



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROSPECCIÓN
MAGNETOMÉTRICA EN LA
ZONA DE PLAZUELAS,
GUANAJUATO**

TESIS

Que para obtener el título de
INGENIERA GEOFÍSICA

P R E S E N T A

NIDIA HILARIO HUERTA

DIRECTOR DE TESIS

ING. ALEJANDRO GARCÍA
SERRANO



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017



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.

Agradecimientos Personales

Agradezco especialmente a ti querida madre, Icela Huerta Sánchez, por el gran apoyo, consejos, comprensión y amor que me has dado siempre, ya que además de ser mi madre eres mi mejor amiga, porque eres un gran ejemplo como mujer, ser humano y madre. Por enseñarme a no rendirme nunca, a realizar mis sueños y porque sin ti no habría sido posible la culminación de este ciclo.

A mis hermanos, Tania y Carlos, así como a mi tío Jorge Huerta, por su apoyo incondicional, por todos los consejos, por ser parte de mi vida, por siempre estar a mi lado compartiendo buenos y malos momentos.

A mi padre Roberto Hilario, porque aunque la vida no nos dio la oportunidad de estar juntos, sé que desde el cielo estás siempre conmigo.

A mi alma mater la Universidad Nacional Autónoma de México, y en especial a la Facultad de Ingeniería, por darme la oportunidad de estudiar en sus aulas, dándome las herramientas para ser una profesionista, así como por todas las experiencias vividas en ella.

A mi tutor el Ing. Alejandro García, por el tiempo, apoyo y conocimientos otorgados durante la realización de este trabajo.

A mis sinodales, Ing. Xochitl, M.C. David, M.C. Esteban y M.C. Gerardo, por sus valiosos comentarios para que éste trabajo llegara a buen término.

A todos mis amigos, a los que sobraría mencionar, por formar parte de este camino, por compartir grandes momentos durante mi estancia en la universidad y fuera de ella, por su apoyo y por darme siempre ánimo para concluir este trabajo.

Gracias a todas aquellas personas que directa o indirectamente contribuyeron para la realización de este proyecto.

Agradecimientos Académicos

Agradezco al Arqueólogo Carlos Castañeda López (fallecido en junio de 2016) del Centro INHA Guanajuato, a Efraín Cárdenas García del Colegio de Michoacán y a la Arqueóloga María Ruth Ortega Rivera de la zona Arqueológica Plazuelas/ Instituto Estatal de la Cultura de Guanajuato, por todas las facilidades otorgadas para llevar a cabo el trabajo de campo.

También agradezco a los alumnos de las prácticas profesionales de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, semestre 2015-2, por recabar los datos de campo presentados en este trabajo.

ÍNDICE

RESUMEN	6
ABSTRACT.....	7
INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO I. ZONA ARQUEOLÓGICA PLAZUELAS.....	11
1.1 HISTORIA	12
1.2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA ARQUEOLÓGICA PLAZUELAS	13
CAPÍTULO II. GEOLOGÍA.....	16
2.1 GEOLOGÍA DEL ESTADO DE GUANAJUATO	16
2.2 GEOLOGÍA DEL MUNICIPIO DE PÉNJAMO Y DE LA ZONA ARQUEOLÓGICA PLAZUELAS	17
CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO	19
3.1 MÉTODO MAGNETOMÉTRICO	19
3.2 CAMPO MAGNÉTICO DE LA TIERRA.....	20
3.3 ORIGEN DEL CAMPO GEOMAGNÉTICO	23
3.4. PRINCIPIOS DE LA MAGNETOMETRÍA.....	25
3.5 CORRECCIONES.....	31
3.6. POSTPROCESADO DE DATOS: REALCE Y FILTRAJE	33
3.6.1. <i>Coseno direccional</i>	33
3.6.2. <i>Derivadas direccionales</i>	34
3.6.3. <i>Reducción al Polo</i>	34
3.6.4. <i>Señal Analítica</i>	36
3.6.5. <i>Campo Regional y Campo Residual</i>	37
CAPÍTULO IV. ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS	39
4.1. LOGÍSTICA DE CAMPO.....	39
4.2. EQUIPO GEOFÍSICO.....	40
4.3. ADQUISICIÓN DE DATOS.....	42
4.4. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	46
CAPÍTULO V. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN.....	53
5.1. JUEGO DE PELOTA (JP).....	54
5.2 TERRAZA 1 (T1)	61
5.3 TERRAZA 3 (T3)	68
5.4 TERRAZA 4 (T4)	76

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
REFERENCIAS.....	86
ANEXO	89

Resumen

Para la realización del presente trabajo se utilizó el método geofísico de magnetometría, uno de los métodos más utilizados en arqueología para localizar zonas de interés para futuras excavaciones, ahorrando tiempo y dinero en comparación con la arqueología tradicional.

En las últimas décadas el método magnético más usado ha sido el gradiente vertical, dado que no requiere correcciones y se obtiene directamente del equipo. El objetivo de este trabajo es mostrar la importancia de utilizar los resultados de ambos sensores en forma independiente, para brindar información sobre la profundidad de las anomalías y así poder descartar el origen de éstas, ya sea de origen geológico o antropogénico, y no solo del gradiente como hasta ahora se ha hecho.

Este método fue aplicado en la zona Arqueológica Plazuelas, compuesta por diversos edificios los cuales fueron edificados y ocupados entre los años 600 y 900 de nuestra era y finalmente quemada y destruida 300 años después de su edificación, sin saberse hasta el momento la cultura que lo ocupó.

La adquisición de datos se realizó en cuatro zonas con diferentes áreas, las cuales denominamos, Juego de Pelota, Terrazas 1, Terraza 2 y Terraza 3.

El procesado de los datos fue hecho tanto en Excel como en el programa GEOSOFT para hacer las correcciones por Variación Diurna e IGRF, obteniendo de esta forma las anomalías magnéticas sin la influencia de éstas. Posteriormente se aplicaron algunos procesos que pudieran darnos una mejor visualización de las anomalías magnéticas para su interpretación.

Los resultados demostraron que el método magnetométrico es de gran utilidad en la exploración arqueológica, ya que se encontraron diversos conjuntos de anomalías, los cuales se pudieron asociar a estructuras y cuerpos antropogénicos. Además de mostrar la ventaja que tiene el uso de la información de ambos

sensores por separado, ya que de esta forma se pudo discriminar una anomalía de origen geológico a una de origen antropogénico por medio de la profundidad que alcanza cada uno de los sensor y tomando en cuenta la geología del lugar.

Abstract

For the accomplishment of the work is used the geophysical method of magnetometry, one of the methods most used in archeology to locate areas of interest for future excavations, saving time and money compared to traditional archeology.

In the last decades the most used magnetic method has been the vertical gradient, since it does not require corrections and is obtained directly from the equipment. The objective of this work is to show the importance of using the results of both sensors independently, to provide information on the depth of the anomalies and to be able to discard the origin of these, either geological or anthropogenic, and not only the Gradient as so far has been done.

This method was applied in the Archaeological Zone Plazuelas, composed of several buildings which were built and occupied between the years 600 and 900 of our era and finally burned and destroyed 300 years after its construction, without knowing until the moment the culture that it Occupied.

The data acquisition was carried out in four zones with different areas, which we call Ball Game, Terraces 1, Terrace 2 and Terrace 3.

Data processing was done both in Excel and in the GEOSOFT program to make corrections for Day Variation and IGRF, thus obtaining magnetic anomalies without the influence of these. Subsequently some processes were applied that could give us a better visualization of magnetic anomalies for their interpretation.

The results showed that the magentometric method is very useful in the archaeological exploration, since several sets of anomalies were found, which

could be associated to anthropogenic structures and bodies. In addition to showing the advantage of using the information of both sensors separately, since this way could be discriminated anomaly of geological origin to an anthropogenic origin by means of the depth that reaches each sensor and taking into account the geology of the place.

Introducción

Las prospecciones geofísicas han sido utilizadas desde hace décadas para el estudio de estructuras geológicas, sin embargo, a partir de los 80 han tomado gran relevancia en la arqueología. Ya que permiten evaluar el potencial de una zona antes de iniciar una excavación (Brito-Schimmel et Carreras, 2010). Los métodos de prospección geofísica más utilizados en arqueología son el Magnetométrico, Eléctrico y Electromagnético.

Se considera que la primera aplicación de estos métodos en arqueología ocurrió casi simultáneamente en Inglaterra por Atkinson, y en México por Terra, en el periodo de 1946-1947, ambos utilizando métodos eléctricos (Brito-Schimmel et Carreras, 2010).

En cuanto a los métodos magnéticos, el primer uso importante de magnetómetros de protón se produjo a inicios de 1950, en una investigación arqueológica (Smekalova et al, 2008; Heimmer, 1995). La prospección magnética en arqueología, está basada en la detección de variaciones del campo magnético local debidas a la presencia de estructuras superficiales. Por lo que los levantamientos con magnetómetros se encuentran entre los más eficientes métodos geofísicos utilizados para la arqueología, ya que muchos objetos arqueológicos tienen propiedades magnéticas distintivas que permiten diferenciar sobre la superficie del sitio las anomalías magnéticas específicas que crean.

La prospección magnetométrica es un método no invasivo, eficiente, rápido y por tanto de bajo costo, por lo que es de beneficio para la arqueología ya que al utilizar estas herramientas se ahorra tiempo, dinero y se puede abarcar una mayor extensión de la zona de estudio.

En este trabajo se muestran algunos de los beneficios que tiene esta prospección al buscar cuerpos y estructuras antropogénicas antiguas específicamente en la zona arqueológica de Plazuelas, Guanajuato. Uno de estos beneficios es el poder diferenciar una estructura de origen geológico a una de origen arqueológico, por

medio de la información de las anomalías que nos proporcionan las diferentes alturas de los sensores y al utilizarlos de manera independiente, las cuales nos dan un indicio de las profundidades de estas, tomando en cuenta la geología del lugar.

Capítulo I. Zona Arqueológica Plazuelas

La zona arqueológica de Plazuelas, también denominada Valle de Pénjamo, se encuentra en las inmediaciones de la comunidad de San Juan el Alto Plazuelas, está ubicada al suroeste del estado de Guanajuato, México, entre las coordenadas 20°24'22" a 20°24'06" latitud Norte y 101°49'41" a 101°49'31" longitud Oeste, a una elevación de 1842 msnm aproximadamente, como se puede observar en la Figura 1. Ocupa un área de 34 hectáreas (Morales, 2015).

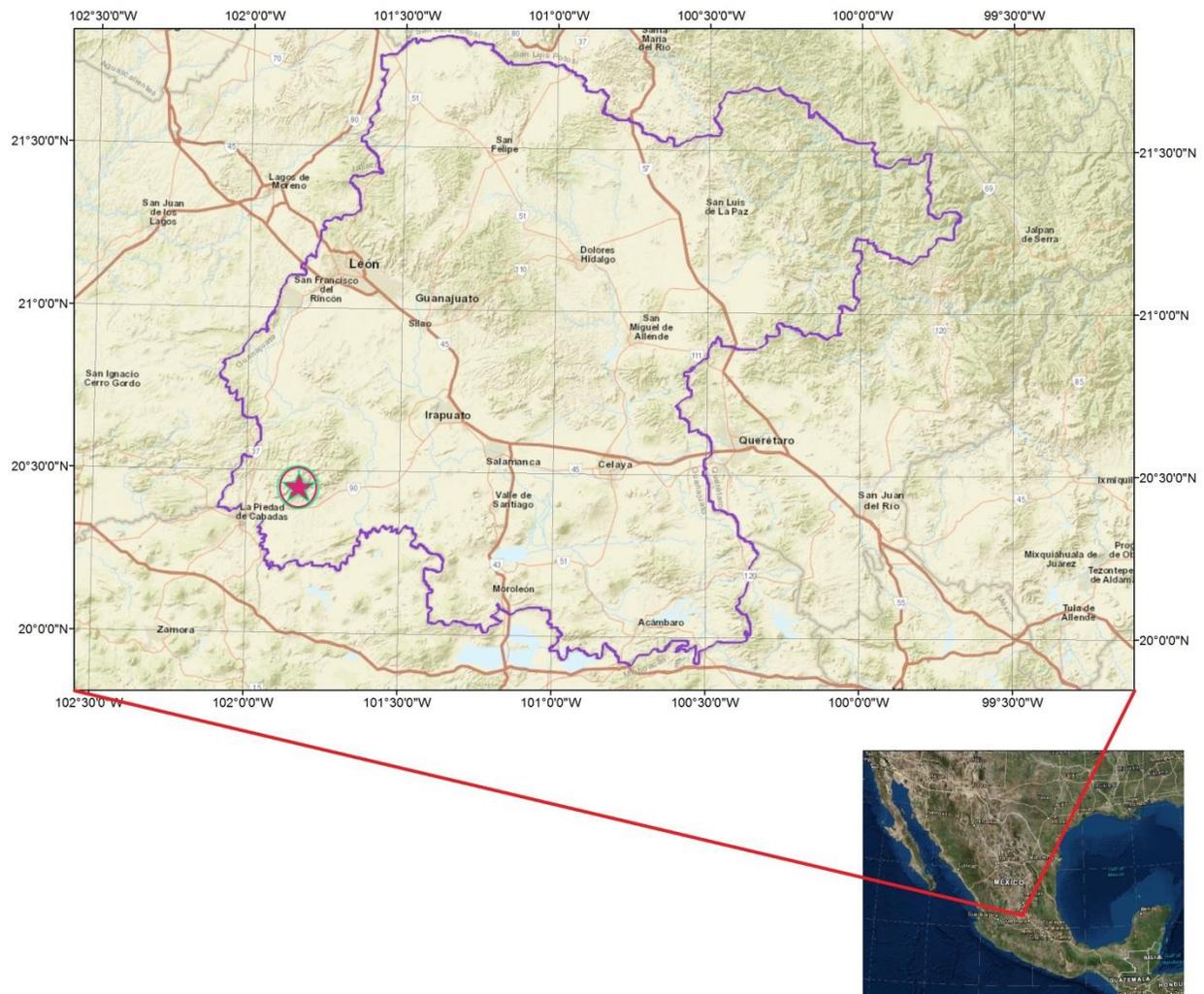


Figura 1. Ubicación de Estado de Guanajuato, marcando con una estrella color rojo la zona arqueológica Plazuelas.

El valle de Pénjamo se encuentra limitado al norte por la Sierra de Pénjamo, al suroeste por una pequeña Sierra donde sobresale el Cerro Barajas y al suroeste por otra elevación denominada Mesa de Acuitzio, al este por el río Turbio y al sureste, sur y suroeste por el río Lerma (Castañeda, 2008).

Se encuentra construida sobre tres laderas que descienden de norte a sur separadas por dos barrancas, al poniente la llamada Los Cuijes y al oriente la de Agua Nacida. Sus edificios se encuentran emplazados entre tres ranchos; Plazuelas, El Cobre y El Sauz de Pastores (Castañeda, 2008).

El acceso a esta zona arqueológica, de acuerdo con el INHA, es tomando la carretera federal 90, tramo Irapuato-La Piedad, aproximadamente a 12 kilómetros de Pénjamo, a la altura de la empresa CICABA (Salvi) se encuentra la desviación a San Juan el Alto Plazuelas.

1.1 Historia

De acuerdo a evidencias arqueológicas, Plazuelas fue edificada y ocupada entre los años 600 y 900 de nuestra era. Los habitantes de esta zona provenían de varias etnias, pero hasta el momento no se sabe con exactitud si fueron los Chichimecas los que la fundaron o una cultura desconocida (Morales, 2015; Cárdenas, 2010).

Se cree que al cabo de 300 años de haberse construido y poblado la ciudad, ésta fue destruida, quemada y posteriormente abandonada (Morales, 2015)

De acuerdo a Castañeda (2008), no se ha encontrado ningún documento por escrito en el que se mencione la existencia del sitio. Fue en 1981 cuando es registrado oficialmente por Sergio Sánchez y Gabriela Zepeda, al encontrarlo en su recorrido por la región con motivo de la instalación del gasoducto Guanajuato, en ese entonces lo designaron con el nombre de “El Cobre”.

