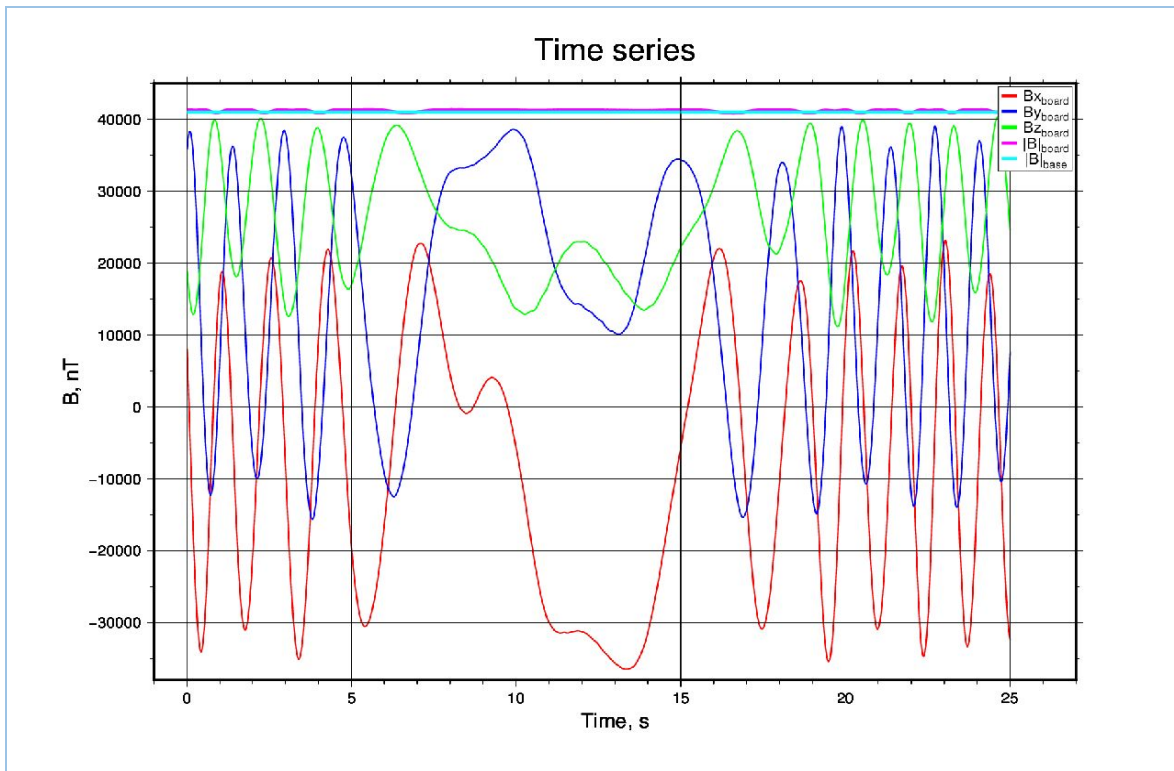
**Figura 9.-** Imágenes del sistema de suspensión del magnetómetro con el dron en movimiento. De izquierda a derecha se muestran los diferentes tipos de sujetadores utilizados: 1) hilo de pesca de 25 kg, 2) sistema de suspensión rígido en la base del dron con tubo telescópico de aluminio, 3) manguera de ½" fija al dron, 4) sistema de suspensión de fibra de vidrio retráctil con *gimbal* de un eje, y 5) sistema de suspensión de fibra de vidrio retráctil con *gimbal* de tres ejes y dos juegos de libertad en el sujetador del magnetómetro. Este último fue el que funcionó mejor y se utilizó en la fase final de pruebas.

Este sistema de suspensión fue evolucionando junto con el proyecto, ello debido no solo a que se cambió de aeronave, sino principalmente a la necesidad de disminuir al mínimo la oscilación del instrumento durante el vuelo. A partir de las pruebas empíricas en el campo, se llegó a la conclusión de que el sistema de suspensión debía ser semirrígido, ya que se observó que de esta manera se evita el movimiento del magnetómetro sin afectar el movimiento de la aeronave. Es decir, se evita un torque grande, el cual en caso de tener un sistema de suspensión rígido puede generar fuerzas que hagan caer la aeronave o hagan el vuelo inestable y peligroso, como ya ocurrió en uno de los experimentos. Por otro lado, con un sistema de suspensión totalmente libre, es decir, suspendido por cables, el magnetómetro tiende a girar sobre su propio eje lo cual hace que los datos sean muy ruidosos y la estabilidad durante el vuelo de la misión sea muy pobre. El sistema de suspensión semirrígido fue finalmente el más adecuado y adoptado para el sistema aeromagnético desarrollado. Este sistema de suspensión tiene la ventaja de que reduce a cero el torque sobre el dron en movimiento, permitiendo la auto nivelación del instrumento y reduciendo las oscilaciones y el movimiento de péndulo. Los grados de libertad del sujetador (cinco en total), permiten amortiguar los movimientos bruscos que por lo general suceden a la hora del despegue, en el aterrizaje y en los giros para cambiar la dirección de los perfiles.



### 4.3 Pruebas de ruido

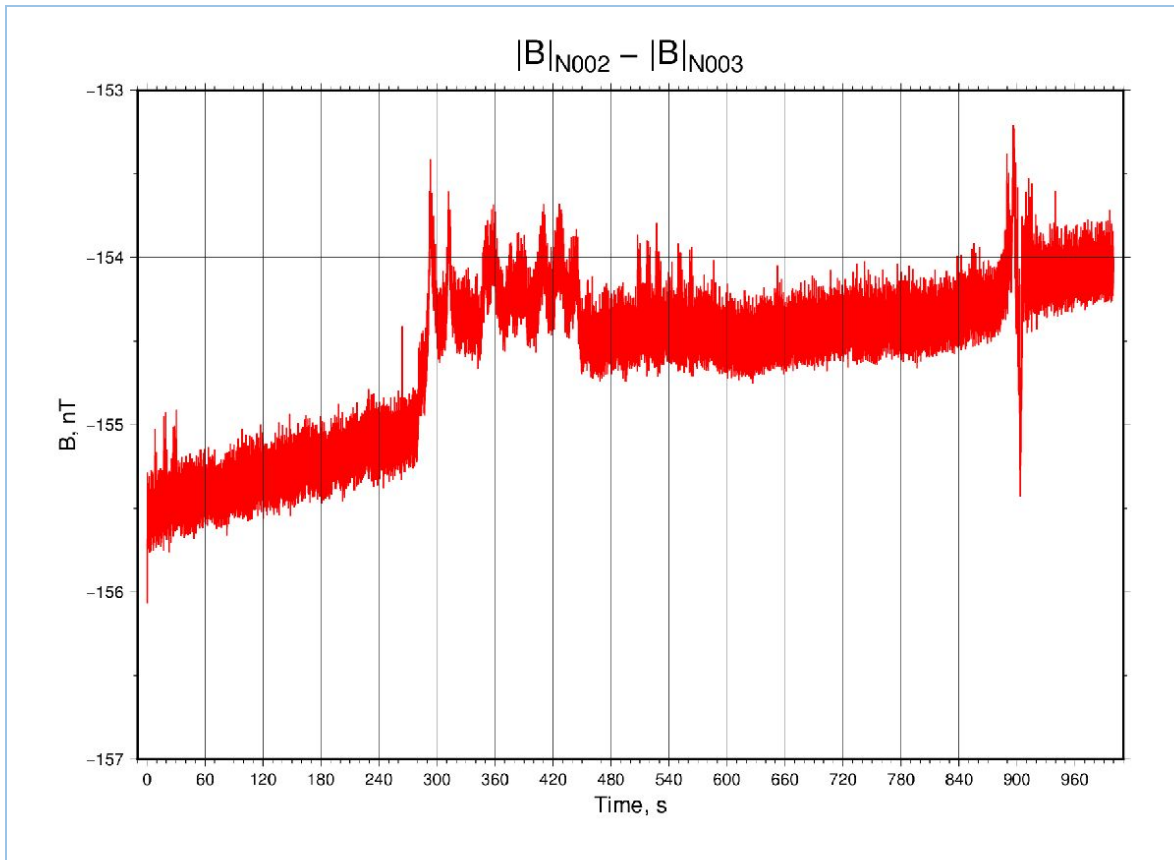
Posterior a la compra de los magnetómetros *fluxgate* LEMI-026, en una primera etapa, se llevaron a cabo pruebas de funcionamiento de los mismo. Un punto importante es realizar y verificar el ruido que produce la cercanía de un dron en funcionamiento con el magnetómetro. Para ello se llevaron a cabo varios vuelos con el dron FAE-960 a lo largo de líneas programadas y se tomaron al azar series de tiempo para observar los cambios de las distintas componentes del campo magnético ( $B_x$ ,  $B_y$ , y  $B_z$ ), las cuales mostraban variaciones debidas a la rotación y oscilación del instrumento suspendido de una cuerda.



**Figura 10.-** Series de tiempo de las tres componentes del campo magnético (líneas azul verde y rojo) y del campo magnético total obtenidas en una prueba del magnetómetro LEMI móvil comparado con el registrado en la base. Como puede observarse, a pesar de la gran variabilidad de las componentes individuales el campo total y el valor del campo magnético total coincide con el observado en el magnetómetro base.

Otra prueba de ruido que se realizó al magnetómetro fue su colocación a distintas distancias del dron (Fig. 11), en donde se puede observar la diferencia entre el campo medido por el magnetómetro en vuelo y el magnetómetro base para distancias de dos y cinco metros, siendo el ruido mayor a la distancia más corta. Por resultar poco práctico la utilización de cinco metros de separación entre el sensor magnético y la aeronave, principalmente debido a que a mayor distancia menor es el control que se tiene sobre el

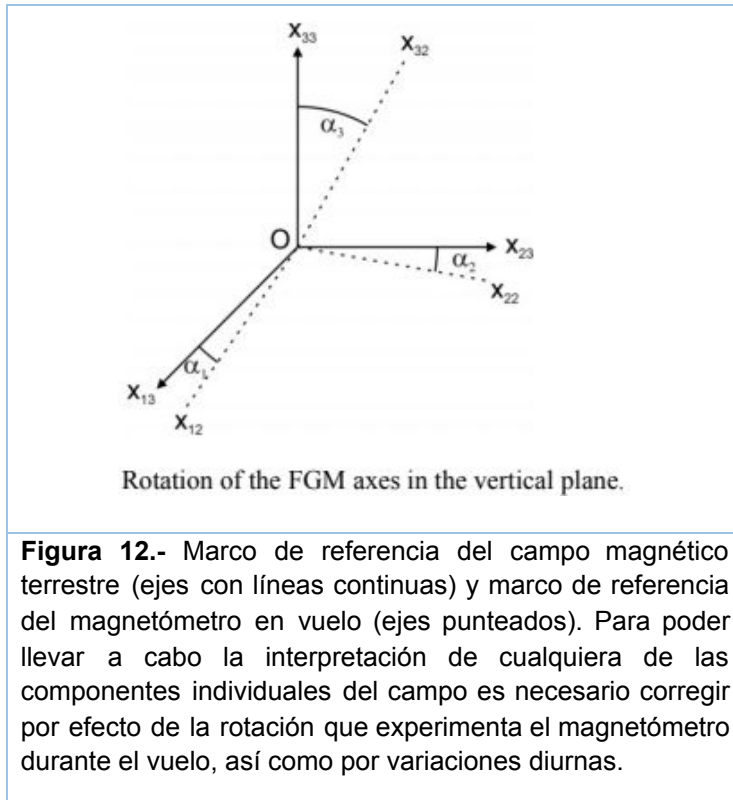
movimiento del instrumento, se utilizó una separación final de 3.5 metros que resulta más práctico y con menor ruido de interferencia



**Figura 11.-** Diferencias del campo magnético total entre el magnetómetro en vuelo vertical (N002) y el magnetómetro base (N003) en un vuelo experimental para evaluar el efecto de la cercanía del dron con el magnetómetro suspendido. La distancia más corta (2 m) corresponde al intervalo 280 a 450 segundos y la separación más grande (5 m) corresponde al intervalo 450 a 600 segundos de vuelo.

### Corrección por rotaciones

Cuando el magnetómetro se encuentra en movimiento, sus ejes pueden girar por efecto del movimiento. Por ese motivo, el magnetómetro LEMI-026 registra los ángulos de inclinación (*tilt*), definido por la vertical con el plano horizontal, con inclinómetros en cada una de las 250 muestras que se adquieren por segundo en tiempo real, con una precisión de 0.0025 grados. Con esta información es posible corregir la magnitud de las componentes del campo magnético una vez que son descargados y decodificados. La figura 12 muestra el sistema de referencia del campo magnético terrestre en líneas continuas y el girado en líneas punteadas



Prystai et al. (2016), desarrollaron las ecuaciones para la corrección de las componentes del campo magnético medidas, utilizando los ángulos de inclinación registrados durante los levantamientos aeromagnéticos. Ellos demuestran que a partir de los ángulos de inclinación registrados es posible obtener las componentes del campo magnético anómalo con las siguientes expresiones:

$$B_h = B_{2h} - B_{1h}, \quad (6)$$

$$B_v = B_{2v} - B_{31}, \quad (7)$$

donde  $B_2$  es el campo del campo magnético medido, y donde  $B_h$  y  $B_v$  son las componentes horizontal y vertical del campo.

A partir de estas ecuaciones, estos autores confirman que tanto las componentes horizontales como la vertical del campo magnético anómalo pueden ser obtenidas para el magnetómetro en movimiento, sin que este tenga el mismo ángulo en el momento de la adquisición.

#### 4.4 Estrategia de vuelos y adquisición de datos aeromagnéticos

##### Operación del magnetómetro *fluxgate* LEMI-026

Para las mediciones del campo magnético se utilizaron dos magnetómetros LEMI-026, uno de los cuales estaba montado al dron por medio de un dispositivo telescópico

mostrado en la figura 9, mientras que el otro permaneció en el lugar de despegue como estación base, monitoreando la variación diurna del campo magnético durante el tiempo de adquisición. En general, durante los vuelos de adquisición que duraron menos de 12 minutos, las variaciones diurnas son prácticamente nulas.

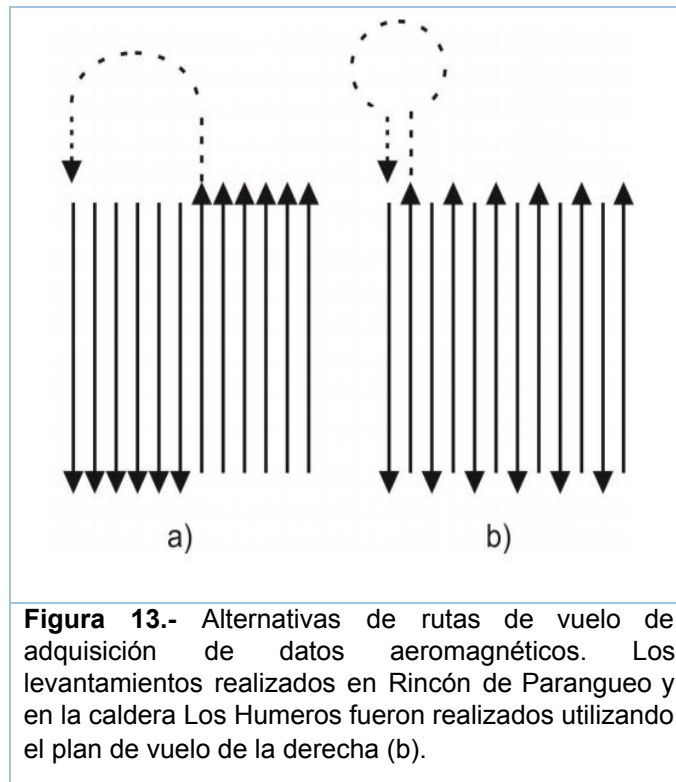
El primer paso de un levantamiento aeromagnético es encender ambos magnetómetros en el suelo, a cielo abierto y libres de objetos metálicos que los perturben. Posteriormente, se sincronizan los GPS de ambos instrumentos vía satelital y una vez que los indicadores luminosos (leds rojos) se apagan significa que los instrumentos están sincronizados, dicha sincronización puede tardar varios minutos. Es posible verificar la carga de las baterías de los magnetómetros previamente utilizando el cable USB conectado a una computadora.

Una vez que los magnetómetros estén sincronizados, el magnetómetro base se coloca en un tripié no magnético en modo de adquisición mientras que el otro se coloca en uno de los extremos del sistema de suspensión telescópico de fibra de vidrio (fig. 9). Simultáneamente, el dron se eleva en el sitio a una altura aproximada de tres metros para ser enganchado con el sistema de suspensión. Una vez sujeto al dron inicia la ruta preprogramada de vuelo que durará de 10 a 15 minutos dependiendo de las condiciones de vuelo, la elevación del sitio, el número de perfiles, la velocidad y la altura de vuelo.

### **Diseño de ruta**

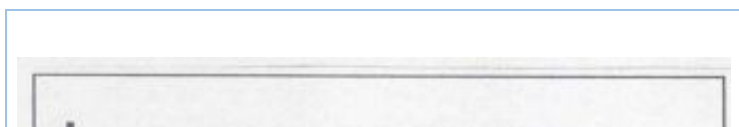
El diseño de la ruta para la adquisición de datos aeromagnéticos puede realizarse utilizando el software de ubicación espacial como *Google Maps Mission planner*, *Pix4D*, y otros. La ruta de la adquisición se debe separar en perfiles paralelos que pueden o no estar entrecruzados para formar un mallado, con la ventaja de que se generan puntos de amarre en las intersecciones de los perfiles que sirven de control. El software *Pix4D*, diseñado para fotogrametría, fue el utilizado por la compatibilidad con el controlador de vuelo del dron (*DJI Matrice 600*) y adaptado para su utilización como localizador espacial de las mediciones magnéticas.

La ruta planeada tiene que tomar en consideración que en los bordes o límites del perfil o del mallado debe de quedar un espacio suficiente para que la aeronave gire (fig. 13), y al entrar al siguiente perfil el sensor se encuentre estabilizado verticalmente y sin campeo. La velocidad de los vuelos para la adquisición de los datos fue de 5 m/s, la cual fue seleccionada después de hacer numerosas pruebas de campo. A esta velocidad, se registran aproximadamente 50 mediciones de campo (X, Y, Z) por metro, pues la frecuencia de adquisición del magnetómetro LEMI-026 es de 250 muestras cada segundo.



La altura de vuelo sobre la superficie del terreno durante el levantamiento depende del lugar en donde se lleve a cabo y depende básicamente de las condiciones del terreno, si es plano o si su topografía es irregular y abrupta. Sin embargo, es importante notar que la amplitud de la anomalía y la resolución de los datos disminuye con la altura (fig. 14). En general, en terrenos planos la altura utilizada es de unas pocas decenas de metros. Una vez seleccionada la altura es necesario que se mantenga constante para evitar efectos indeseados de variaciones debido a la altura en los datos.

En la figura 14 se aprecia como la resolución de las anomalías disminuye a medida que los datos son adquiridos a mayor altura sobre el terreno. Sin embargo, a diferencia de otros vehículos aéreos, los drones multirrotores tienen la capacidad de adquirir datos a alturas a partir de los 2 metros sobre nivel del suelo. Vuelos a alturas mayores de 200 metros son posibles, pero a costa de bajar la resolución del levantamiento. En estos casos se supone que se trata de grandes extensiones de terreno lo cual requerirá de incrementar la velocidad del dron para cubrir el área, siempre bajo riesgo de pérdida de señal o agotamiento de batería, por lo cual es necesario estimar bien los riesgos para evitarlos en lo posible.