No fue hasta 1998, cuando Carlos Castañeda junto con Daniel Juárez inician el Proyecto Arqueológico Plazuelas, que tenía como objetivo, la investigación integral del sitio y su restauración.

En marzo de 2006 la zona fue abierta al público, siendo así la primera zona arqueológica abierta al público en Guanajuato.

1.2 Descripción de la Zona Arqueológica Plazuelas

Plazuelas está formada por diversos edificios, que fueron construidos con cantera tomada de una cañada cercana.

Citando textualmente a Carlos Castañeda en “PLAZUELAS GUANAJUATO” (2008), Plazuelas se compone de la siguiente forma:

El centro ceremonial se encuentra al pie de tres cerros denominados Los Picachos. De donde sobre salen siete edificios construidos de manera dispersa, los cuales están comunicados entre sí por una serie de veredas y en donde su lugar de confluencia es el manantial conocido con el nombre de Agua Nacida.

En la ladera oeste se encuentra una cancha del juego de pelota (aún cubierta por tierra y vegetación), la cual está asociada a una serie de terrazas habitacionales.

En la ladera este, aún sin excavar, se encuentran cuatro edificios, que parecen ser el punto de contacto de varios pueblos, tanto del occidente como del centro de México. En este lugar se pueden observar:

- Un grupo de tres basamentos piramidales con una plaza abierta al sur llamada “Los Cuitzillos”.
- Un edificio de planta anular, llamado localmente “El Cajete”.
- Una pequeña pirámide cimentada sobre un afloramiento rocoso a la que se le denominó como “La Crucita”.
- Dos pirámides que limitan un pequeña plaza cuadrangular, conocida como “El Cobre”

En la ladera central se encuentra el edificio religioso más grande e importante de Plazuelas, conocido localmente como “Casas Tapadas”, lo constituyen cuatro basamentos piramidales de diferentes tamaños y formas, en donde aún se pueden

observar habitaciones que fueron usadas como templos, un salón, un pequeño altar y una serie de plazas. A este se ingresa por medio de diversas escalinatas ubicadas en los cuatro rumbos; la del norte, este y sur, sugieren ser parte de la vialidad interna del edificio, mientras que la del oeste debió ser la entrada de los visitantes foráneos.

Al sur de Casas Tapadas, en el centro de una gran plaza, se encuentra una cancha para el juego de pelota, la cual se comunica mediante una calzada. Está cerrada por dos muros que presentan un ligero declive, donde debió rebotar la pelota, a ella, los jugadores debieron acceder por medio de dos pequeñas escalinatas ubicadas al norte y al sur. Mientras que los observadores subían a los estrados por medio de dos escaleras ubicadas en los costados este y oeste. En ella se encontraron cinco marcadores que representan serpientes emplumadas.

Al noreste de Casas Tapadas, a la orilla de la barranca, se encuentra una pequeña habitación de cuatro piezas que rodean en tres de sus lados un patio cuadrangular abierto al desfiladero, en este cuarto se encontraron instrumentos propios de una cocina.

Se ha encontrado a orillas de las barrancas una serie de afloramientos rocosos, en donde fueron tallados, en alto y bajo relieve, diversos símbolos y elementos arquitectónicos en miniatura. De los que sobresale una roca que reproduce el edificio Casas Tapadas, con sus cuatro basamentos piramidales, el arranque de sus templos, el salón, altar el muro-banqueta de sus patios interiores y sus siete accesos.

En la Figura 2 se muestra la distribución de las edificaciones que componen la zona arqueológica Plazuelas.

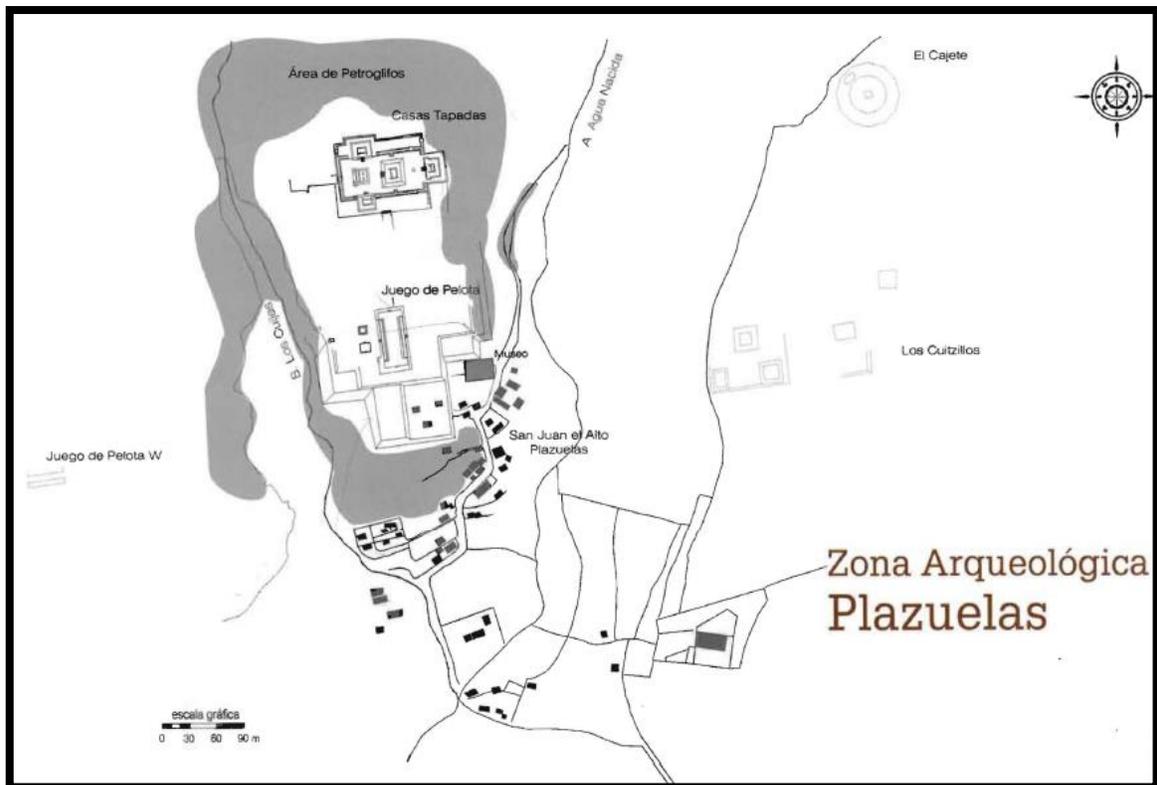


Figura 2. Distribución de las edificaciones que conforman la Zona Arqueológica Plazuelas (Tomado de Castañeda, 2008)

Capítulo II. Geología

2.1 Geología del Estado de Guanajuato

De acuerdo con el atlas de riesgos geológicos publicado en la página de internet de la Secretaría de Seguridad Pública del Estado de Guanajuato, el Estado de Guanajuato está dividido en tres provincias fisiográficas:

1. El Eje Neovolcánico, abarca la porción sur del Estado, caracterizándose por ser de origen volcánico, estas rocas son de tipo basáltico y pertenecen al Terciario Superior-Cuaternario. Esta zona está constituida por mesetas formadas por coladas de lava, edificios volcánicos de forma cónica y extensos valles íntermontañosos rellenos por sedimentos aluviales y lacustres formados por gravas, arenas y arcillas, los cuales fueron depositados durante el Terciario Superior – Cuaternario.
2. La Mesa Central: abarca la porción Norte del Estado, incluyendo la zona de sierras y llanuras, formadas principalmente por rocas volcánicas de tipo riolítico (tobas e ignimbritas) pertenecientes al Terciario Medio y Superior. También podemos encontrar depósitos aluviales y lacustres en esta zona, los cuales pertenecen al Terciario Superior y Cuaternario.
Dentro de la Mesa Central se encuentra la Sierra de Guanajuato, formada por un núcleo integrado por rocas intrusivas de tipo granítico y granodiorítico, que al levantar las capas que las cubrían les provocaron metamorfismo. Estas rocas pertenecen al Terciario y están representados por esquistos y gneiss.
Sobre las rocas metamórficas e intrusivas también se pueden observar extensos afloramientos de conglomerados que pertenecen al Terciario Inferior.
3. La Sierra Madre Oriental, ubicada en el extremo Norte del Estado, ocupa una pequeña área denominada Carso Huasteco destacando sierras y cañones escarpados, así como pliegues anticlinales y sinclinales de

dirección N-S, los cuales están constituidos por rocas sedimentarias de origen marino, representadas por calizas, lutitas y areniscas.

2.2 Geología del Municipio de Pénjamo y de la zona arqueológica Plazuelas

El Municipio de Pénjamo se encuentra entre los paralelos 20°37' y 20°11' de latitud norte y los meridianos 101°35' y 102°06' de longitud oeste, pertenece a la provincia del Eje Neovolcánico, por lo que el 35.8% de su geología pertenece al Terciario – Cuaternario, el 27.6% al Neógeno y el 3.6% al Terciario, esto de acuerdo con el Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, 2009.

De acuerdo con Parga (2003) en el Inventario Físico de los Recursos Minerales del Municipio Pénjamo, Gto., las rocas que afloran en éste Municipio son de origen volcánico y son las siguientes:

- Riolita – Toba Riolítica (ToR-TR).
- Andesita (ToA).
- Arenisca – Toba Riolítica (Tm Ar-TR).
- Basalto Andesita (TmB-A).
- Andesita-Basalto (Tm A-B).
- Basalto – Andesita (TplB-A).
- Toba Basáltica – Arenisca (Qpl TB-Ar).
- Andesita – Basalto (QptA-B).
- Piroclástos (QptPc).

Con base en la carta geológico-minera F14-10 (Figura 3), del Servicio Geológico Mexicano, la zona de estudio (Zona Arqueológica Plazuelas), está constituida por Toba Basáltica - Arenisca (Qpl TB-Ar) que pertenece al periodo Cuaternario, la cual abarca la porción oriental y sur occidental del municipio de Pénjamo. En esta zona afloran tobas basálticas con horizontes de arenisca, depositados en una

paleocuenca, donde se desarrolló una sedimentación caótica, por lo que se encuentran mezclados con arcilla, limo y grava (Parga, 2003).

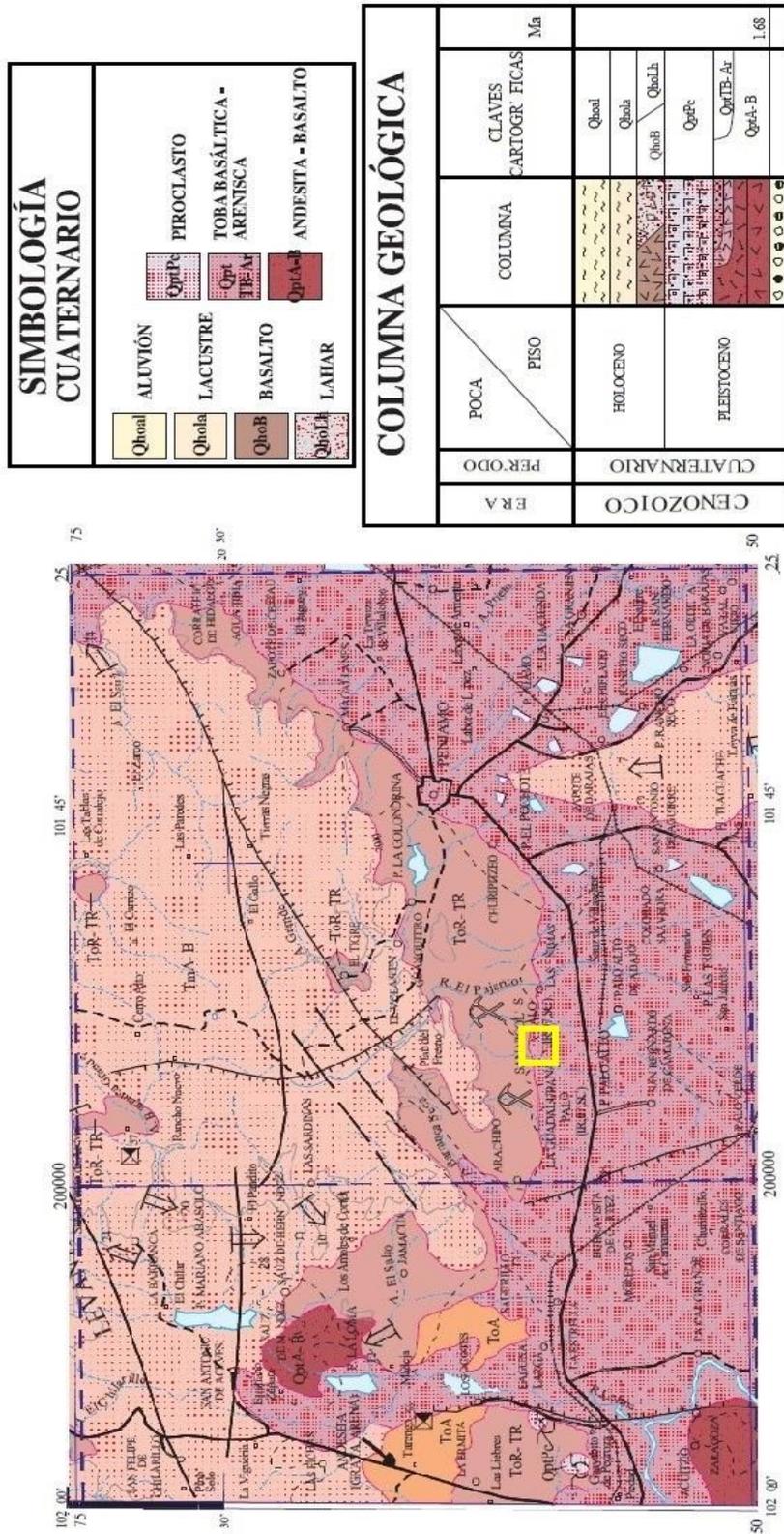


Figura 3. Se observa parte de la carta Geológico-Minera F14-10 del Servicio Geológico Mexicano (SGM), marcado con un recuadro color amarillo se muestra la ubicación de la Zona Arqueológica Plazuelas, en ella se puede observar que geológicamente, la zona de estudio se encuentra en el área marcada con Toba Basáltica-Arenisca, perteneciente al Cuaternario.

Capítulo III. Marco teórico

3.1 Método Magnetométrico

La magnetometría es una técnica de la prospección magnética relativamente simple en su aplicación, y es uno de los métodos más antiguos de la exploración geofísica. Estudia las variaciones en la intensidad del campo magnético terrestre (anomalías magnéticas), esto es, el campo magnético producido por cuerpos y estructuras en el subsuelo que pueden ser de origen geológico o humano. Su intensidad depende del contenido de magnetita y/o materiales magnéticos en ellas.

El método magnetométrico es muy utilizado en la prospección petrolífera, en la exploración minera y en la exploración arqueológica. La primera aplicación importante de los métodos geofísicos en una investigación arqueológica fue hecha a inicios de 1950, haciendo uso de magnetómetros de protón (Smekalova et al, 2008; Heimmer, De Vore, 1995).

El levantamiento con magnetómetros de protón es de los más eficientes y universales entre los métodos geofísicos utilizados para la arqueología, ya que poseen propiedades magnéticas que permiten distinguirlas en la superficie (Smekalova et al, 2008).

Los métodos magnéticos son de gran utilidad para la investigación arqueológica, ya que se trata de métodos no invasivos, por lo que no causan ningún daño, además de ser conclusos y de bajo costo.