**Figura 14.-** Atenuación de la amplitud de la anomalía magnética y reducción de la resolución (Reeves, 2005).

Un aspecto muy importante a la hora de planear los levantamientos aéreos, ya sean perfiles paralelos o un mallado, es el conocimiento de la geología del sitio y en particular es necesario tener información de la geología estructural de la zona de estudio. Esta información nos permitirá diseñar el levantamiento con las líneas de adquisición perpendiculares al rumbo promedio de las estructuras geológicas, pues de esta manera se obtienen las máximas amplitudes, lo que permite obtener una mejor resolución de las estructuras de interés (Brodie, 2002).

## 4.5 Formato de datos y software de procesamiento

### Descripción del software

Ejecutando el programa del fabricante (lemi026.exe) con el magnetómetro conectado a través de un cable USB a la computadora, se pueden visualizar los datos en tiempo real del magnetómetro, entre los que se incluyen: los tres canales magnéticos (X, Y, Z), los dos ángulos *tilt* y la temperatura entre otros datos. La frecuencia de visualización en tiempo real es de un Hz y el tamaño de las ventanas es de 10 minutos. Con este software, decodificar archivos de texto, así como comprobar la integridad de los datos. La tabla 5 muestra los diferentes archivos generados durante el proceso de transferencia de datos a la memoria de una computadora.

**Tabla 5.-** Tipos de archivos utilizados y generados por lemi026.exe para la visualización de los datos adquiridos en vuelo.

<b>lemi026.exe</b>	Programa de control
<b>*.def</b>	Archivos de configuración
<b>lemi026.log</b>	Archivo de protocolo
<b>*. b026</b>	Archivos de datos binarios adquiridos
<b>*.b026.txt</b>	Archivos de datos decodificados a texto
<b>lemi. s026</b>	Archivo de texto del estatus de los datos
<b>*.GPS</b>	Archivos de texto del GPS (10Hz)

Los archivos de salida del magnetómetro LEMI-026 son archivos binarios que se procesan utilizando el software anteriormente mencionado con el fin de convertirlos a archivos de texto. Una vez decodificados (tabla 6), tienen el siguiente formato: fecha y la hora (columnas uno a seis), el número de la muestra (columna siete), las componentes del campo X, Y y Z (columnas ocho, nueve y 10), el *tilt* o desviación de la vertical en X y Y (columnas 11 y 12), la temperatura al interior del instrumento (columna 13), la desviación del microcontrolador (pps; columna 14) y el estado del instrumento o *phase lock loop*( pll; columna 15) en donde 1=listo y 0=no listo.

Tabla 6.- Archivo de texto decodificado usando el programa lemi026.exe, con los datos ordenados por columnas. Las columnas ocho, nueve y 10 contienen las tres componentes del campo magnético medido.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2016	06	22	08	30	06	0	-80.203	-80.004	-79.659	-0.262	0.164	21.835	0	1
2016	06	22	08	30	06	1	-80.241	-80.008	-79.647	-0.262	0.178	21.835	0	1
2016	06	22	08	30	06	2	-80.220	-79.997	-79.685	-0.256	0.185	21.835	0	1
2016	06	22	08	30	06	3	-80.239	-80.004	-79.719	-0.253	0.191	21.835	0	1

Como se mencionó anteriormente y en vista de que los datos de posicionamiento se registran por separado (GPS, 10 Hz) y a una frecuencia que difiere del registro de mediciones del campo magnético (250 Hz), es necesario llevar a cabo una edición por separado de ambos conjuntos de datos, lo que hasta el momento se realiza manualmente. Para los cual, existen dos posibilidades de hacer este procedimiento, para generar un solo archivo con los valores del campo magnético y su ubicación: 1) interpolar los datos de posición (10 datos por segundo) entre dos mediciones magnéticas (250 datos por segundo), o 2) reducir las mediciones magnéticas para que queden 10 datos por segundo, ya que 250 mediciones resultan redundantes en 5 m a la velocidad utilizada de 5 m/s. Para los casos de estudio presentados en el siguiente capítulo, se llevó a cabo el segundo procedimiento, o sea, se generaron archivos con igual número de datos magnéticos y de posición (10 muestras por segundo), lo cual equivale a 2 muestras por metro recorrido a una velocidad de 5 m/s o a 1 muestra cada metro a una velocidad de 10 m/s.

### Datos obtenidos por el GPS

La tabla 7 muestra el formato del archivo de salida del GPS, donde se puede observar que los primeros renglones con el símbolo % corresponden a información sobre el equipo y la versión del software. El resto de las columnas, contienen el tiempo de adquisición en UTC que varía cada décima de segundo, es decir, se registran 10 medidas cada segundo. Las dos columnas siguientes contienen la latitud y longitud del punto, la dirección del

vuelo (W en este caso). La columna 10 se refiere a la altura sobre el nivel medio del mar de vuelo (en este ejemplo 1957.5 m) la cual se proporciona con una precisión de  $\pm 2$  m.

**Tabla 7.-** Formato del archivo de datos que arroja el sistema de posicionamiento integrado al magnetómetro LEMI-026.

```
%LEMI026 #0003
%FIRMWARE Ver.1.0
%MADE in UKRAINE
$PMTK867,9,1,3,14,16,23,26,27,31,32*01
$GPGGA,175734.000,2028.7578,N,10024.8039,W,2,8,0.90,1957.5,M
$GPGGA,175734.100,2028.7578,N,10024.8039,W,2,8,0.90,1957.4,M
$GPGGA,175734.200,2028.7579,N,10024.8039,W,2,8,0.90,1957.4,M
$GPGGA,175734.300,2028.7579,N,10024.8039,W,2,8,0.90,1957.4,M
```

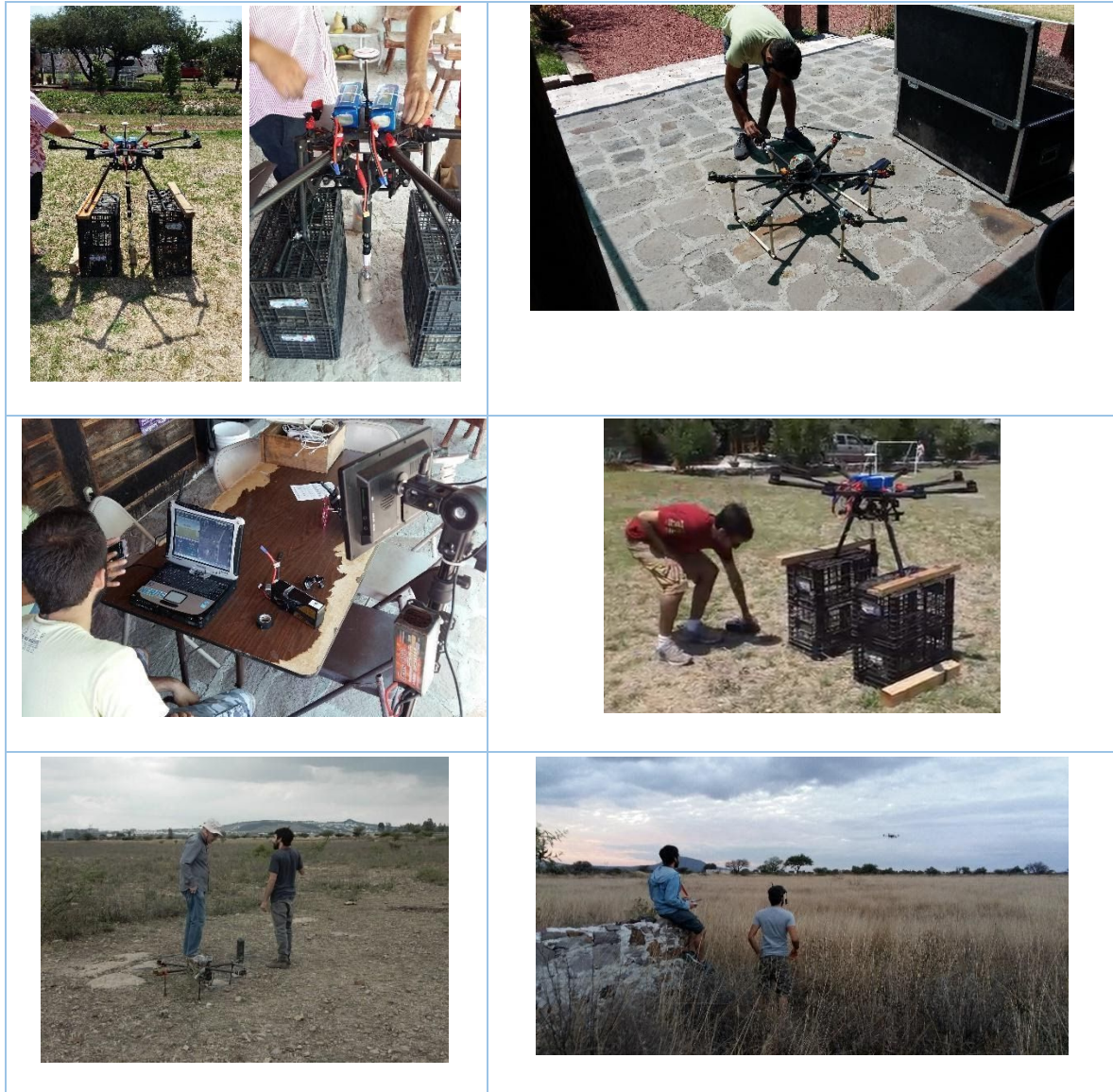
#### 4.6 Vuelos de prueba

Previo a los vuelos definitivos se realizaron múltiples pruebas de campo a partir de las cuales se perfeccionaron los diferentes componentes del sistema y estrategias de vuelo. Entre ellas, se llevaron a cabo pruebas en la localidad de La Poza, en el municipio de Corregidora, Qro., ubicada a 1,968 m.s.n.m. En este sitio, se realizaron mediciones preliminares y pruebas del estabilizador del magnetómetro, así como su uso y operación. Básicamente, fue un sitio para afinar detalles y realizar pruebas preliminares (fig. 15) con respecto a la aplicación del vuelo automatizado del hexacóptero FAE-960. Este dron cuenta con características de fotogrametría, siendo una gran herramienta, ya que empezamos a modificarlo para adaptarlo a nuestras necesidades. Dicha aeronave estaba diseñada para el nivel del mar, por tal motivo se tuvo que rediseñar la misma para que volara a más de 1,500 msnm, ya que la mayoría de las poblaciones y zonas de interés en El Bajío mexicano se encuentra a estas elevaciones. A medida que se aumenta la altura de vuelo, las baterías de los drones de Litio-Potasio (LiPo) rinden menos, y los tiempos de vuelo se reducen de manera importante.

Familiarizarse con el dron, con todas sus componentes y funcionamiento de cada una de sus partes fueron parte de los objetivos a abordar, debido a la necesidad de contar con un dron que cumpliera con las características de seguridad propias del experimento. Estos experimentos sirvieron además para capacitarnos en el diseño e impresión 3D de partes dañadas del dron por caídas, así como para la adaptación de cámaras profesionales de acción y de vuelo en primera persona, eventualmente en el mejoramiento del sistema de sujeción del magnetómetro. De igual manera, para resolver problemas mecánicos y eléctricos en el laboratorio o en campo. En general, para esta etapa del desarrollo del



proyecto la información escrita y las referencias para obtener información de los componentes sobre su compatibilidad y desempeño son prácticamente inexistentes, por lo que la única fuente disponible para este propósito son los *blogs* y videos en internet, mayormente realizados por aficionados y expertos en radio control , así como por usuarios de drones y de la comunidad cibernética que tiene mucha participación y en donde hay mucha retroalimentación.



**Figura 15.-** Diferentes aspectos de pruebas realizadas previas a la sistematización de los vuelos y previas a las pruebas definitivas en zonas de interés geológico.

El controlador de vuelo del dron es un *apm 2.5* el cual es un controlador que cuenta con software de fuente libre y mejorado por la comunidad de radio control llamado *Mission Planner*. A pesar de que el dron cuenta con un vuelo automatizado fue necesario familiarizarse con la operación del dron de manera manual o semiautomática.

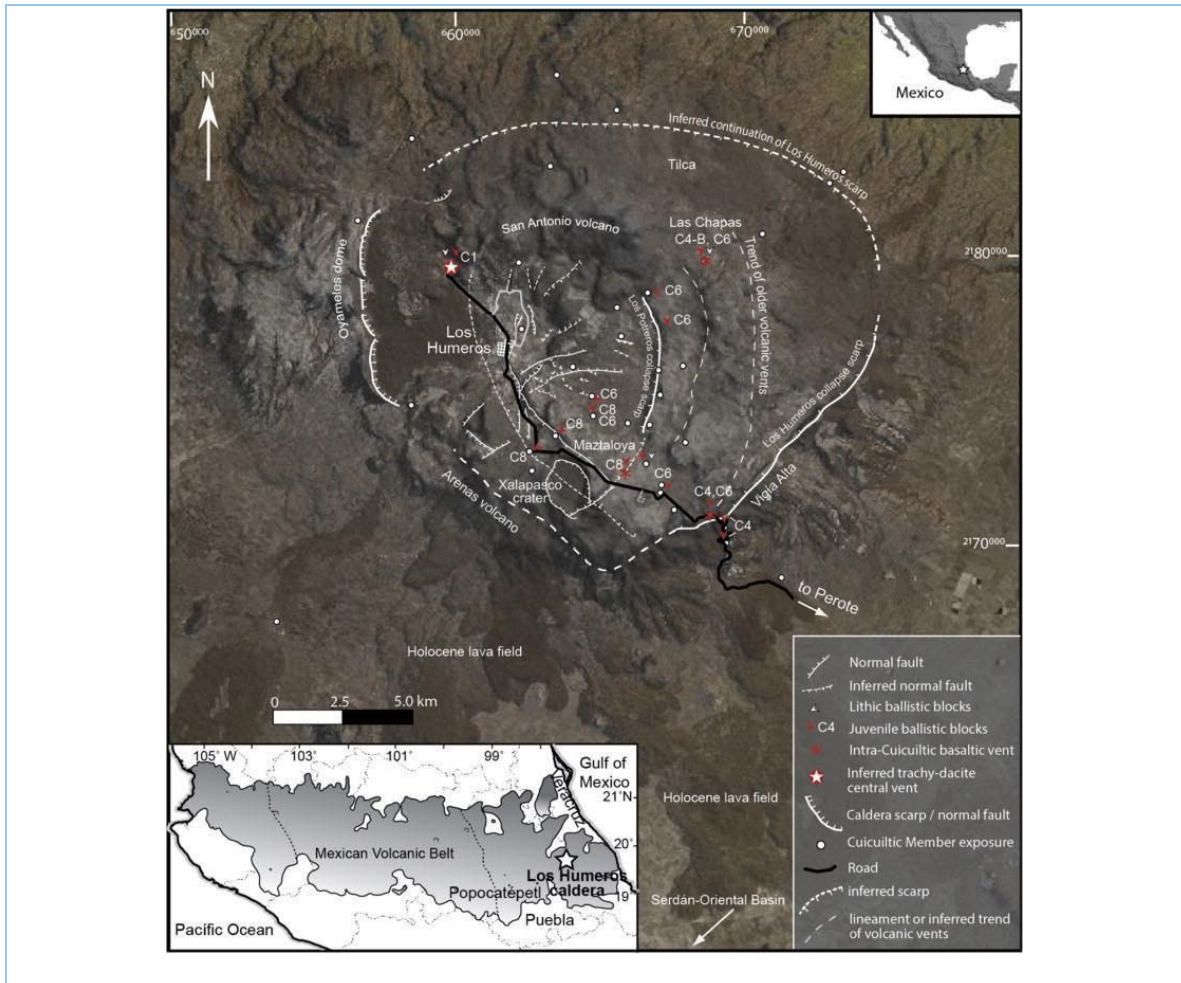
## 5. RESULTADOS

### 5.1 Aeromagnetometría en la Caldera de Los Humeros, Pue.

La caldera de Los Humeros se ubica en el extremo oriental de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM; Fig. 16). Los Humeros, al igual que otros campos geotérmicos existentes en México y en el mundo, se desarrolló dentro de una caldera volcánica joven, cuya estructura interna hace propicio un alto potencial geotérmico. La intensa actividad volcánica en la región de Los Humeros se desarrolló desde el Mioceno y está latente en la actualidad. Esto generó condiciones de gran complejidad y diversidad magmática en la región. Existen varias publicaciones sobre el tema, particularmente enfocadas en la geología, estructura y modelo geotérmico ([Ferriz and Mahood, 1984](#); [Verma et al., 1998](#); [Prol-Ledezma, 1998](#); [Cedillo, 2000](#); [Barragán et al., 2002](#); [Carrasco-Núñez and Branney, 2005](#); [Izquierdo et al., 2011](#); [Norini et al., 2015, 2019](#); [Carrasco-Núñez et al., 2017a](#); [2017b](#); [2018](#)).

En prospección geotérmica, es poco común aplicar magnetometría para estudiar la estructura de calderas, a pesar de que los contraste litológicos y composicionales de los productos volcánicos la hacen particularmente útil para auxiliar en la cartografía de los diferentes productos ígneos dentro del complejo volcánico. Además, de que puede ser una herramienta útil para estudiar los cuerpos de rocas magnetizadas en el subsuelo de la caldera, toda esta información puede ser empleada como un buen complemento para interpretar el reservorio geotérmico.

La geomorfología del área de Los Humeros es propia de un sistema montañoso, ya que presenta pendientes moderadas, con altitudes que varían de 2,800 a 3,000 msnm aproximadamente. La caldera es una estructura semicircular con un diámetro entre 21 y 16 km. En su interior hay dos estructuras semicirculares, una interpretada como evidencia de un colapso central, llamada caldera Los Potreros y la segunda es una estructura semicircular de 2.1 x 1.4 km conocida como el cráter El Xalapazco. Dicho cráter tiene paredes con pendientes casi verticales, donde la diferencia de altura entre el fondo y el borde de cráter es 100 m ([Ferriz and Mahood, 1984](#); [Carrasco-Núñez and Branney, 2005](#); [Carrasco-Núñez et al., 2017a](#))



**Figura 16.-** Ubicación de la caldera de Los Humeros (arriba) y aspecto general del campo geotérmico. Los vuelos fueron realizados en una zona contigua. Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) (Carrasco-Núñez and Branney, 2005).

### Características de vuelo

Debido a la altura de la caldera (~3,000 msnm), fue necesario reducir el peso de la aeronave para subir su rendimiento. A dichas alturas, la densidad del aire es significativamente menor en comparación con el nivel del mar y la capacidad de sustentación del dron se reduce de manera importante. Por esta razón, se requiere de mayor energía en los motores, por lo que las baterías se drenan a mayor velocidad,

reduciendo los tiempos de vuelo. Debido a estas condiciones se hicieron las siguientes modificaciones para reducir el peso del dron:

- Cambio de tren de aterrizaje por uno más ligero
- Suspensión de cámara sin *gimbal*
- Operación del dron con una sola batería de 16,000 mAh, en el lugar de con dos.
- Uso de cámara gopro3+