El método magnético de prospección tiene muchos puntos comunes con el método gravimétrico, pues ambos buscan anomalías originadas por cambios de las propiedades físicas de las rocas subyacentes. La diferencia que hay entre estos dos métodos es que, en el método magnético la propiedad de una roca que determina sus efectos magnéticos, es decir, la intensidad de magnetización, tiene no solo magnitud sino también dirección , mientras que las propiedades que

gobierna el campo gravitatorio, la masa, solamente tiene magnitud. Además de que los efectos magnéticos de las rocas pueden estar en gran parte influenciados por pequeños vestigios de ciertos minerales, mientras que los efectos gravitatorios dependen principalmente de los contribuyentes fundamentales de las rocas (Dorbin, 1975).

3.2 Campo magnético de la Tierra

El primer análisis científico del campo magnético de la Tierra y fenómenos asociados fue publicado por el físico inglés William Gilbert en 1600 en el libro “De Magnete” (Reynolds, 2011), él consideró a la Tierra como un imán esférico. Posteriormente en el siglo XIX los trabajos de Gauss mostraron las características del campo magnético de la Tierra.

Como una primera aproximación se puede considerar que el campo magnético de la Tierra surge de un imán con dos polos en el centro de la Tierra inclinado 11.5° , desde el eje de rotación (Mishra, 2011).

En la figura 4 se observa el modelo del campo magnético de la Tierra en donde el eje geográfico se encuentra inclinado 11.5° con respecto del eje magnético, los polos magnéticos norte y sur, NP y SP son puntos donde la inclinación (I) del campo magnético de la Tierra es $+90^\circ$ y -90° , respectivamente, mientras que en el ecuador magnético es cero. θ es la latitud magnética o inclinación del campo magnético de la Tierra en ese punto. También se muestra la intensidad del campo magnético de la Tierra (F), su componente horizontal (H) y vertical (Z).

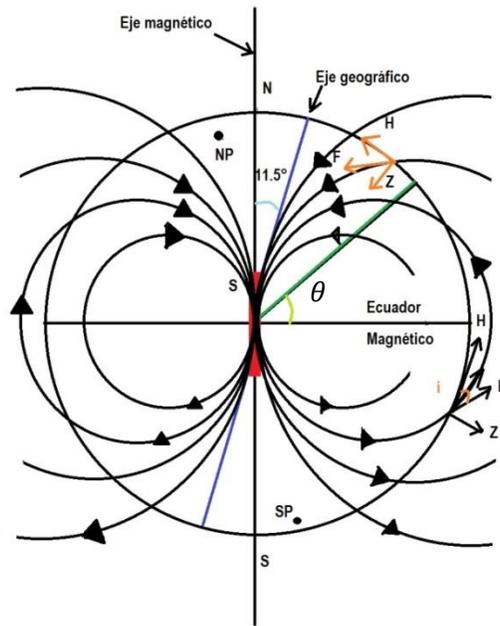


Figura 4. Modelo geomagnético de la Tierra

De acuerdo a Logachev (1978), para obtener las componentes del campo magnético terrestre consideraremos la intensidad del campo magnético referida a un sistema de ejes coordenados rectangulares (Figura 5) en el que el eje x es horizontal y dirigido al Norte geográfico, el eje y también horizontal y dirigido hacia el Este y el eje z vertical y dirigido hacia abajo. Los vectores componentes de la intensidad de campo T se denomina respectivamente para cada eje: norte X , este Y , vertical Z . La proyección del vector T sobre el plano horizontal se denomina componente horizontal H . El ángulo que forma la componente H con el eje x se denomina declinación y se designa por D ; se le atribuye signo más en el caso de que el vector H se desvíe respecto al eje x hacia el Este y signo menos hacia el Oeste. El ángulo entre el plano xoy y el vector T se denomina inclinación y se designa por I .

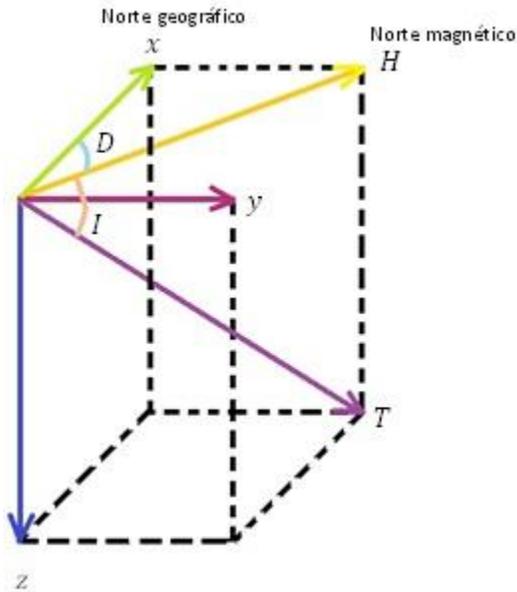


Figura 5. Componentes del campo geomagnético

Con base en el modelo de la figura 5 tenemos que las componentes del campo geomagnético son:

Componente horizontal $H = \sqrt{X^2 + Y^2}$ (3.2.1)

Intensidad total $T = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$ (3.2.2)

La Inclinación $I = \arctan \frac{Z}{\sqrt{X^2+Y^2}}$ (3.2.3)

La Declinación $D = \arcsen \frac{Y}{\sqrt{X^2+Y^2}}$ (3.2.4)

La naturaleza del campo geomagnético de la Tierra, de acuerdo con Telford (1990), está compuesto por tres partes:

1. El campo principal, el cual varía con relativa lentitud y es de origen interno.
2. El campo magnético externo, el cual es un pequeño campo (comparado con el campo principal), que varía bastante rápido y se origina fuera de la Tierra.
3. Las variaciones espaciales en el campo principal, que son generalmente más pequeños que el campo principal, son casi constantes en tiempo y

lugar y son causados por anomalías magnéticas locales en la corteza cercana a la superficie de la Tierra.

El campo geomagnético medido en un punto de la superficie de la Tierra, considerando los campos generados por diversas fuentes, se puede representar con la siguiente expresión:

$$B = B_0 + B_r + B_c + B_t$$

Dónde:

B : es el valor del campo geomagnético medido en la superficie de la Tierra.

B_0 : es el valor del campo teórico producido por un dipolo magnético que tiene su eje inclinado aproximadamente 11.5° con respecto del eje de rotación de la Tierra y que no pasa por el centro.

B_r : es el campo cortical, tiene su origen en la corteza terrestre en regiones aún más pequeñas, sus efectos son localizados y usualmente se conocen como campo de las anomalías.

B_t : es la parte del campo medido en la superficie que varía más sensiblemente con el tiempo que los otros términos. Este campo se origina en el exterior de la Tierra.

La suma del campo dipolar con el campo residual es llamada Campo Principal y a la suma de este con el campo cortical, se le denomina Campo Interno, mientras que B_t recibe el nombre de Campo Externo (Muniz, 1997).

3.3 Origen del campo Geomagnético

De acuerdo con Blakely (1996), si consideramos la inducción magnética B y el potencial V , donde $B = -\nabla V$, y supongamos que podemos medir V o cualquier componente de B sobre una superficie esférica con radio a . Suponiendo que en la fuente libre la región V es armónica y satisface la ecuación de Laplace,

$$\nabla^2 V = 0 \quad (3.3.1)$$

Específicamente, V es un armónica en la superficie de la esfera siempre que las fuentes de V no se extiendan a través de la superficie, entonces V y $\frac{\partial V}{\partial r}$ debe desaparecer cuando $r \rightarrow \infty$, y V puede ser representado por una expansión armónica esférica,

$$V^i = a \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (A_n^{mi} \cos m\phi + B_n^{mi} \sin m\phi) P_n^m(\theta), \quad r \geq a \quad (3.3.2)$$

Donde θ es el ángulo de colatitud, ϕ es el ángulo de longitud, a es el radio de la esfera, el superíndice i indica que el potencial y los coeficientes armónicos (A_n^{mi} y B_n^{mi}) se deben a fuentes internas y $P_n^m(\theta)$ está asociado al polinomio de Legendre de grado n y orden m normalizado de acuerdo con la convención de Schmidt.

Por otro lado, si las fuentes yacen fuera de la esfera, entonces V y $\frac{\partial V}{\partial r}$ deben ser finitos dentro de la esfera, por lo que la expresión para representar V será:

$$V^e = a \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r}{a}\right)^n \sum_{m=0}^n (A_n^{me} \cos m\phi + B_n^{me} \sin m\phi) P_n^m(\theta), \quad r \leq a \quad (3.3.3)$$

Donde el superíndice e representa el origen externo de las fuentes. Si existen fuentes internas y externas, el potencial en una región libre de fuentes cercana a la superficie de la esfera estará dada por la suma de la ecuación 3.3.2 y 3.3.3,

$$\begin{aligned} V &= V^i + V^e \\ &= a \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left\{ \left[A_n^{mi} \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} + A_n^{me} \left(\frac{r}{a}\right)^n \right] \cos m\phi \right. \\ &\quad \left. + \left[B_n^{mi} \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} + B_n^{me} \left(\frac{r}{a}\right)^n \right] \sin m\phi \right\} P_n^m(\theta) \\ &= a \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left\{ \left[C_n^m \left(\frac{r}{a}\right)^n + (1 - C_n^m) \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \right] A_n^m \cos m\phi + \left[S_n^m \left(\frac{r}{a}\right)^n + (1 - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. S_n^m) \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \right] B_n^m \sin m\phi \right\} P_n^m(\theta) \quad (3.3.4) \end{aligned}$$

Donde

$$A_n^m = A_n^{mi} + A_n^{me}$$

$$B_n^m = B_n^{mi} + B_n^{me}$$

$$C_n^m = \frac{A_n^{me}}{A_n^m}$$

$$S_n^m = \frac{B_n^{me}}{B_n^m}$$

Los coeficientes C_n^m y S_n^m en la ecuación 3. son fracciones con valores entre 0 y 1 para cualquier grado n y orden m . C_n^m y S_n^m indican la aportación relativa de las fuentes externas al potencial total observado en la superficie esférica.

Ahora el objetivo es determinar C_n^m y S_n^m a partir del conocimiento de V justo en la superficie esférica, se sustituyen $r = a$ en la expresión 3.3.4, reduciéndose a la siguiente expresión en armónicos esféricos,

$$\begin{aligned} V &= a \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n (A_n^m \cos m\phi + B_n^m \sin m\phi) P_n^m(\theta) \\ &= a \sum_{n=0}^{\infty} S_n(\theta, \phi) \end{aligned} \quad (3.3.5)$$

3.4. Principios de la magnetometría

Algunos conceptos básicos en prospección magnética, son los siguientes:

Fuerza magnética: Si dos polos de fuerza P_0 y P_1 , respectivamente, están separados por la distancia r , la fuerza F entre ambos estará expresada por la relación:

$$F = \frac{1}{\mu} \frac{P_0 P_1}{r^2} \quad (3.4.1)$$

Donde μ es la permeabilidad, la cual depende de las propiedades magnéticas del medio en que los polos están situados.

Campo magnético: La intensidad del campo magnético en un punto se define como la fuerza por unidad de intensidad de polo que se ejercería cuando un pequeño polo de fuerza P_0 se coloca en dicho punto. Así la intensidad del campo debida al polo de fuerza P situado a una distancia r es:

$$H = \frac{F}{P_0} = \frac{P}{\mu r^2} \quad (3.4.2)$$

H se mide en Amperio sobre metro en el Sistema Internacional.

Momento Magnético: Puesto que los polos aislados no son posibles, la entidad magnética básica es el dipolo magnético, que consta de dos polos de igual intensidad P y de signo contrario, separados por una distancia reducida L . El producto PL , intensidad de polo, por la distancia se define como M , momento magnético del dipolo. La dirección del momento está dirigida hacia el polo norte, coincidiendo con la dirección de L (Dobrin, 1988).

Magnetización: Cualquier material magnético situado en un campo magnético tiene polos magnéticos sobre su superficie inducidos por el campo. Si se trata de un material moderadamente magnético y de ampos magnéticos poco fuertes, como los que se consideran en trabajos geofísicos, la magnetización inducida, llamada a veces polarización, está en la dirección del campo aplicado, y su intensidad es proporcional a la intensidad del campo. La intensidad de magnetización, I , puede ser considerada como la fuerza inducida en el polo por unidad de superficie en un área normal al campo inductor.

$$I = kH \quad (3.4.3)$$

Donde k es la susceptibilidad.

El proceso por el que se origina este tipo de magnetización puede concebirse como una alineación de imanes elementales o dipolos que estaban inicialmente en orientaciones arbitrarias según la dirección del campo inducido; la alineación depende de la fuerza externa del campo. Por lo que I , también llamada \vec{M} , es el momento dipolar por unidad de volumen.

$$\vec{M}_i = \frac{\sum_i \vec{m}_i}{V} \quad (3.4.4)$$

\vec{M} se mide en Ampere sobre metro.

Inducción magnética: los polos magnéticos inducidos en un material por un campo externo H originan un campo propio, H' , que está relacionado con la intensidad de magnetización I , por la fórmula

$$H' = 4\pi I \quad (3.4.5)$$

El flujo magnético total dentro del material, medido en una pequeña cavidad alargada normalmente al campo, es denominado inducción magnética, B . Que es la suma de los campos externo e interno y proporcional a la intensidad del campo exterior en los materiales moderadamente magnéticos, como lo expresa la relación

$$B = H + H' = H + 4\pi I = H + 4\pi kH$$

$$B = \mu H \quad (3.4.6)$$

Susceptibilidad magnética: La susceptibilidad magnética k , es una medida de qué tan sensible es un material a ser magnetizado cuando es expuesto a un campo magnético.

Para el vacío $\mu_r = 1$ y $k = 0$.

De acuerdo al circuito de histéresis la susceptibilidad k no es constante para sustancias magnéticas, a medida que H aumenta, k aumenta rápidamente al principio, alcanza un máximo y luego disminuye a cero (Figura 6) (Telford, 1990).

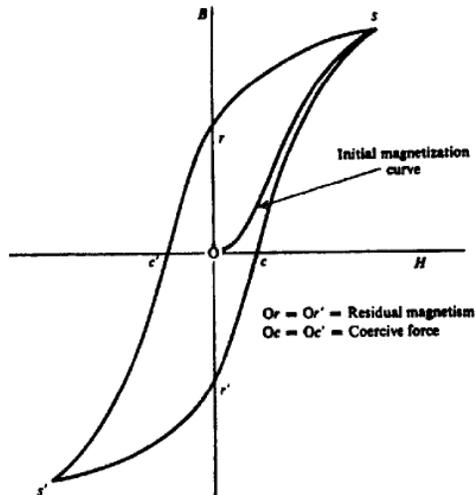


Figura 6. Circuito de histéresis, donde s y s' =saturación, r y r' =magnetismo remanente, c y c' =fuerza coerciva. (Tomado de Telford, 1990).

Para expresar la relación entre el flujo magnético B , la fuerza de magnetización H y la susceptibilidad k :

Dado que $B = \mu H$; unidades: $\mu(Wb/Am) * H(A/m) = Wb/m^2 = Teslas$

Ya que $\mu = \mu_r \mu_0$:

$$B = \mu_r \mu_0 H \quad (3.4.7)$$

Reorganizando para introducir $k = \mu_r - 1$:

$$\begin{aligned} B &= \mu_0 H + \mu_0 (\mu_r - 1) H \\ &= \mu_0 H + \mu_0 k H \quad (3.4.8) \end{aligned}$$

Por lo tanto

$$B = \mu_0 H (1 + k) \quad (3.4.9)$$

Donde el valor de $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \left[\frac{N}{A} \right]$.

La susceptibilidad magnética de una roca depende su composición (Tabla 1), por lo que existen tres grupos de acuerdo a su comportamiento magnético:

- Diamagnético: son los materiales magnéticos que tienen susceptibilidad negativa. Los electrones cargados negativamente en estos materiales tienden a alinearse en una dirección opuesta a un campo inductor aplicado externamente, un ejemplo de estos son la sal común, el yeso y el grafito.
- Paramagnéticos: son los materiales que presentan susceptibilidad positiva, por lo que se alinean en la dirección del campo inductor externo dando lugar a una magnetización pequeña de la roca en dirección del campo inductor.
- Ferromagnéticos: son los materiales que presentan susceptibilidad positiva y con alto contenido de hierro, cobalto y níquel. Muestran una magnetización significativa y alineación en la misma dirección que el campo de inducción. Las propiedades de los materiales ferromagnéticos se manifiestan solo hasta su temperatura crítica (punto de Curie), por encima de la cual se transforman en paramagnéticos.

Anomalía Magnética: Una anomalía magnética es la diferencia del valor obtenido en campo, F_{obs} , y el valor teórico del campo magnético en el mismo punto, que se traduce a través de las correcciones ya mencionadas.

$$Anomalía = F_{obs} - F_{IGRF} - F_{V.D.}$$

Donde el F_{IGRF} es la corrección espacial (IGRF) y la $F_{V.D.}$ es la corrección temporal (variación diurna V.D.)

Tipo	Susceptibilidad X 10 ³ ((SI)	
	Rango	Promedio
Sedimentarias		
Dolomitas	0-0.9	0.1
Calizas	0-3	0.3
Areniscas	0-20	0.4
Pizarras	0.01-15	0.6
Prom. 48 sedimentarias	0-18	0.9
Metamórficas		
Anfibolita	0.3-3	0.7
Esquisto		1.4
Filita		1.5
Gneis	0.1-25	
Cuarcita		4
Serpentinas	3-17	
Pizarra	0-35	6
Prom. 61 metamórfica	0-70	4.2
Ígneas		
Granito	0-50	2.5
Riolita	0.2-35	
Dolerita	1-35	17
Augita-sienita	30-40	
Olivino-diabasa		25
Diabasa	1-160	55
Pórfido	0.3-200	60
Gabro	1-90	70
Basaltos	0.2-175	70
Diorita	0.6-120	85
Piroxenita		125
Peridotita	90-200	150
Andesita		160
Prom. Ígneas ácida	0-80	8
Prom. Ígneas básica	0.5-97	25
Minerales		
Grafito	-0.001- -0.01	0.1
Cuarzo		-0.01
Roca de sal		-0.01
Anhidrita, yeso		-0.01
Calcita		
Carbón		0.02
Arcillas		0.2
Calcopirita		0.4
Esfalerita		0.7
Casiterita		0.9
Siderita	1-4	
Pirita	0.05-5	1.5
Limonita		2.5
Arsenopirita		3
Hematites	0.5-35	6.5
Cromita	3-110	7
Franklinita		430
Pirrotita	1-6000	1500
Ilmenita	300-3500	1800
Magnetita	1200-19200	6000

Tabla 1. Basado en el Telford (1990)

3.5 Correcciones

Variación diurna

De acuerdo a Dorbin (1975), las Variaciones Diurnas son las oscilaciones menores y rápidas que ocurren en un periodo de 24 horas y que tienen amplitudes que dependen de la latitud en la que se realiza el estudio. Este tipo de variaciones son registradas con regularidad en gráficas por los observatorios magnéticos. Estos registros muestran dos tipos de variaciones; en los días tranquilos, las variaciones son suaves, regulares y de poca amplitud, mientras que en los días activos, la variación es menos regular y está asociada a otros fenómenos.

Ahora bien, este tipo de variaciones deben tomarse en cuenta para reducir los datos tomados por los magnetómetros de campo. Existen dos formas para realizar estas correcciones:

Tabla 1. Tomado de Telford, 1990.

- 1) Cuando sólo se dispone de un magnetómetro, se puede determinar el campo magnético de fondo a partir de las curvas de variación tomadas por los observatorios magnéticos.
- 2) Cuando se emplean dos instrumentos, uno de ellos es colocado como estación base, el cual registrará de manera continua en un punto fijo. Por lo que se realizaran las curvas de variación con estos datos.

Para corregir las variaciones de campo a partir de las curvas de variación diurna se elige una hora de referencia en cada curva y todos los valores deben ser corregidos para este tiempo.

Explicando más a fondo la segunda forma para realizar este tipo de corrección:

Se realiza una gráfica con los datos obtenidos en la base en función del tiempo y se obtiene el modelo matemático lineal, que tiene la forma:

$$y = mx + b \quad (3.5.1)$$

Donde y es la magnitud del campo geomagnético, m es la pendiente de la recta, x el tiempo y b la ordenada al origen.

Sustituyendo el tiempo deseado obtenemos la magnitud del campo una vez obtenidos estos datos se restaran a los datos obtenidos en el levantamiento, por lo que tendremos la siguiente expresión:

$$\Delta F_{V.D.} = V_{obs} - VL \quad (3.5.2)$$

Donde $V.D.$ es la Variación diurna, V_{obs} , es el valor observado y VL es la diferencia entre el valor de la base y la tendencia lineal

Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF)

El Campo Geomagnético Internacional de Referencia (por sus siglas en inglés, IGRF), es la representación matemática del campo geomagnético (campo principal terrestre) y se determina por un acuerdo internacional a través de la Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía (IAGA). Cada modelo consiste en un conjunto de coeficientes armónicos esféricos denominados coeficientes de Gauss, g_n^m y h_n^m , los cuales se utilizan en una serie truncada de la expansión en armónicos esféricos de la función potencial geomagnética para fuentes de origen interno:

$$V = a \sum_{n=1}^N \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\phi + h_n^m \sin m\phi) P_n^m(\theta) \quad (3.5.3)$$

Donde $a = 6371.2$ km, que es el radio de la Tierra, y r, ϕ, θ son coordenadas esféricas geocéntricas. El grado máximo es $N=10$ ya que representan el campo producido por el núcleo de la Tierra.

El IGRF se actualiza cada cinco años debido a que el campo geomagnético cambia con el tiempo, por esto cada coeficiente de Gauss tiene un término que es la derivada y predice el campo, suponiendo que los coeficientes cambian linealmente con el tiempo, como esta predicción no es exacta, la IAGA adopta modelos pasados usando nuevos datos, a los que se les llama DGRF, por lo que

se convierte en el registro oficial de cómo se comportó el campo en épocas pasadas (Blakely, 1996).

3.6. Postprocesado de datos: realce y filtraje

3.6.1. Coseno direccional

Es un filtro utilizado en prospección magnética, el cual sirve para quitar las características direccionales, esto es, elimina la tendencia que se genera en los datos durante la toma de los mismos. Quita la marca de adquisición al diseñar una malla con direcciones preferenciales. La función coseno hace que el filtro sea suave, de esta forma los efectos direccionales no son un problema. El primer rechazo puede ser reducido o ampliado estableciendo el gado de la función coseno, de esta forma las características direccionales altas pueden ser aisladas (GEOSOFT, 2007).

Este filtro también sirve para quitar la ondulación en datos magnéticos pobremente nivelados.

Se define como:

$$L(\theta) = \left| \cos^n \left(\alpha - \theta + \frac{\pi}{2} \right) \right| \text{ a descartar la dirección } \alpha \quad (3.6.1.1)$$

$$L(\theta) = 1 - \left| \cos^n \left(\alpha - \theta + \frac{\pi}{2} \right) \right| \text{ a aprobar la dirección } \alpha \quad (3.6.1.2)$$

Donde;

α → dirección del filtro en grados (0-360 relativo al Norte)

n → grado de la función coseno.

θ → es la dirección del número de onda

[0/1] Si es 1, se aplica el filtro para pasar a la dirección especificada; si es 0, se aplica el filtro para rechazar la dirección especificada.

3.6.2. Derivadas direccionales

Las derivadas direccionales X y Y son utilizadas para crear imágenes de sombra y es necesaria para modelar algunos algoritmos, tales como la deconvolución de Euler (Geosoft, 2007).

$$L(\mu) = (\mu i)^n \quad (3.6.2.1)$$

Donde

$n \rightarrow$ orden de diferenciación

$\mu \rightarrow$ componente X o Y , según sea el caso, del número de onda

$i \rightarrow i = \sqrt{-1}$ elemento imaginario

La derivada direccional en Z o derivada vertical se aplica comúnmente en los datos a los datos del campo magnético total para realzar las características de las fuentes geológicas más someras. Al igual que con otros filtros que aumentan o mejoran los componentes de número de onda altos del espectro, que con mayor frecuencia también se aplican filtros pasa baja para eliminar el ruido de los números de onda altos.

$$L(r) = r^n \quad (3.6.2.2)$$

Donde

$n \rightarrow$ orden de diferenciación

$r \rightarrow$ número de onda (radianes/unidades) $r = 2\pi k$, donde k esta en ciclo/unidad

3.6.3. Reducción al Polo

Es un procesamiento que se utiliza para remover el efecto de distorsión de la variabilidad de la inclinación y declinación del vector de magnetización a los datos de la anomalía magnética. Es decir, convierte los datos de campo magnético a la forma en que los datos se verían si la magnetización fuera vertical.

La expresión para el operador de reducción al polo, $G_{RTP}(k)$, en un punto $k = (k_x, k_y)$ en 2D en el dominio del número de onda está dado por:

$$G_{RTP}(k) = \frac{|k|^2}{(g \cdot f)(g \cdot m)} \quad (3.6.3.1)$$

donde

$g = (ik_x, ik_y, |k|)$ es el vector gradiente del complejo en el dominio del número de onda en 2D.

$f = (f_x, f_y, f_z)$ es el vector unitario en término de los cosenos directores para el campo geomagnético local.

$m = (m_x, m_y, m_z)$ es el vector unitario en términos de los cosenos directores para el vector de magnetización.

Al aplicar los operadores de la transformada de Hilbert $H_x(k), H_y(k)$ a (k_x, k_y) tenemos:

$$H_x(k) = \frac{ik_x}{|k|}; \quad H_y(k) = \frac{ik_y}{|k|} \quad (3.6.3.2)$$

$$H = \frac{g}{|k|} = (H_x, H_y, 1) \quad (3.6.3.3)$$

Entonces

$$G_{RTP}(k) = \frac{1}{(H \cdot f)(H \cdot m)} \quad (3.6.3.4)$$

Si sustituimos $\theta_f = H \cdot f$; $\theta_m = H \cdot m$ en la ecuación 3.3.3.4, tenemos:

$$G_{RTP}(k) = \frac{1}{\theta_f \theta_m} \quad (3.6.3.5)$$

Las anomalías de gravedad positiva tienden a situarse sobre las concentraciones de masa, sin embargo no es necesariamente cierto para el caso de las anomalías magnéticas, cuando la magnetización y el campo ambiente no están en dirección

vertical. A no ser que \hat{m} y \hat{f} (\hat{m} y \hat{f} son vectores unitarios en la dirección de la magnetización y en la dirección del campo ambiente) sean verticales, θ_m y θ_f (son funciones que contribuyen a la fase de la anomalía, y contienen toda la información respecto a la dirección de magnetización y del componente que se está midiendo) contribuirá a la fase de la anomalía magnética, que puede desplazar lateralmente la anomalía, distorsionar su forma e incluso cambiar su signo (Figura 7) (Blakely, 1996).

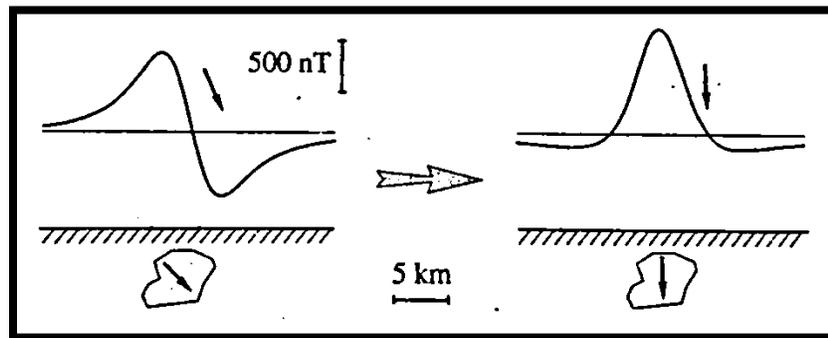


Figura 7. Anomalía magnética antes y después de ser reducida al polo (Tomado de Blakely, 1996)

La Reducción al Polo es una técnica de procesamiento de datos que recalcula los datos de intensidad magnética total como si el campo magnético inducido tuviera una inclinación de 90° es decir, las anomalías toman aproximadamente la misma forma que sería observada en el polo magnético (Geosoft, 2007).

3.6.4. Señal Analítica

La señal analítica se define como una combinación del gradiente horizontal y vertical de la anomalía magnética. La señal analítica tiene la forma de las fuentes que producen los cuerpos pero no de la dirección de magnetización (Blakely, 1996).

La señal analítica puede ser útil para localizar los bordes de los cuerpos con magnetización remanente y en áreas de latitud magnética bajas (Geosoft, 2005; Macleod et al, 1994).

La señal analítica de un perfil se define como:

$$as = \sqrt{dz * dz + dx * dx} = \sqrt{dz^2 + dx^2} \quad (3.6.4.1)$$

Donde

dz = a la derivada vertical

dx = a la derivada horizontal

La derivada vertical se calcula usando la FFT (Transformada rápida de Fourier). La derivada horizontal se calcula mediante la aplicación de un filtro de convolución en el dominio del espacio. La señal analítica se evalúa a partir de estos dos conjuntos de datos.

3.6.5. Campo Regional y Campo Residual

Las anomalías regionales son desviaciones localizadas en el campo magnético terrestre respecto de las distribuciones que había en el supuesto de que el campo magnético terrestre fuese originado por un solo imán orientado. Estas anomalías tienen máximos de 10,000 nT, es decir, la tercera parte de la intensidad en el Ecuador y pueden afectar a zonas de dos o tres millones de km^2 (Dobrin, 1976).

La anomalía regional es el promedio suavizado de una anomalía y representa el efecto de cuerpos profundos; lo cual se puede ver como la atracción producida por un modelo e incluye las estructuras por debajo de cierta profundidad.

Mientras que el magnetismo residual es un fenómeno en el que los dipolos magnéticos de una sustancia se encuentran orientados en un grado determinado. Las anomalías residuales o también llamadas locales, son anomalías superficiales. Este tipo de anomalías son debidas a las rocas magnetizadas de la corteza terrestre.

Para obtener el regional y residual se utiliza el filtro Gaussiano, el cual es un filtro suave usado con frecuencia para aplicar filtros basa-bajas o filtros pasa-altas, dependiendo de lo que se quiera obtener. Se define como:

$$L(K) = 1 - e^{\frac{-k^2}{2k_0^2}} \quad (3.6.5.1)$$

Donde

$k_0 \rightarrow$ a la desviación estándar de la función gaussiana en ciclos/unidad de tierra.

Capítulo IV. Adquisición y Procesamiento de los datos

4.1. Logística de campo

La adquisición de los datos utilizados en esta tesis fue hecha los días 8, 9 y 10 del mes de Enero del 2015, por alumnos de la carrera de Ingeniería Geofísica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, durante la realización de sus prácticas profesionales, y con el apoyo de las autoridades del Museo Arqueológico de Plazuelas.

Se tomó como base la información proporcionada por el Arqueólogo Carlos Castañeda sobre la zona, para determinar los lugares con mayor potencial para prospectar.

El levantamiento de las mallas fue diseñado según las dimensiones de las zonas de interés propuestas, tomándose a una alta densidad para así obtener una alta resolución, teniendo mediciones a cada metro tanto en x como en y , además de utilizar un magnetómetro de alta precisión como lo es el G-858 de Geometrics de bombeo óptico de vapor de cesio, en su modalidad de gradiómetro en dirección vertical, dando al sensor superior una altura de 1.5 metros y al sensor inferior una altura de 50 centímetros, ambos sobre el nivel del piso (Figura 8).



Figura 8. Magnetómetro G-858 Geometrics, durante una de las mediciones

En total fueron levantados cuatro sitios a los que denominamos Juego de Pelota, Terraza 1, Terraza 3 y Terraza 4, de los que se hablara posteriormente, en estos sitios se diseñaron mallas con líneas orientadas casi en dirección norte-sur.

Se utilizó como base magnética en el área de estudio un magnetómetro GSM-19T Overhauser de Gem Systems, de precesión protónica, el cual estuvo monitoreando el campo magnético a un ciclo de 30 segundos durante todas las jornadas de magnetometría.