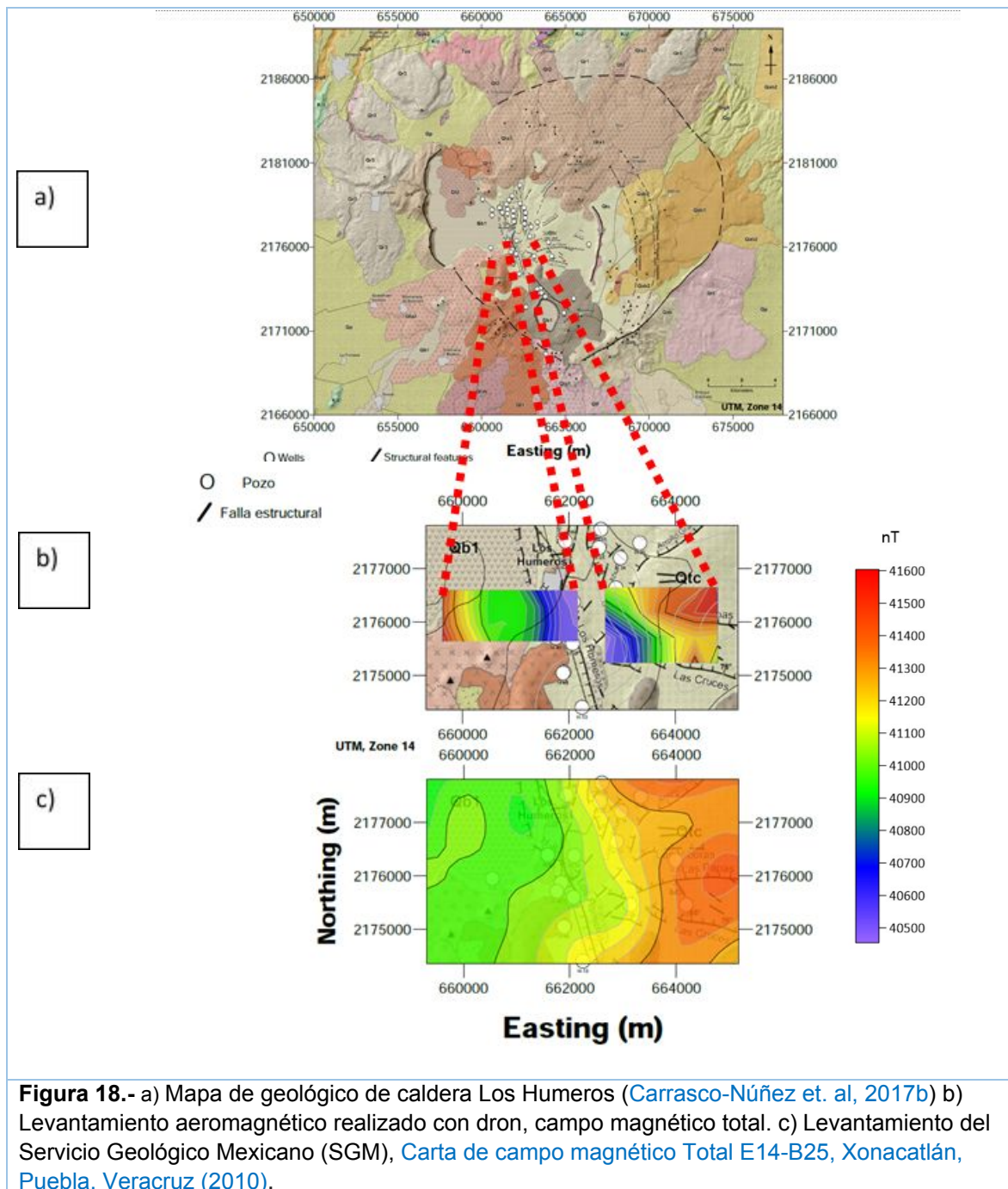
El objetivo de la estrategia de vuelo en los Humeros consistía en realizar perfiles EW y WE a lo largo de zonas aledañas al pueblo de Humeros. Pero debido a que en esta zona se encuentran varios pozos y hay grandes estructuras metálicas, tuberías, motores y maquinaria, que son grandes fuentes de ruido magnético, fue necesario alejarse del pueblo de manera considerable realizando los vuelos en el centro de la caldera de Potreros (Fig. 18). Los perfiles tienen una longitud de ~2 km con separaciones entre sí de ~250 m. La altura de vuelo sobre el nivel del terreno fue de 30 m sobre el sitio de despegue. El trabajo de campo se realizó a lo largo de dos días, por la extensión de la zona se tuvo que limitar el área de cobertura. Por esta razón, se eligieron zonas para despegar que permitieran tener línea visual con el magnetómetro. Debido a la longitud de los perfiles fue necesario hacer enrejados (*grids*) por separado para posteriormente unirlos. En total se realizaron cuatro vuelos, cubriendo una superficie de 7 km<sup>2</sup> en dos áreas contiguas en el centro de la caldera. Las mediciones se realizaron en condiciones difíciles ya que se trata de una zona montañosa en donde se presentaban ráfagas de viento de más de 12 m/s, con días neblinosos y semi nublados. La figura 17 muestra el sistema aeromagnético completo, previo al levantamiento (izq.), así como el magnetómetro suspendido del dron en plena operación. Los mapas de campo magnético total fueron obtenidos a partir de cuatro vuelos de aproximadamente 10 minutos cada uno (Fig. 18b).



**Figura 17.-** Sistema aeromagnético de adquisición (SAMpD) utilizado para el levantamiento en la caldera de Los Humeros (izq.) en donde se observan los diferentes componentes. A la derecha de la figura se muestra el dron en vuelo con el magnetómetro suspendido verticalmente con sistema estabilizador multiaxial.

### **Mapa de Campo Magnético Total**

Los datos adquiridos fueron descargados del instrumento vía cable USB, decodificados y editados para contar con archivos de datos magnéticos y de posicionamiento a 10 Hz. Una vez editados, se calculó la magnitud del campo total a partir de las componentes individuales del campo magnético. Posteriormente, estos valores fueron interpolados utilizando un promedio móvil y desplegados utilizando software comercial. El resultado se muestra en la figura 18b, donde se distingue el mapa de campo magnético total en dos sectores de la parte central de la caldera. También se observan las líneas de vuelo que contienen una densidad de estaciones que fue reducida a una estación por metro, seleccionando una estación cada 25 datos.



**Figura 18.-** a) Mapa de geológico de caldera Los Humeros (Carrasco-Núñez et. al, 2017b) b) Levantamiento aeromagnético realizado con dron, campo magnético total. c) Levantamiento del Servicio Geológico Mexicano (SGM), Carta de campo magnético Total E14-B25, Xonacatlán, Puebla, Veracruz (2010).

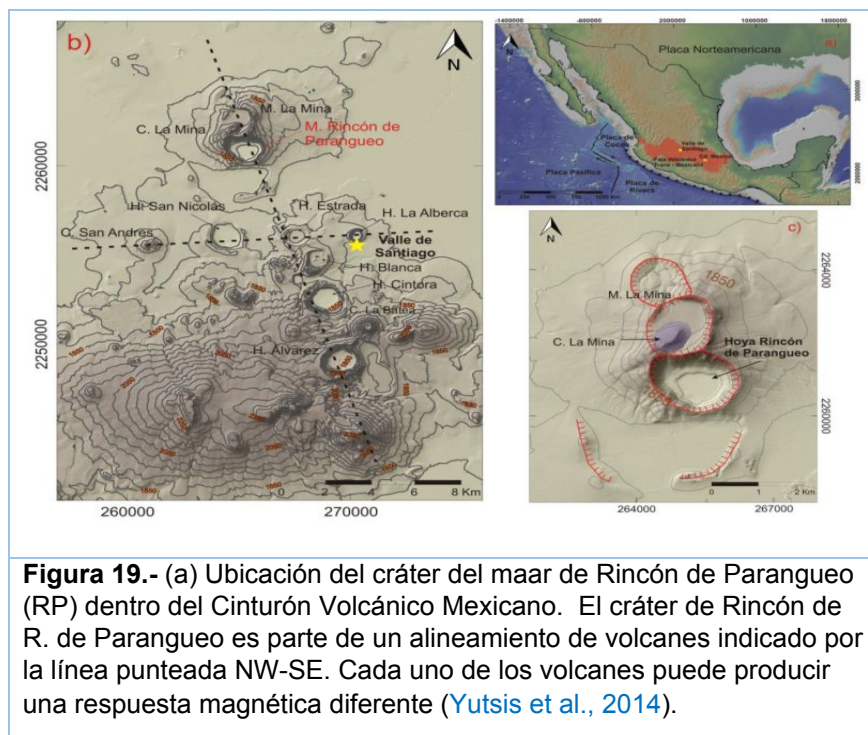
En la figura 18b y 18c se observa, en la parte central de ambos mapas del campo magnético total, un mínimo magnético que se puede interpretar como una línea de polos magnéticos probablemente relacionados con la falla de Los Humeros, la cual cruza el campo geotérmico en dirección NS y está estrechamente relacionada con la zona de producción (Fig 16). También, se aprecia en la figura 18c la magnetometría área del Servicio Geológico Mexicano (SGM), con la Carta de campo magnético Total E14-B25, Xonacatlán, Puebla, Veracruz (2010), la cual es muy general y suave, sin que se aprecien grandes anomalías en un área reducida debido a la altura de vuelo en la que se

obtuvieron los datos. Por tal motivo, es notorio que con la magnetometría con drones se obtiene un rango mayor de datos y mayor detalle, sin embargo, la tendencia de la anomalía es muy parecida, mostrando máximos hacia la dirección este.

## 5.2 Aeromagnetometría en el Maar de Rincón de Parangueo, Gto.

La elección de esta zona de adquisición con el levantamiento aeromagnético, se debió a que existe en este sitio un levantamiento magnético terrestre realizado previamente (Yutis V., 2014, [comunicación personal](#)). En este sentido, la selección de este sitio no se debió a un interés geológico o estructural, sino para establecer una comparación de resultados entre ambas mediciones.

Existen varios estudios geológicos y trabajos de investigación enfocados a entender el proceso de generación de estructuras en los sedimentos del lago Maar Rincón de Parangueo (fig. 19), además de estudios acerca de la estructura interna del cráter, colapsos, subsidencia y su interacción con el agua subterránea (Aranda-Gómez et al., 2002; 2009; 2010a; 2010b; 2013).



La figura 20 muestra la interpretación de la diatrema o conducto volcánico debajo del cráter, la cual fue modelada a partir de datos gravimétricos. Dicha figura muestra que la diatrema se ubica al sureste del centro del cráter. Se cree que dicha diatrema está formada por una mezcla de fragmentos derivados de las rocas encajonantes del conducto





se sincronizan. Las mediciones incluyeron la zona que aún contiene agua a la que es inaccesible llegar de otra manera excepto con drones (fig. 22c).



### Mapa de Campo Magnético Total

Los datos adquiridos fueron descargados del magnetómetro vía cable USB, decodificados y editados para contar con archivos de datos magnéticos y de posicionamiento a 10 Hz. Es decir, a razón de un dato por metro considerando una velocidad del dron de 10 m/s. Una vez corregidos por variación diurna y editados para excluir los efectos de borde, se calculó la magnitud del campo total a partir de las componentes individuales del campo magnético medidas.

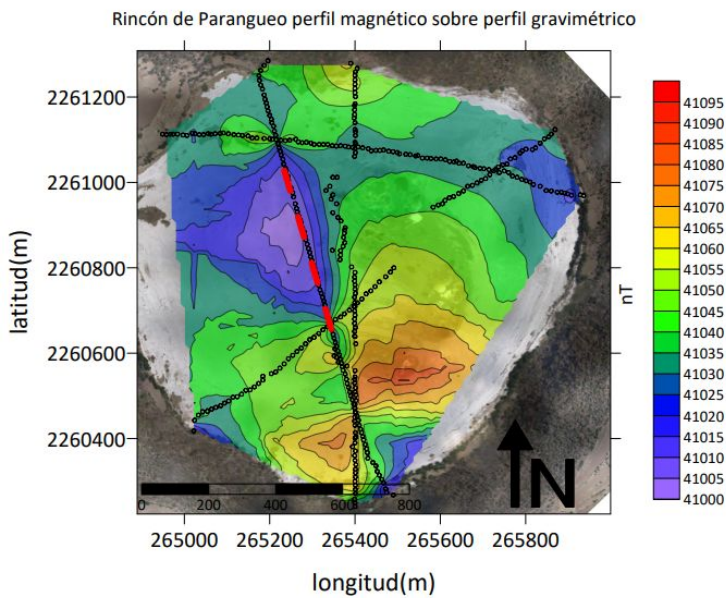
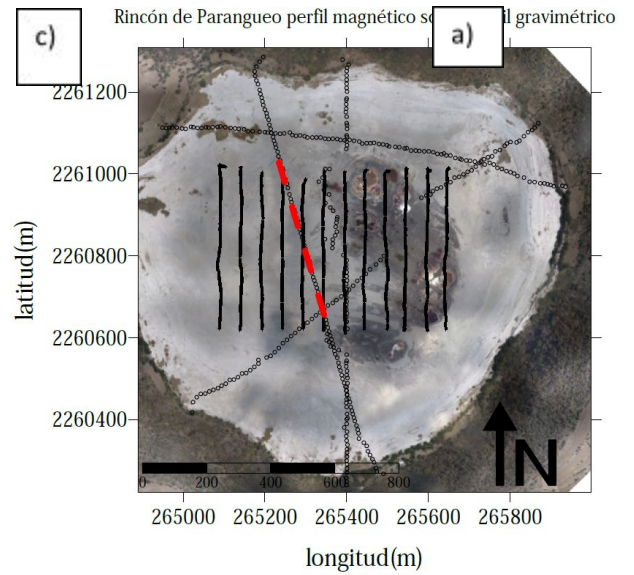
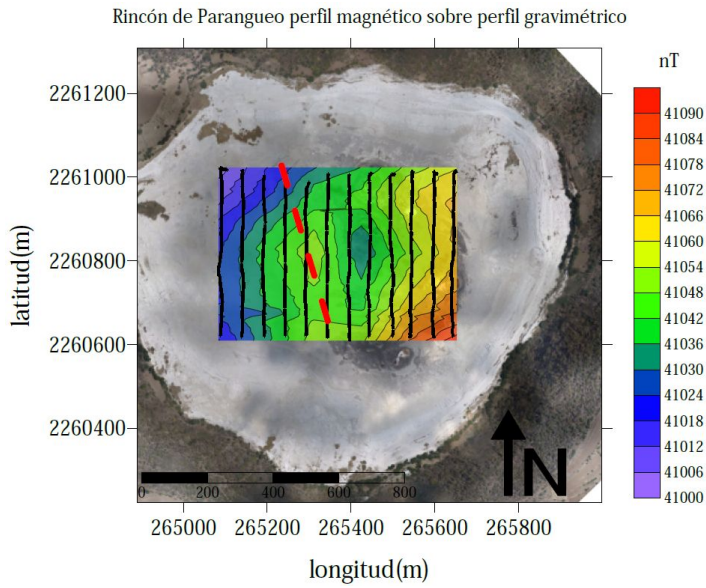
La base de datos obtenida fue interpolada utilizando un promedio móvil y con el resultado se generaron cartas magnéticas por medio de un software comercial. En la figura 22c se observa campo magnético total (CT) de la parte central del cráter. En dicha figura también se distinguen el conjunto de estaciones magnéticas como líneas continuas paralelas,

donde no se distinguen las estaciones individuales debido a la alta frecuencia de adquisición.

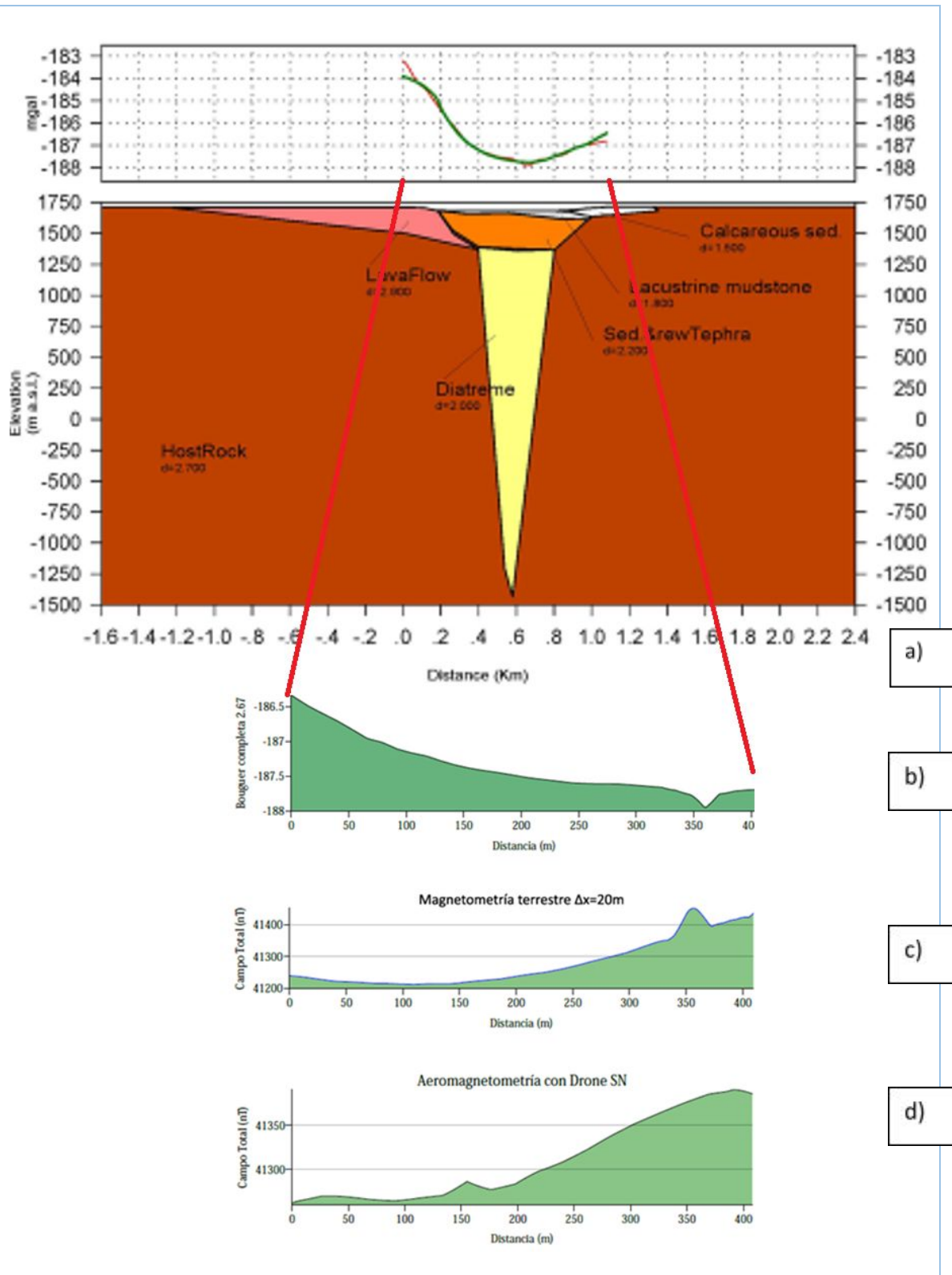
Como se mencionó anteriormente, con propósitos de comparación se presentan los resultados de un levantamiento magnético terrestre realizado en el verano de 2014 con un magnetómetro de protones (Yutsis V., 2014, [comunicación personal](#)), cuyos perfiles recorridos y estaciones también se muestran en la figura 22c. Dicha medición terrestre se visualiza como líneas diagonales que cruzan el cráter extendiéndose hasta donde inician los bordes de este. Como puede verse en dicha figura, los perfiles están interrumpidos en algunas zonas y la cobertura espacial es más escasa, por lo tanto, también hay mayor incertidumbre de las anomalías generadas en el proceso de interpolación entre los perfiles (fig. 22b), incluyendo variaciones debidas a variaciones en la superficie por la presencia de rocas y sedimentos magnetizados. Los resultados de la interpolación de dichos perfiles terrestres pueden dar lugar a la generación de anomalías singulares debido a su separación, en el sentido de que pueden resultar ficticias por la falta de cobertura de los datos y de ser artificio del algoritmo de interpolación.