4.2. Equipo Geofísico

G-858 MagMapper de Geometrics (Figura 9), este magnetómetro es de alta sensibilidad, tiene la opción de elegir entre una adquisición continua o discreta. La alta frecuencia de muestreo del instrumento en modo continuo permite al operador estudiar un área a un ritmo mucho más rápido.

Características:

- Corrección estándar para errores de precisión, transitorios y corrección diurna del campo magnético.
- Exportación de posicionado y edición de los datos en diferentes formatos (ejemplo: ASCII, X,Y,Z)
- Sistema de asignación de coordenadas en campo
- Alta sensibilidad
- Muestra cinco perfiles de la rejilla con sus respectivas coordenadas y dirección del estudio para una evaluación inmediata.
- Opciones: gradiometría vertical u horizontal, posicionamiento GPS, registro de datos externo y consola de control.
- Consola de registro, conectado a un sensor de cesio y bastón manual con contra peso. En la consola se puede elegir el sistema en que se guardaran las coordenadas de cada medición, ya sea GPS o XYZ.
- Tiene la capacidad de almacenar más de 250,000 lecturas.



Figura 9. Magnetómetro G-858 de Geometrics (Tomado de la página de internet de geometrics).

GSM-19T Overhauser de Gem Systems (Figura 10), de acuerdo con el fabricante, es un magnetómetro de protones de precisión avanzada. Este magnetómetro puede ser utilizado en modo base, cuenta con una gran espacio de almacenamiento para los datos, además de incluir un GPS de alta resolución (0.6 m), lo que ahorra tiempo durante la toma de mediciones.

Las especificaciones de este equipo, son las siguientes:

- Sensibilidad de 0.15 nT @ 1 Hz
- Resolución de 0.01 nT
- Precisión absoluta de +/-0.2 nT
- Rango dinámico: 20.000 a 120.000 nT
- Gradiente de tolerancia: más de 7,000 nT/m
- Intervalos de muestreo: 60+, 5, 4, 3, 2, 1, 0.5 seg
- Temperatura de funcionamiento: -40°C a +50°C



Figura 10. Magnetómetro GSM-19T Overhauser de Gem Systems (Tomado de la página de internet de Gem Systems)

Es utilizado en exploración minera, exploración de petróleo y gas, arqueología, ingeniería y ambiental, educación e investigación, entre otras aplicaciones.

4.3. Adquisición de datos

La adquisición se hizo en las zonas de interés propuestas por el arqueólogo, como se mencionó anteriormente, se realizó un reconocimiento del lugar en busca de una zona alejada de los edificios prehispánicos que pudieran alterar las mediciones para el monitoreo del campo magnético (estación base). Se midieron los lugares a prospectar con una malla regular, una vez hecho esto, se procedió a conectar los magnetómetros, así como asignar los parámetros en cada una de las consolas para poder comenzar con la medición.

El magnetómetro base se colocó en las coordenadas 20°24'14.1" de latitud Norte y 101°49'41" de longitud Oeste, elevación de 1842 msnm. Mientras que el magnetómetro móvil estuvo tomando datos en cada una de las 4 mallas que se realizaron dentro de la zona arqueológica Plazuelas (Figura 11).

Mallas	Coordenadas (UTM)			
Juego de Pelota (JP)	A	204963.60 E 2258696.75 N	B	204978.63 E 2258697.08 N
	C	204968.91 E 2258636 N	D	204983.94 E 2258636.31 N
Terraza 1 (T1)	F	204971.080 E 2258589.30 N	G	204995.93 E 2258592.22 N
	H	204979.84 E 2258533.99 N	I	205004.54 E 2258537.90 N
Terraza 3 (T2)	J	204916.38 E 2258653.75 N	K	204957.12 E 2258658.46 N
	L	204919.86 E 2258628.99 N	M	204960.60 E 2258633.71 N
Terraza 4 (T3)	N	204961.77 E 2258826.84 N	O	205019.35 E 2258833.93 N
	P	204963.72 E 2258812.98 N	Q	205020.45 E 2258818.93 N

Tabla 2. Coordenadas de las esquinas de cada una de las mallas.

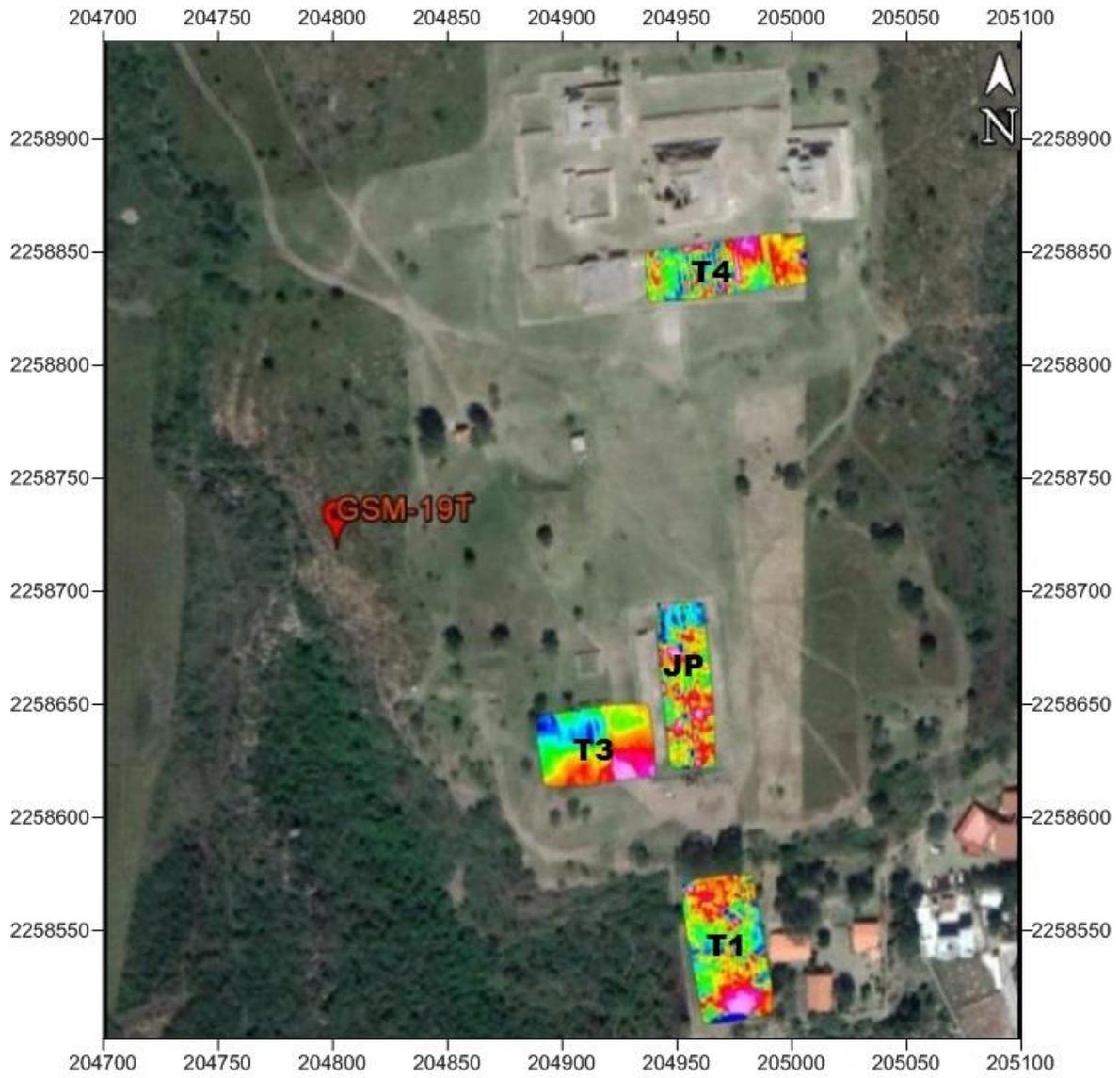


Figura 11. Mallas magnéticas medidas en la zona arqueológica de Plazuelas

La primera malla se realizó en el Juego de Pelota (JP), el día 8 de Enero de 2015, teniendo un área de 15 [m] de ancho por 62 [m] de largo, en total se obtuvieron 16 perfiles con 62 [m] de longitud, dirección Norte-Sur. Las mediciones se hicieron con un espaciamiento de 1 [m] entre líneas (Figura 12).



Figura 12. Mediciones en el Juego de Pelota

La segunda malla fue hecha en la zona denominada Terraza 1 (T1), se encuentra al sur del Juego de Pelota, las mediciones se tomaron el día 9 de Enero de 2015. La dimensión del área de estudio es de 25 [m] de ancho por 55 [m] de largo, en total para esta malla se obtuvieron 26 perfiles de 55 [m] de longitud en dirección Norte-Sur, dando un espaciamiento entre cada medición de 1 [m] (Figura 13).



Figura 13. Zona de estudio Terraza 1.

En cuanto a la tercera malla se realizó al este del Juego de Pelota, denominada Terraza 3 (T3), las mediciones se realizaron en dos partes, la primera se efectuó el día 9 de enero de 2015 y la segunda el día 10 de enero del mismo año. El área a prospectar contó con una dimensión de 40 [m] de ancho por 24 [m] de largo, en total se obtuvieron 41 perfiles de 24 [m] de longitud con dirección Norte-Sur, al igual que en las anteriores, el espaciamiento entre cada medición fue de 1 [m] (Figura14).



Figura 14. Área de la Terraza 3

La cuarta malla esta ubicada al norte del Juego de Pelota junto al edificio conocido como Casas Tapadas, ha esta última malla se le denominará Terraza 4 (T4), los datos fueron tomados el día 10 de Enero del 2015, teniendo una dimensión de 58 [m] de ancho por 17 [m] de largo, en total se obtuvieron 59 perfiles de 19 [m] de longitud con dirección Norte-sur y las mediciones se realizaron cada 1 [m] (Figura15).



Figura 15. Terraza 4 enmarcada con un rectángulo color amarillo (Tomada de Google Earth).

4.4. Procesamiento de la información

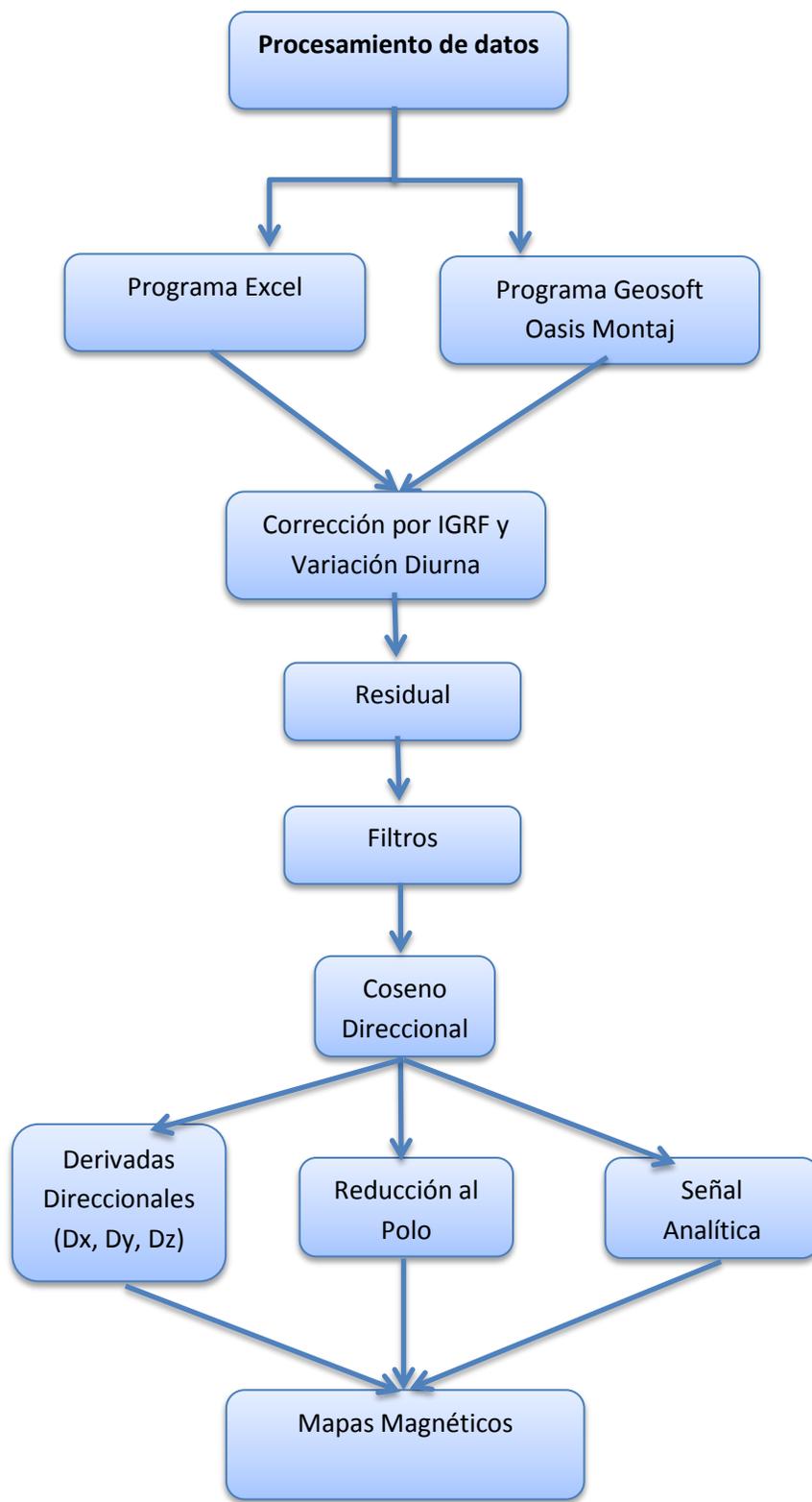


Diagrama 1. Metodología utilizada para el procesado de los datos

El procesamiento se realizó tanto en Excel como en el programa Geosoft Oasis Montaj, versión 8.5 (Proyecto “CeMIE-Geo P-01). El procesamiento en Excel consistió en lo siguiente: con los datos adquiridos en la base se realizó la respectiva gráfica, se obtuvo la línea de tendencia lineal para la misma y su correspondiente ecuación, la cual tiene una forma $y = mt + b$, esta ecuación se puede observar en la parte superior de la gráfica mostrada en la Tabla 3.

Sustituyendo los valores correspondientes al tiempo $t[s]$ en la ecuación antes mencionada, obtenemos el Valor Lineal (VL) de cada uno de los datos obtenidos en la base.

Posteriormente, haciendo la resta del campo magnético (field) que adquirimos en la estación base menos el Valor Lineal, dio como resultado el valor de la corrección por Variación Diurna (V.D.), conocido también como ΔF (DELTA F).