La figura 23 muestra una comparación a partir de un perfil común (I-2) de los datos gravimétricos (Yutsis et al., 2004) y magnéticos (terrestres y aeromagnetometría por drones). En ella se distingue un comportamiento inverso entre la gravimetría y la magnetometría, es decir, la anomalía de Bouguer desciende a medida que la respuesta magnética genera un crecimiento, lo cual es un indicativo de la falta de masa, pero un aumento de minerales magnéticos en la diatrema debido a la posición de la sección. La comparación de la respuesta terrestre y aérea a lo largo del perfil común (fig. 23c y fig. 23d) muestra la misma tendencia y magnitud del campo magnético cuando la dirección de vuelo es Sur-Norte (figs. 22a).

Por otro lado, la figura 23c, muestra la comparación del perfil aeromagnético NS con la anomalía de Bouguer completa (fig. 23b) en donde se observa que la zona de máximo magnético se correlaciona con un mínimo gravimétrico, es decir, con una zona de baja densidad relativa. Esto significa que la diatrema del cráter, a pesar de ser altamente magnética comparada con su entorno ( $\Delta_{CT} \sim 200-300$  nT), su densidad es inferior a la de las rocas que la rodean.



**Figura 22.-** a) Mapa de campo magnético total obtenido por un vuelo aeromagnético con duración efectiva de ~15 minutos. En la parte central se puede observar una anomalía de carácter dipolar asociada a la *diatrema* de cráter. b) Mapa campo magnético total obtenido con magnetometría terrestre. c) Ortofoto del cráter con perfiles de vuelo aeromagnético (líneas negras paralelas) y perfiles terrestres (líneas de triángulos) se observa como las mediciones terrestres tuvieron que rodear las zonas inundadas.



**Figura 23.-** a) Modelo del cráter Maar Rincón de Parangueo (Aranda-Gómez et al., 2004) b) Perfil Gravimetría sobre perfil I-2 c) Magnetometría terrestre sobre I-2, (Yutsis et al., 2014) d) perfil Aeromagnético con dron sobre I-2.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se realizó la construcción de un sistema de adquisición aeromagnética utilizando drones disponibles en el mercado y una primera generación de magnetómetros para drones LEMI026. Con lo cual se desarrolló un sistema de adquisición robusto y confiable, que incluye procedimientos del manejo de datos, de sistematización y estandarización de parámetros de vuelo. Finalmente, la comparación de datos de campo, demostrando con ello que el sistema completo se puede replicar.

Generar el mecanismo para estabilizar el magnetómetro fue una parte clave del proyecto, ya que para poder obtener datos de calidad y de manera sistemática, el magnetómetro necesita estar lo más estable posible durante el vuelo, así como en las etapas críticas del proceso, es decir durante el aterrizaje, el despegue y los giros entre perfiles. El dispositivo diseñado y que otorgó los mejores resultados es semirrígido, evita el movimiento del magnetómetro sin afectar el movimiento de la aeronave permitiendo la auto nivelación del instrumento y reduciendo las oscilaciones y el movimiento de péndulo. Este mecanismo de suspensión dron-magnetómetro es retráctil y fácilmente desprendible, lo que proporcionan una gran versatilidad de montaje y desmontaje en zonas accidentadas, además de que en caso de colisión o enganche con árboles u otros objetos el magnetómetro puede desprenderse evitando también la falla de la aeronave.

El formato de los datos adquiridos permite la interpretación de las componentes individuales del campo magnético y de su amplitud total. En el primer caso, es necesario compensar dato a dato los errores en la verticalidad del magnetómetro, los cuales también son registrados durante el vuelo en forma de ángulos de inclinación. Para el otro caso, estimar la magnitud del campo total no depende de la orientación del sensor y tiende a cancelar los errores de giro, por lo que no es necesario hacer dichas correcciones.

En este trabajo se presentaron las cartas de campo magnético total obtenidas como resultado de los levantamientos aeromagnéticos en el cráter de Rincón de Parangueo y de un sector pequeño de la caldera de Los Humeros. Donde se observó que este sistema tiene muchas ventajas con respecto a la magnetometría terrestre, no solo por la rapidez de los levantamientos, sino también por la superficie cubierta y la posibilidad de explorar zonas inaccesibles sobre el terreno, como fue el caso de las zonas inundadas en el cráter Rincón de Parangueo. Actualmente, su mayor limitación, es el tiempo de vuelo para la adquisición de datos, por lo que para realizar este tipo de levantamientos es necesario contar con varios juegos de baterías, así como tener algún medio para recargarlas durante la campaña ya que normalmente se descargan después de 15 minutos de vuelo.

Sin embargo, por cada 10 minutos de adquisición se obtienen alrededor de 150,000 datos a una velocidad promedio de 10 m/s que puede cubrir un área de alrededor de 25 hectáreas.

Comparado con otros magnetómetros de su tipo, el LEMI-026 se encuentra en la parte baja del tabulador de precios, mientras que la aeronave y el sistema de suspensión se pueden considerar de costo promedio, pero que tiende a bajar debido a los avances tecnológicos y a la comercialización cada vez mayor de estos equipos. Las modificaciones más importantes para mejorar el desempeño del sistema en su conjunto son las siguientes:

- Modificar la forma del LEMI-026 a un formato aerodinámico, semejante a la de un cohete con aletas para reducir el campaneó
- Incorporar un GPS con mayor densidad de muestreo (250 Hz) para aprovechar toda la información adquirida y ubicarlo en el exterior del LEMI-026 para reducir los tiempos de espera para la sincronización
- Incorporar un selector de frecuencia de adquisición (2.5, 25 y 250 Hz) para levantamientos a mayor o menor velocidad de 10 m/s
- Ubicar la batería del magnetómetro en un sitio más accesible

Entre los mayores retos para la aplicación de esta tecnología están las estrictas limitaciones legales impuestas por cada Estado para el empleo de drones que van en incremento, lo que se empieza a convertir en una traba para su aplicación y beneficios que conlleva. Por esta razón, es recomendable que los operadores potenciales de un sistema de adquisición de este tipo consideren iniciar el trámite de una licencia para volar drones y demás documentos que se requieren para registrarlos y operarlos.

## *AGRADECIMIENTOS*

El desarrollo del sistema de adquisición aeromagnética (SAMpD) con drones fue posible gracias al apoyo financiero del proyecto SENER-CONACYT No. 2007032 al proyecto P5 del Cemie-Geo y particularmente al proyecto PAPIIT # IN116816, de donde se financiaron partes, consumibles para el desarrollo del sistema.

Al Dr. Yutsis quien adquirió y compartió los datos magnéticos.

AV3-Aerovisual participó activamente en las pruebas de campo proporcionando apoyo con infraestructura, particularmente pero no únicamente, con diferentes tipos de drones, software y apoyo logístico. Agradezco sinceramente su apoyo y amistad.

A mi supervisor Dr. Fernando Corbo Camargo, al asistente de posgrado y a mis compañeros...

A mi familia y amigos...

## REFERENCIAS

Aranda-Gómez, J.J., Housh, T.B., Luhr, J.F., Carrasco-Núñez, G., 2002, Geología de la región de Valle de Santiago (Guanajuato): Informe preliminar: GEOS, 22, 392.

Aranda-Gómez, J.J., Chacón-Baca, E., Charles-Polo, M., Solorio-Munguía, J.G., Vega-González, M., Moreno-Arredondo, A., Origel-Gutiérrez, G., 2009, Collapse structures at the bottom of a recently desiccated maar lake: Rincón de Parangueo maar, Valle de Santiago, México, in IAVCEI 3rd International Maar Conference: Malargüe, Argentina, Asociación Geológica Argentina Publicaciones Especiales, 12, 3-4

Aranda-Gómez, J.J., Levresse, G., Pacheco-Martínez, J., Ramos-Leal, J.A., Carrasco-Núñez, G., Chacón-Baca, E., González-Naranjo, G., Chávez-Cabello, G., Vega-González, M., Origel-Gutiérrez, G., Noyola-Medrano, C., 2010a, Active subsidence at the bottom of a recently desiccated crater-lake and its environmental impact: Rincón de Parangueo, Guanajuato, México: Field trip guidebook, in Eighth International Symposium on Land Subsidence: Querétaro, Qro., México, International Association of Hydrogeological Sciences, 1-48.

Aranda-Gómez, J.J., Carrasco-Núñez, G., Levresse, G., Pacheco-Martínez, J., Ramos-Leal, J.A., Vega-González, M., Chacón-Baca, E., Chávez-Cabello, G., 2010b, The maar volcanoes of the Valle de Santiago region (Guanajuato, México): a record of water - molten rock interaction, in Water Rock Interaction: Guanajuato, Gto., México, International Association of GeoChemistry, 1-25.

Aranda-Gómez, J. J., Levresse, G., Pacheco Martínez, Ramos-Leal, J.A., Carrasco-Núñez, G., Chacón-Baca, E., González-Naranjo, G., Chávez-Cabello, G., Vega-González, M., Origel, G., Noyola-Medrano, C., 2013, Active sinking at the bottom of the Rincón de Parangueo maar (Guanajuato, México) and its probable relation with subsidence faults at Salamanca and Celaya: Boletín de la Sociedad Geológica mexicana, v. 65, no. 1, p. 169–188.

Aranda-Gómez, J.J., Cerca, M., Rocha-Treviño, L., Carrera-Hernández, J.J., Levresse, G., Pacheco, J., Yutsis, V., Arzate-Flores, J.A., Chacón, E. and Beraldi-Campesi, H. 2016, Structural evidence of enhanced active subsidence at the bottom of a maar: Rincón de Parangueo, México. Geological Society, London, Special Publications, 446, 225–254.

Barragán R.M., Arellano V. M., Portugal, E., García, A., Tovar, R., 2002. Gas geochemistry in modeling geothermal reservoirs. Geofísica internacional, 41, 3, 243-254.

Barreto LM, 1996, El geomagnetismo. México: Unam Plaza Y Valdés, Mexico, DF. 50 pp.

Breiner, S. 1973 Applications Manual for Portable Magnetometers. Geometrics, Sunnyvale, CA, USA .58 pp.