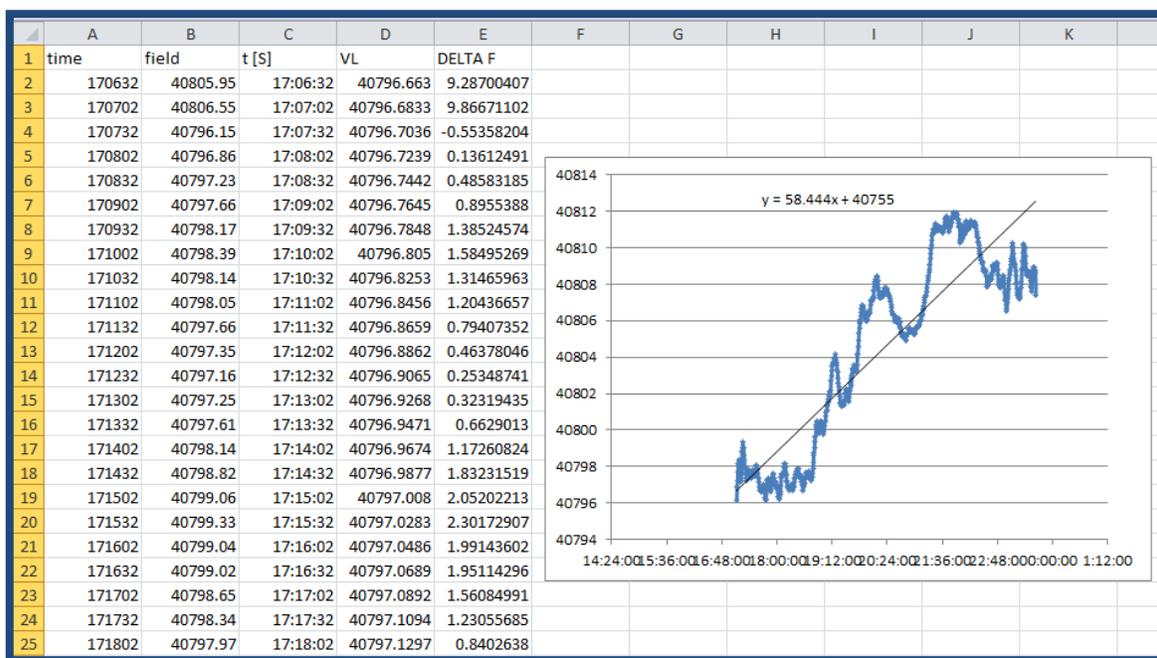


Tabla 3. Datos de la base del día 8 de enero del 2015

Para obtener las anomalías, debemos quitar la influencia de la Variación Diurna y del IGRF. Por lo cual se relacionaron los valores de DELTA F, que calculamos

anteriormente, con los valores con respecto al tiempo en que se tomó la lectura del magnetómetro móvil.

Con ayuda de la página NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) se calculó el valor del IGRF para los días en que se realizaron las mediciones.

Finalmente, los valores de las anomalías corregidas por Variación Diurna e IGRF se calcularon mediante la fórmula:

$$Anomalía = F_{obs} - \Delta F_{V.D.} - F_{IGRF}$$

Donde

F_{obs} , son los datos obtenidos en el levantamiento con el magnetómetro móvil, es decir TOP_RDG y BOTTOM_RD en la Tabla 4.

$\Delta F_{V.D.}$, son los valores de DELTA F en la Tabla 4.

F_{IGRF} , es el valor del IGRF obtenido en la página del NOAA.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	X	Y	TOP_RDG	BOTTOM_RD	VRT_GRAD	TIME	DELTA F	IGRF	ANO_MAG_TOP	ANOM_BOTT
2	204983.94	2258636.31	40868.134	40847.285	20.849	22:31:20	-1.02318898	41027.5	-158.343	-179.192
3	204983.86	2258637.3	40870.061	40852.992	17.069	22:30:58	-1.12289593	41027.5	-156.316	-173.385
4	204983.77	2258638.3	40874.569	40858.527	16.042	22:30:47	-1.12289593	41027.5	-151.808	-167.850
5	204983.68	2258639.3	40873.779	40855.598	18.181	22:30:40	-1.12289593	41027.5	-152.598	-170.779
6	204983.59	2258640.29	40873.237	40871.45	1.787	22:30:32	-1.12289593	41027.5	-153.140	-154.927
7	204983.51	2258641.29	40873.114	40862.865	10.249	22:30:24	-0.99260287	41027.5	-153.393	-163.642
8	204983.42	2258642.28	40873.519	40861.738	11.781	22:30:16	-0.99260287	41027.5	-152.988	-164.769
9	204983.33	2258643.28	40873.078	40871.93	1.148	22:30:09	-0.99260287	41027.5	-153.429	-154.577
10	204983.25	2258644.28	40872.276	40857.268	15.008	22:30:02	-0.99260287	41027.5	-154.231	-169.239
11	204983.16	2258645.27	40872.109	40854.74	17.369	22:29:54	-1.01230981	41027.5	-154.379	-171.748

Tabla 4. Parte de las lecturas obtenidas con el magnetómetro móvil, así como las correcciones por Variación Diurna e IGRF y los valores de las anomalías sin estas influencias.

El procesado de los datos se realizó con el programa Geosoft Oasis Montaj, versión 8.5, se desarrolló de la siguiente forma: con los datos obtenidos en el procesado de Excel se realizó una nueva tabla con los datos de la base, en la que se incluyeron las siguientes columnas: Tiempo, nT (anomalía registrada en la

base), sq (factor de calidad), time (tiempo), TL (valor de la tendencia lineal) y Delta_F (Variación Diurna).

Al igual que para la base, también se hace un archivo pero ahora con los datos registrados con el magnetómetro móvil y ambos archivos fueron importados a Geosoft.

Dentro del programa Geosoft se procedió a trabajar con la tabla de la Base, creando dos columnas a las que se le dio el nombre de “FILTER nT” y “DELTA_F_FILTER”, en ellas se colocaron los resultados de aplicar un filtro Pasa Bajas de 30 fiduciales (muestras) a los datos magnéticos recolectados en las base y al DELTA_F respectivamente, como se puede observar en la Tabla 5.

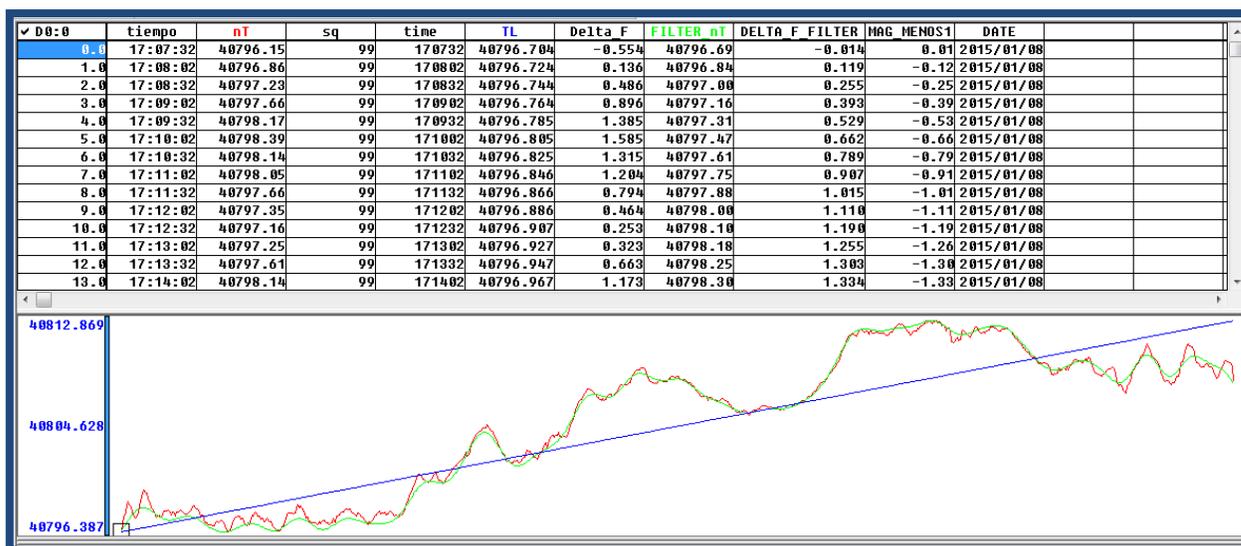


Tabla 5. Datos obtenidos en el Juego de Pelota y gráfica de los datos recabados en el sitio en color rojo , su respectiva línea de tendencia lineal en color azul y los datos magnéticos a los que ya se les aplicó un filtro Pasa Bajas en color verde.

Para la tabla formada con los datos del levantamiento, se procedió a realizar las correcciones por Variación Diurna e IGRF, tanto para los datos obtenidos con el sensor de arriba como para los obtenidos con el sensor inferior (Tabla 6A y B del Anexo). En la figura 16 se puede observar la gráfica generada con los datos del sensor inferior, en color rojo los datos en crudo (BOT_nT) y en color verde los datos corregidos por Variación Diurna e IGRF (ANO_MAG_BOT).

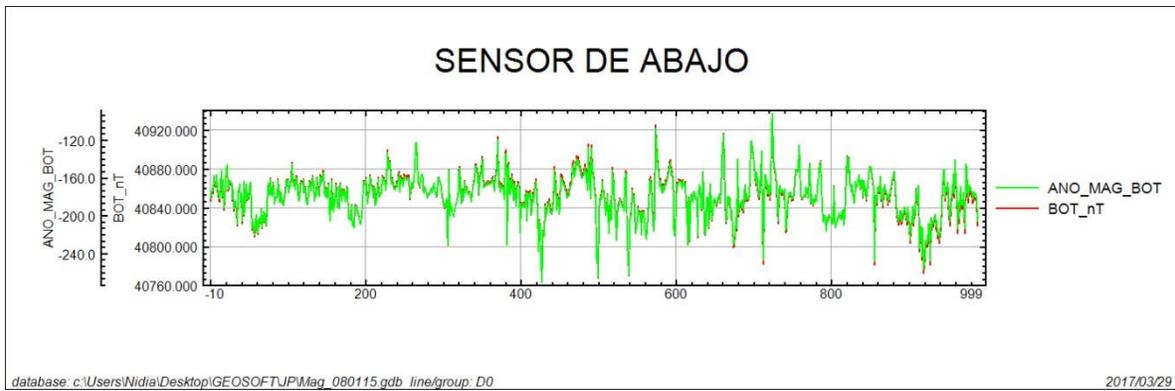


Figura 16. Gráfica de los datos obtenidos por sensor inferior en el Juego de Pelota.

En la figura 17 se muestran en color verde (ANO]_BOT_TOP) los datos obtenidos con el sensor superior y en color rojo (TOP_Nt) los datos corregidos por Variación Diurna.



Figura 17. Gráfica de los datos obtenidos por el sensor de superior en el Juego de Pelota

Posteriormente se aplicaron algunos filtros, el primero, el coseno direccional para eliminar la huella de adquisición. Como se puede ver en la figura 18 los datos toman la forma del caminamiento, por lo que se aplica un coseno direccional para eliminar esta huella (Figura 19).

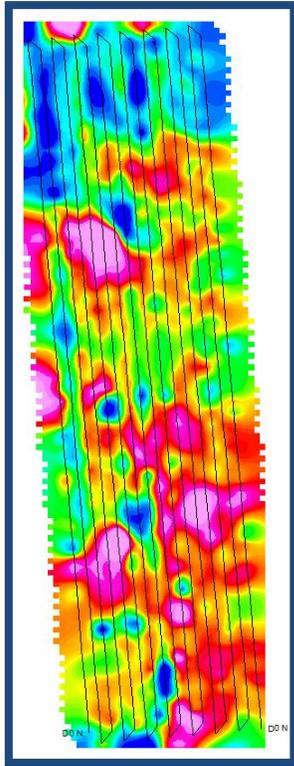


Figura 18. Levantamiento magnético en el Juego de Pelota.

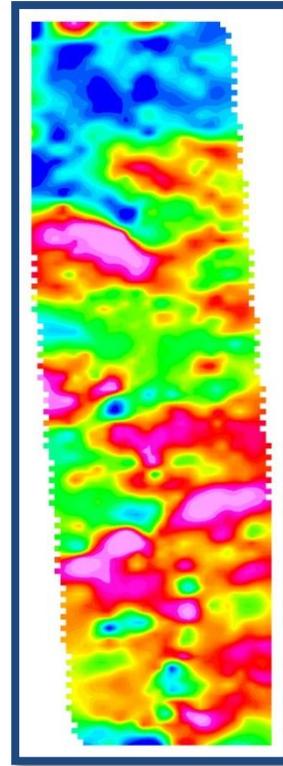


Figura 19. Mismo levantamiento que la Figura 16, sin la huella de adquisición.

También se aplicaron las derivadas direccionales en X, Y y Z para cada una de las zonas de estudio, Reducción al Polo, para pasar de una anomalía dipolar a una monopolar y para delimitar las fuentes se aplicó la señal analítica.

Se realizaron otras pruebas, por ejemplo, a partir de la Reducción al Polo, se obtuvieron las derivadas direccionales en X, Y y Z y la Señal Analítica, con lo cual no hubo un gran cambio en las imágenes, por lo que no se anexan a este trabajo.

Como mejor opción se obtuvo el regional (Figura 20) y Residual de cada una de las Zonas para los dos sensores, con el fin de discriminar la profundidad de las fuentes en todos los procesos y poder diferenciar las estructuras antropogénicas a las geológicas. Aplicando al Residual las derivadas direccionales en X, Y y Z, Reducción al Polo y la Señal Analítica.

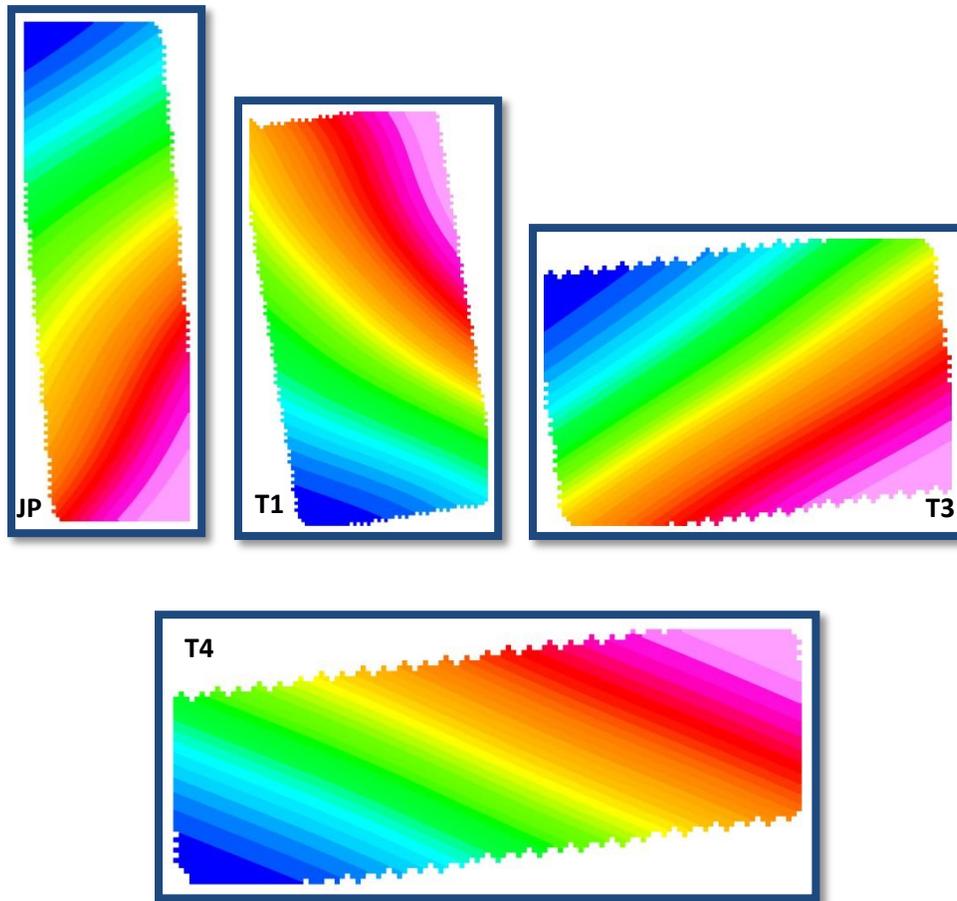


Figura 20. Regional del Juego de Pelota (JP), Terraza 1 (T1),
Terraza 3 (T3) y Terraza 4 (T4) del sensor inferior

Se realizó una última prueba, la cual consistió en restar los datos del sensor de superior al sensor inferior, con lo cual se obtuvieron imágenes de las anomalías magnéticas sin la influencia que causaban las anomalías de mayor tamaño observadas con el sensor de superior, lo que nos ayudó a tener una mejor imagen y por tanto una mejor visualización de posibles objetos o estructuras de interés para este trabajo.

Debido a que las anomalías que nos interesan son las someras, en el siguiente capítulo sólo se mostrarán las imágenes correspondientes al sensor inferior (BOTTOM) y en algunos casos, debido a su importancia, alguna imagen correspondiente al sensor superior (TOP).