Brodie, R.C. 2002, Airborne and ground magnetics. In Papp, É., editor, Geophysical and remote sensing methods for regolith exploration, CRC LEME Open File Report 144, 33-45



Campbell, W. H. 2003, Introduction to Geomagnetic Fields, 2nd ed., Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K. 102 pp.

Caron, R. M., C. Samson, P. Straznicky, S. Ferguson, and L. Sander. 2014. "Aeromagnetic Surveying using a Simulated Unmanned Aircraft System." *Geophysical Prospecting* 62, 2, 352–363. doi:10.1111/1365-2478.12075.

Carrasco-Núñez, G. and Branney, M.J. 2005, Progressive assembly of a massive layer of ignimbrite with a normal-to-reverse compositional zoning: the Zaragoza ignimbrite of central Mexico. *Bulletin of Volcanology*, 68, 3–20.

Carrasco-Núñez, G., López-Martínez, M., Hernández, J., Vargas, V., 2017a. Subsurface stratigraphy and its correlation with the surficial geology at Los Humeros geothermal field, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geothermics* 67, 1-17.

Carrasco-Núñez, G., Hernández, J., De León, L., Dávila, P., Norini, G., Bernal, J.P., Jicha, B., Navarro, M., López, P., 2017b. Mapa geológico del complejo volcánico Los Humeros y campo geotérmico, sector oriental del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano. *Terra Digitalis*, [S.I.], v. 1, n. 2.

Carrasco-Núñez, G., Bernal, J. P., Dávila, P., Jicha, B., Giordano, G., Hernández, J., 2018. Reappraisal of Los Humeros volcanic complex by new U/Th zircon and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating: Implications for greater geothermal potential. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 19, 1, 132-149. <https://doi.org/10.1002/2017GC007044>

Carta de campo magnético Total E14-B25, Xonacatlán, Puebla, Veracruz, 2010. Servicio Geológico Mexicano (SGM), México.

Cedillo, F., 2000. Hydrogeologic model of the geothermal reservoirs from Los Humeros, Puebla, México. *Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu - Tohoku, Japan*, 1639-1644.

Cunningham, M. 2016, Aeromagnetic surveying with unmanned aircraft systems. M.Sc. Thesis. Department of Earth Sciences, Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada, 156 pp.

DGAC de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), 2017, **CO AV 23/10 R2**

Ferriz, H., and Mahood, G., 1984. Eruption Rates and Compositional Trends at Los Humeros Volcanic Center, Puebla, Mexico. *Journal of Geophysical Research*, 89 (B10), 8511-8524.

Funaki, M., Higashino, S., Sakanaka S., Iwata, N., Nakamura, N., Hirasawa, N., Obara, N., Kuwabara, M., 2014. Small unmanned aerial vehicles for aeromagnetic surveys and their flights in the South Shetland Islands, Antarctica. *Polar Science*. Vol 8, issue 4. 342-356

Funaki, M. & Tanabe, S. & Project, A., 2007. A Small Autonomous Unmanned Aerial Vehicle, Ant-Plane 4, for aeromagnetic survey. *AGU Spring Meeting Abstracts*.

Gavazzi, B., P. Le Maire, M. Munschy, and A. Dechamp, 2016, Fluxgate vector magnetometers: A multisensor device for ground, UAV, and airborne magnetic surveys: *The Leading Edge*, 35, no.9, 795–797, <http://dx.doi.org/10.1190/tle35090795.1>.

Gee, J., Cande, S., Kent, D., Partner, R., Heckman, K. 2008. Mapping Geomagnetic Field Variations with Unmanned Airborne Vehicles. Eos Transactions American Geophysical Union. 89. 178-179. 10.1029/2008EO190002.

German Research Centre for Geosciences (GFZ). 2019, Frequently asked questions regarding geomagnetism. Helmholtz Centre Postdam, Alemania. Recuperado de <https://www.gfz-potsdam.de/en/section/geomagnetism/data-products-services/frequently-asked-questions-faqs/#c14394>

Griffiths, David J. 1998, Introduction to Electrodynamics (3rd edición). Prentice Hall. California, USA. 576pp.

Guardado France Rigoberto, Miguel Agustín Téllez Duarte, Angel Raúl Herrera Gutiérrez, 2017. El uso de drones en ciencias de la tierra. Revista Reaxxon, Ciencia y Tecnología Universitaria, 4, 2.

[http://reaxxon.utleon.edu.mx/Art\\_Impr\\_El\\_uso\\_de\\_drones\\_en\\_ciencias\\_de\\_la\\_tierra.html](http://reaxxon.utleon.edu.mx/Art_Impr_El_uso_de_drones_en_ciencias_de_la_tierra.html)

Hanna, W. F., 1990, Some historical notes on early magnetic surveying in the U. S. Geological Survey, in W. F. Hanna, ed., Geologic applications of modern aeromagnetic surveys: U. S. Geological Survey. Bulletin 1924, 63–73.

Izquierdo, G.M., Alfonso, A.A. and Daniel D.M., 2011. Evidence of Deep Acid Fluids in the Los Humeros Geothermal System, Mexico. GRC Transactions. 35, 625-629.

Kearey, P., Brooks, M. and Hill, I. 2011, An introduction to geophysical exploration. Malden, Mass. Blackwell. University of Bristol. Ty Newydd, Cit, UK. 281pp.

Liang, Z.P. and Lauterbur P.C., 2000, *Principles of Magnetic Resonance Imaging*, A signal processing perspective, IEEE Press, New York. 415pp

Lowrie, W. 1997, Fundamentals of geophysics. Cambridge: Cambridge University Press, UK, 391pp

Macintyre, S. 1999. The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook, chapter Magnetic Field Measurement. CRC Press LLC. Boca de Raton, Florida, USA. 34 pp.

Norini, G., Gropelli, G., Sulpizio, R., Carrasco-Núñez, G., Davila-Harris, P., Pellicioli, C., Zucca, F., De Franco, R., 2015. Structural analysis and thermal remote sensing of the Los Humeros Volcanic Complex: Implications for volcano structure and geothermal exploration. Journal of Volcanology and Geothermal Research 301, 221-237.

Norini, G., Carrasco-Núñez, G., Corbo-Camargo, F., Lermo J., Hernández Rojas J., Castro, C., Bonini, M., Montanari, D., Corti, G., Moratti, G., Piccardi, L., Chavez, G., Zuluaga, M. C., Ramirez, M., Cedillo F., 2019. The structural architecture of the Los Humeros volcanic complex and geothermal field. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 381, 312-329.

Parshin, A. V., V. S. Kanaikin, A. V. Blinovand, and A. O. Mikhalev. 2016. "Cost-saving Low-altitude UAV Magnetic Survey Technology and its GIS Software." Paper presented at the

15th EAGE International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects. doi:10.3997/2214-4609.201600547.

Parshin, A.V., Vladimir A. Morozov, Anton V. Blinov, Alexey N. Kosterev & Alexander E. Budyak, 2018. Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multicopter UAV as a promising replacement for traditional ground survey, *Geo-spatial Information Science*, 21:1, 67-74, DOI: 10.1080/10095020.2017.1420508

Primdahl, F., 1979, The fluxgate magnetometer: *Journal of Physics E, Scientific Instruments*, 12, no. 4, 241–253, <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3735/12/4/001>.

Prol-Ledesma, R.M., 1998. Pre- and post-exploitation variations in hydrothermal activity in Los Humeros geothermal field, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 83, 313-333.

Prystai A., Korepanov V, Dudkin F, Ladanivskyy B., 2016, Vector Magnetometer Application with Moving Carriers. *Sensors & Transducers 207* (is. 12) Lviv, Ukraine, 44-49.

Reeves, C. 2005, *Aeromagnetic Surveys Principles, Practice & Interpretation*. An online book Published by Geosoft.Delft, Netherlands.155 pp.

Reford, M. S., and J. S. Sumner, 1964, *Aeromagnetism: Geophysics*, 29, 482–516.

Reynolds, J.M. 1997, *An introduction to applied and environmental geophysics*. Chichester: Wiley, Printing,USA.2062pp

Rikitake, T. and Hagiwara, Y. 1966. Non-Steady State of a Herzenberg Dynamo. *Journal of geomagnetism and geoelectricity*, 18, 393–409.

Sabins, F. F. 1986. *Remote Sensing Laboratory Manual*, Chevron Oil Field Research Company,Waveland Press Inc. Long Grove ,Illinois,USA.495pp

Telford, W. M., L. P. Geldart, R. E. Sherrif, D. A. Keys, *Applied Geophysics*, 25, Cambridge University Press, New York, 1976.751pp

Urrutia-Fucugauchi, J., 1977, Importancia del magnetismo remanente natural en la interpretación de las anomalías magnéticas: *Boletín Asociación Mexicana de Geofísicos De Exploración*, 18, 83-116.

Yutsis V., Aranda-Gómez J.J., Arzate J.A., Bohnel H., Pacheco J., y López-Loera H., 2014. Geophysical modeling of Rincón de Parangueo Maar. 5<sup>th</sup> International Maar Conference, Querétaro, Mex.

Wood, A., I. Cook, B. Doyle, M. Cunningham, and C. Samson. 2016. “Experimental Aeromagnetic Survey Using an Unmanned Air System.” *The Leading Edge* 35 (3): 270–273. doi:10.1190/tle35030270.1.

Verma, M.P., Barrera, V., Sandoval, F., Tapia, R., Casimiro, E., Fernández, M.E., Rye, R., Gent, C., Johnson, C., 1998. Caracterización química e isotópica de las precipitaciones pluviales en la

zona geotérmica de Los Azufres, Michoacan, México. Rev. Geotermia, Rev. Méx. Geoenergía, 14, 1, 55-68.

### **Páginas de internet URLs**

- 1) <https://www.gfz-potsdam.de/en/section/geomagnetism/data-products-services/frequently-asked-questions-faqs/>
- 2) <http://reaxion.utleon.edu.mx/Art Impr El uso de drones en ciencias de la tierra.html>
- 3) <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>