Capítulo V. Resultados e Interpretación

Como se sabe, para obtener la profundidad de una anomalía magnética, existen varios métodos entre los que se encuentran, el análisis en frecuencia con el espectro radial de potencias o como la deconvolución de Euler. Debido a la geología en la zona de estudio, donde se tiene un escaso suelo sobreyaciendo las formaciones rocosas y el resultado de dichos métodos nos proporcionarían profundidades en donde las anomalías son de origen geológico.

Basándonos en lo anterior, las anomalías de interés para este trabajo, como lo son las anomalías de origen antropogénico, no presentarán más de 2 metros de profundidad, posterior a estos metros solo es posible encontrar anomalías de origen geológico como ya se había mencionado.

5.1. Juego de Pelota (JP)

La figura 21 muestra el residual del sensor superior, en ella podemos observar que existen cuatro anomalías de gran tamaño (A1, A2, A3 y A4) presentando máximos de 17.1 nT. Ya que estas anomalías se observan en todas las imágenes correspondientes a éste sensor podemos decir que se trata de estructuras que se encuentran a más de 2 metros de profundidad y que por tanto muy probablemente no son de interés arqueológico. Estas estructuras continúan observándose en la mayoría de las imágenes correspondientes al Juego de Pelota, especialmente en las imágenes del sensor de superior.

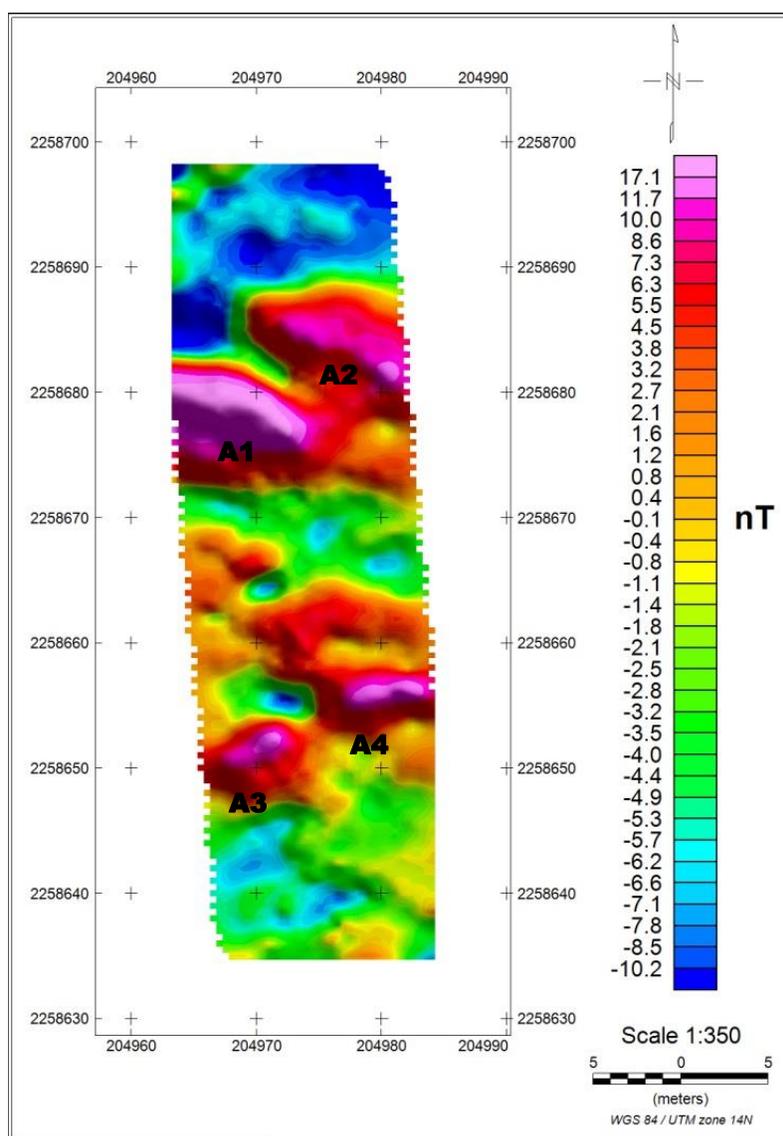


Figura 21. Campo residual del Juego de Pelota, sensor superior.

La Figura 22 corresponde al Residual del sensor inferior, se pueden ver las cuatro anomalías mencionadas en el resultado del residual del sensor superior, con la diferencia de que presentan un menor tamaño y sus bordes son menos definidos.

En esta imagen se observa que las anomalías presentan máximos de 27.0 nT en color rosa claro y mínimos magnéticos de -23.4 nT en color azul, también se puede ver que el conjunto de dipolos que se encuentran entre 204970 y 204980 en el eje X y 2258635 y 2258660 en el eje Y, presentan una tendencia semicircular (enmarcada con líneas punteadas color negro) y los cuales no es posible visualizar en los resultados del sensor superior.

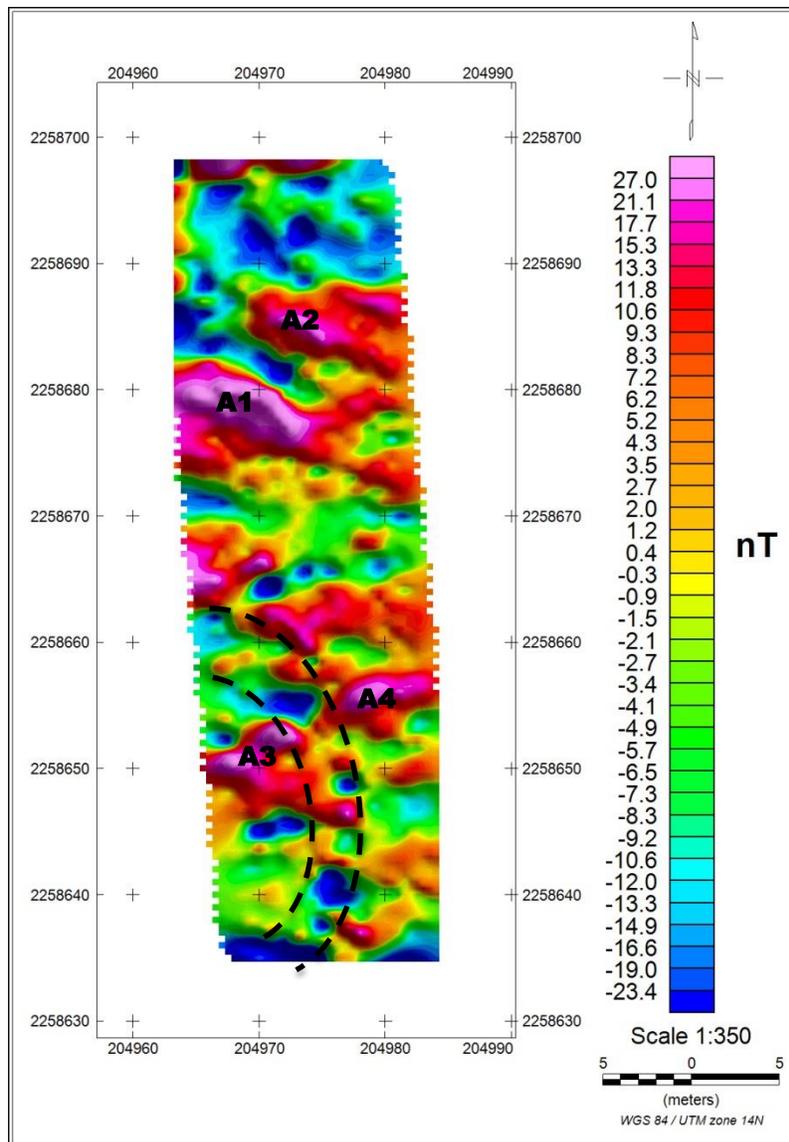


Figura 22. Campo residual del sensor inferior del JP

La figura 23 muestran el campo residual al que se le aplicó una reducción al polo, generada con los datos del sensor inferior, en ella se observa mejor la tendencia semicircular que forman el conjunto de dipolos antes mencionados, enmarcadas con líneas punteadas de color negro, y teniendo una longitud de aproximadamente 30 metros. En cuanto a las anomalías, éstas presentan máximos de 31.7 nT y mínimos magnéticos de -28.3 nT.

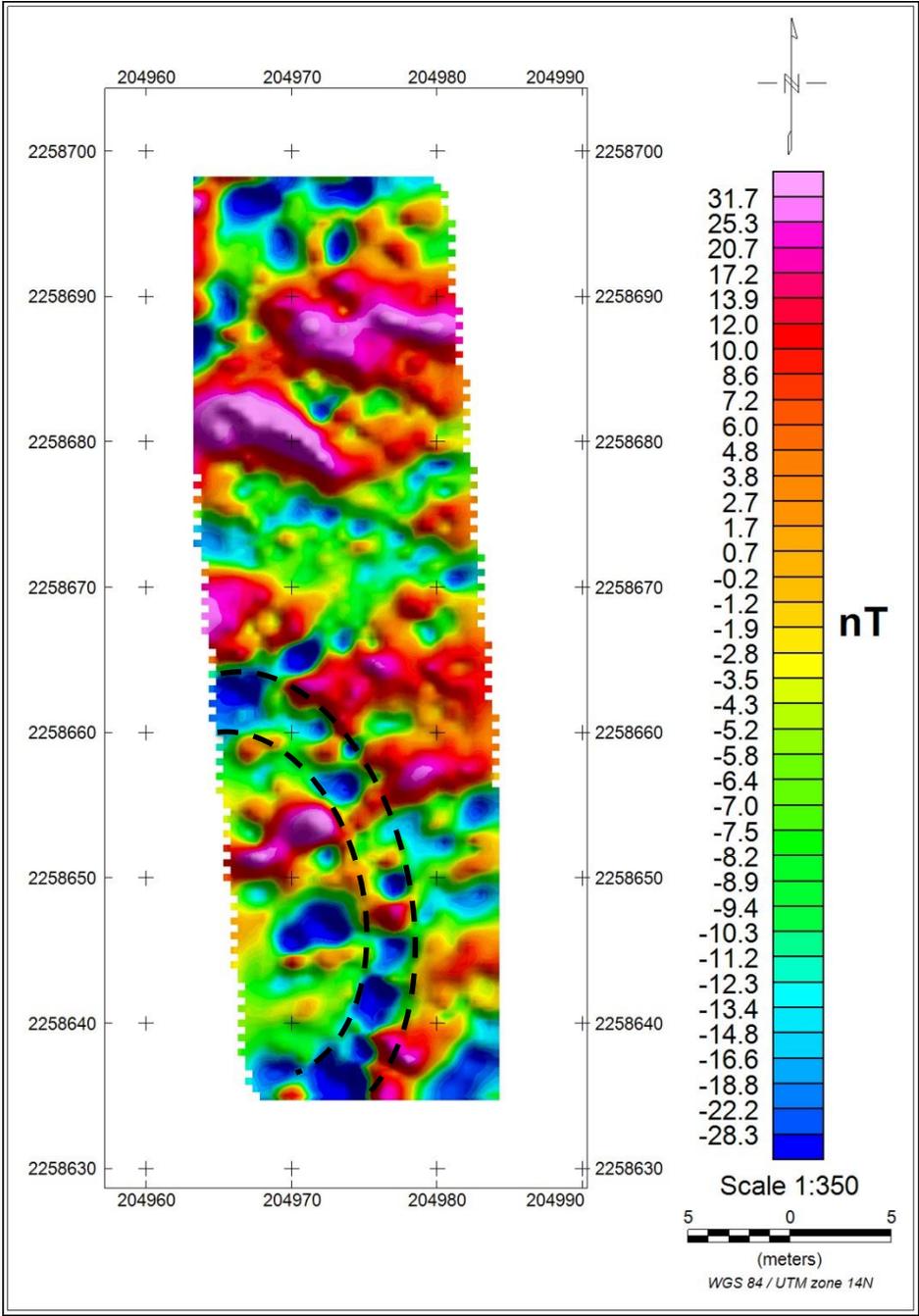


Figura 23. Reducción al polo del JP

La figura 24, muestra el campo residual al que se le aplicó una señal analítica, en ella se puede observar que las anomalías de mayor tamaño se muestran mejor delineadas, así como las que en conjunto forman un semicírculo. Se observa que los máximos magnéticos son de 42.4 nT y los mínimos de 2.7 nT. En esta imagen también se puede ver un mayor número de anomalías que en las imágenes anteriores.

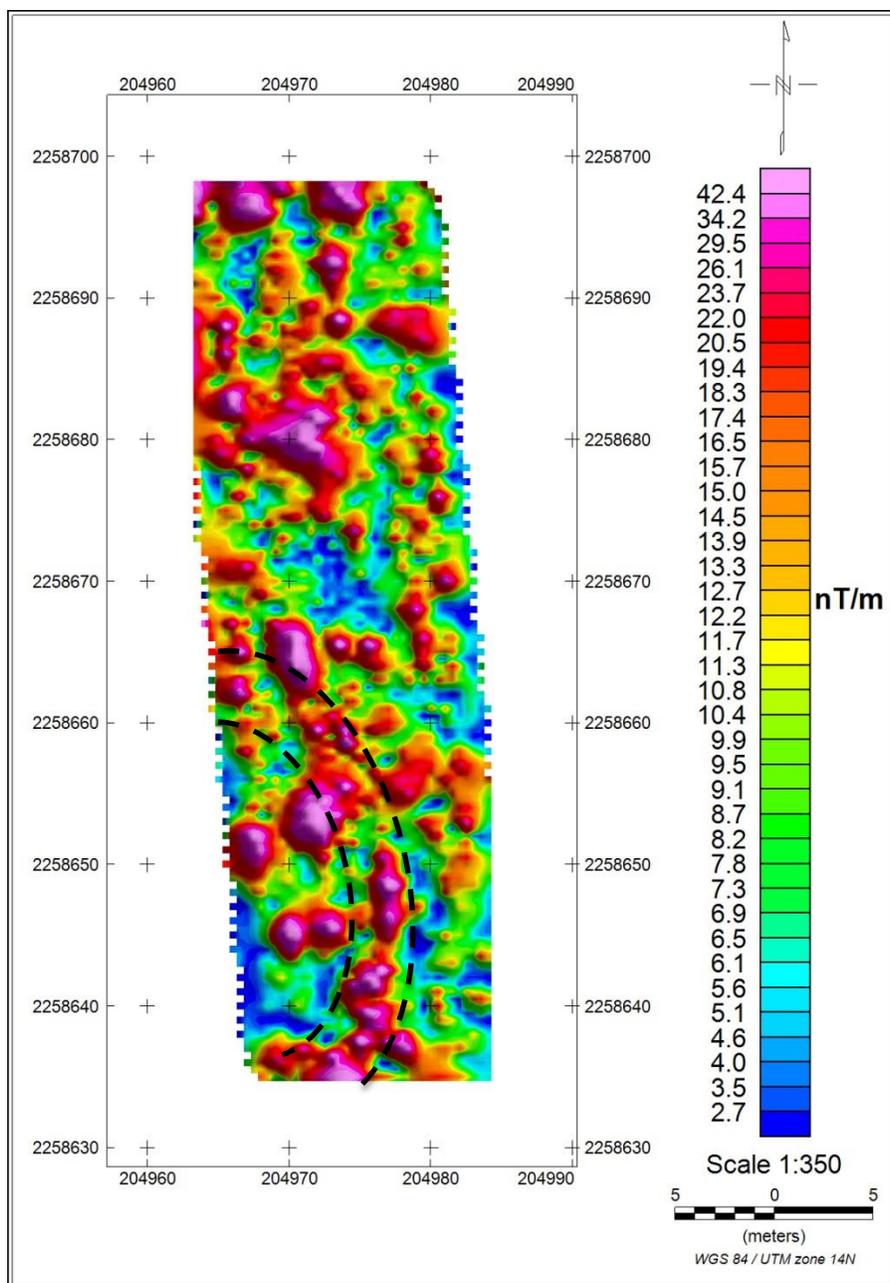


Figura 24. Señal analítica del sensor inferior en JP.

A continuación se presenta el Gradiente Vertical del Juego de Pelota (Figura 25), al que le ha sido aplicado un coseno director, para eliminar la huella de adquisición, en ella se puede distinguir parte de la tendencia semicircular que forman el conjunto de anomalías mencionadas en las imágenes anteriores, enmarcadas por líneas de color negro para una mejor visualización. También se observan un mayor número de anomalías, los máximos magnéticos presentes en esta imagen tienen un orden de 23.3 nT y los mínimos son de -12.3 nT.

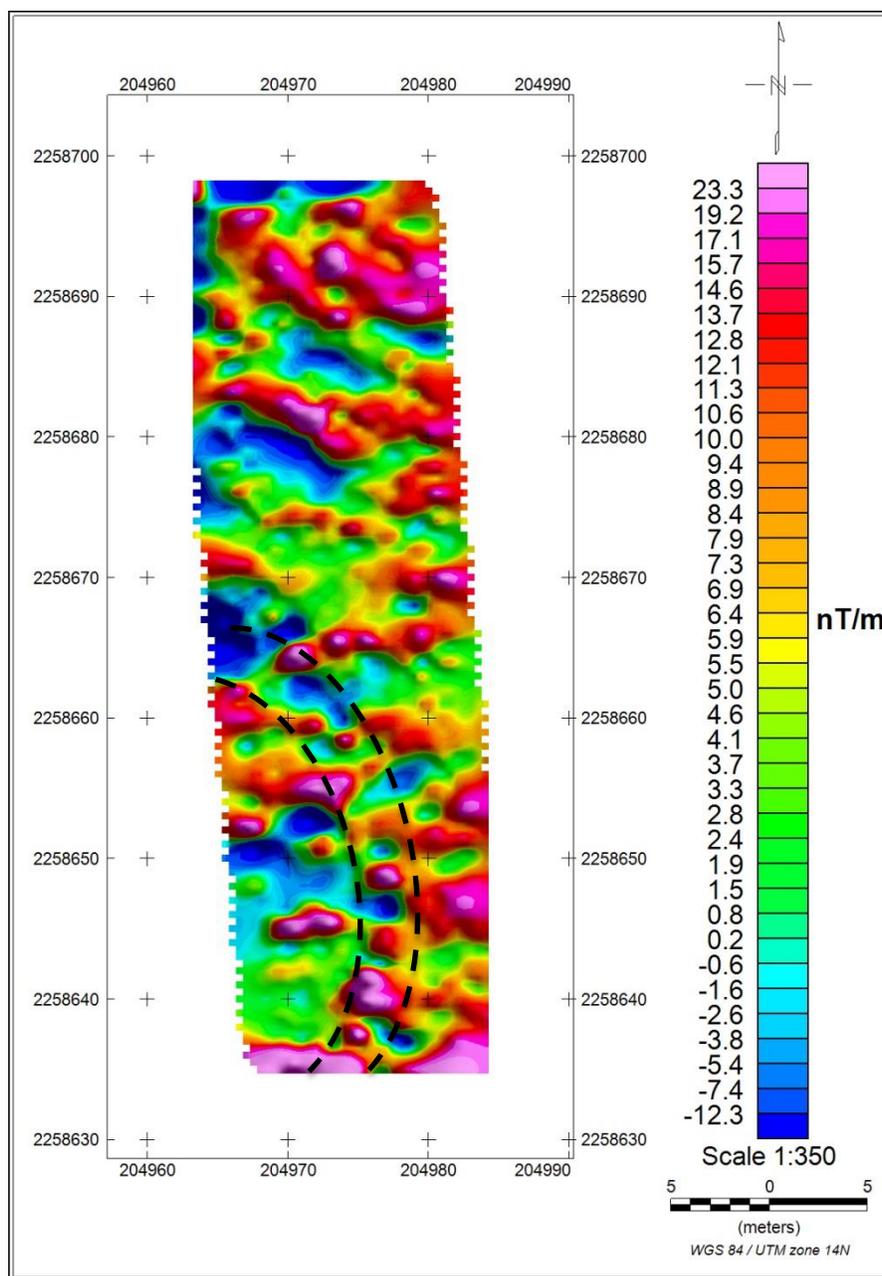


Figura 25. Gradiente vertical del JP

Para disminuir la influencia de las anomalías A1, A2, A3 y A4, que se pueden observar en las imágenes del sensor de arriba, se hizo una resta de los datos correspondiente al sensor inferior menos los datos correspondiente al sensor superior, lo que dio como resultado, las siguientes imágenes:

La figura 26 muestra el resultado de la resta de la reducción al polo del sensor inferior menos la reducción al polo del sensor superior, en ella se observa que las anomalías de mayor tamaño han disminuido y por lo tanto su influencia también, lo que da origen a la visualización de mayor número de anomalías de menor tamaño y a que el conjunto de anomalías que forman un semicírculo sean más visibles, así como su delimitación.

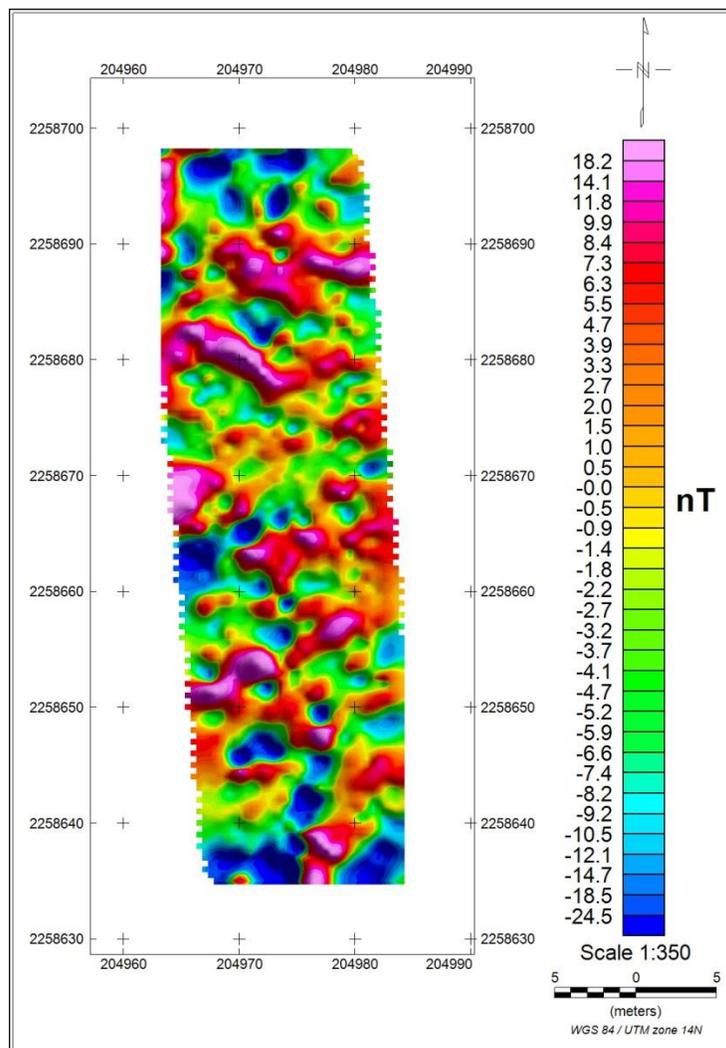


Figura 26. Resta de la reducción al polo del sensor inferior menos el sensor superior del JP

En la figura 27 se muestra la resta del sensor inferior menos la del sensor superior, a los que anteriormente ya se les había aplicado la señal analítica, en esta imagen se puede observar que las anomalías presentes están mejor delimitadas, por lo que el conjunto de anomalías que forman un semicírculo es más visible entre 204970 y 204980 en el eje X y 2258635 y 2258650 en el eje Y, presentando máximos magnéticos de 35.8 nT y dipolos con -0.2 nT.

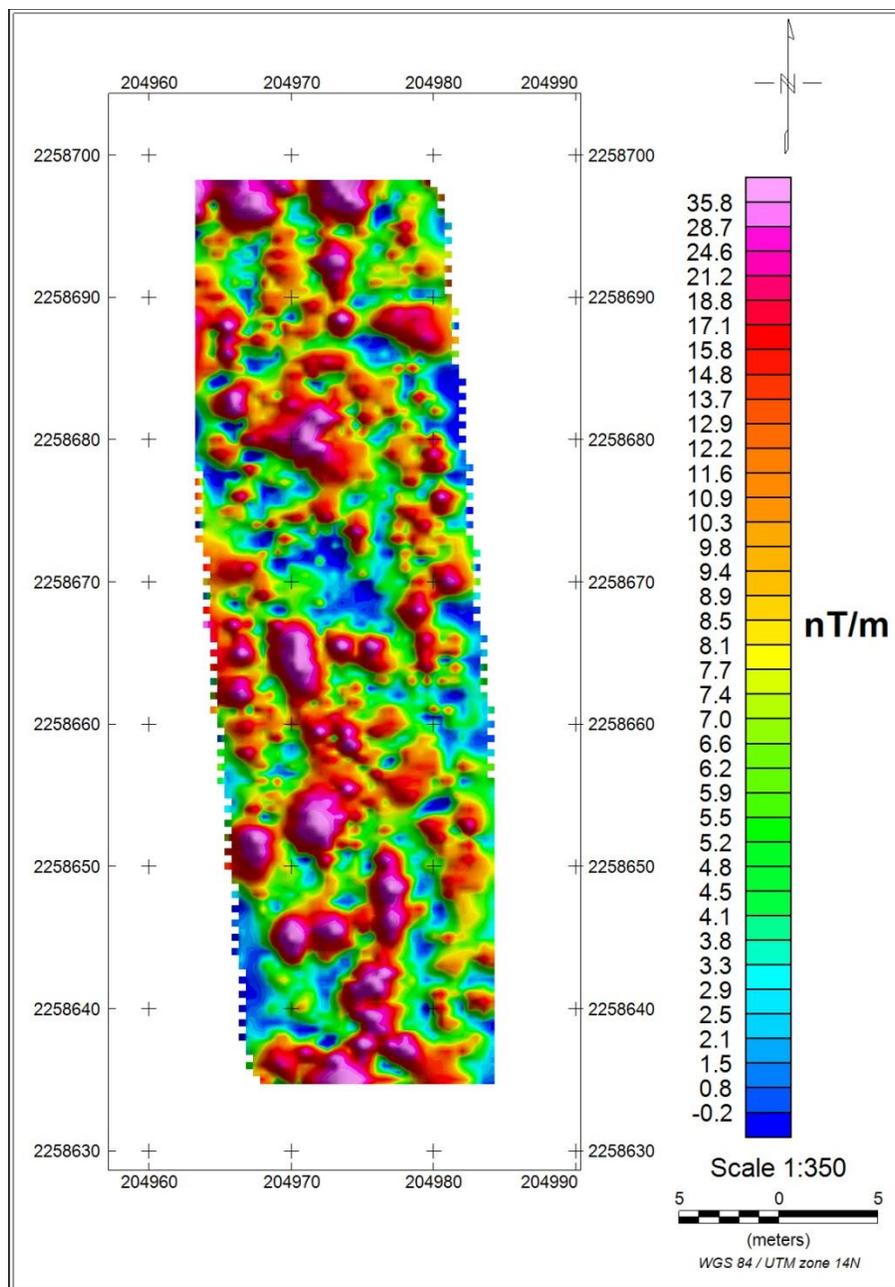


Figura 27. Señal analítica del sensor inferior menos sensor superior del JP.

5.2 Terraza 1 (T1)

Como se puede observar en la figura 28, perteneciente al residual del sensor superior, existe una anomalía de gran tamaño (B1), de aproximadamente 30 m de ancho y 10 m de largo. Debido a que esta anomalía se observa en este sensor podemos decir que se encuentra a más de 2 metros de profundidad, por lo que probablemente no sea de interés arqueológico. Al igual que en la zona anterior, en ésta solo se anexan las imágenes del sensor inferior, a excepción de ésta. Los máximos magnéticos llegan a 49.1 nT mientras que los mínimos corresponde a -27.9 nT.

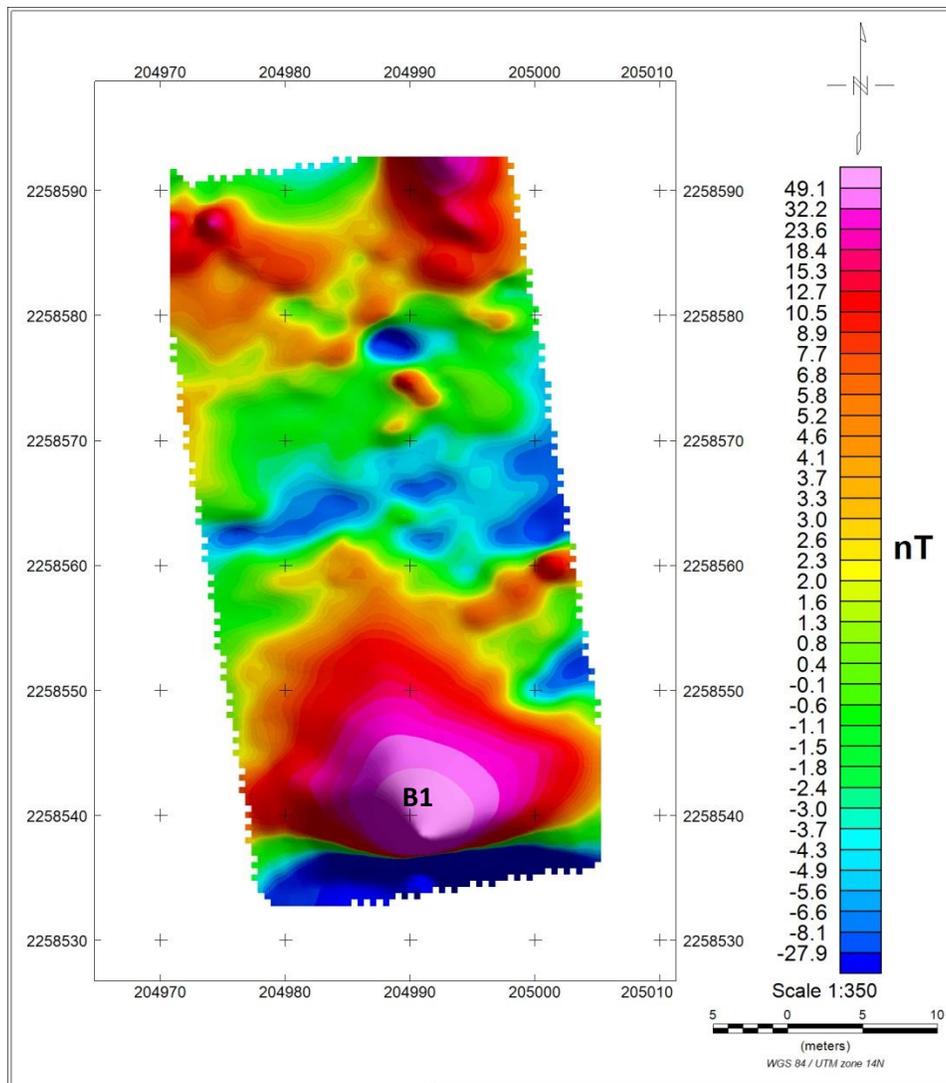


Figura 27. Campo residual del sensor superior de la T1

La figura 29, muestra el residual obtenido con el sensor inferior (BOTTOM), en ella se observa la anomalía B1 antes mencionada pero con menor tamaño, el máximo magnético es de 58 nT, mientras que el mínimo es de 28.1 nT, aparte de esto, se pueden observar otras pequeñas anomalías que no se encuentran bien delimitadas, sin embargo, si se puede observar una tendencia lineal importante, la cual tiene una longitud de un poco menos de 30 metros de largo, encontrándose enmarcada con dos líneas punteadas color negro para una mejor localización.

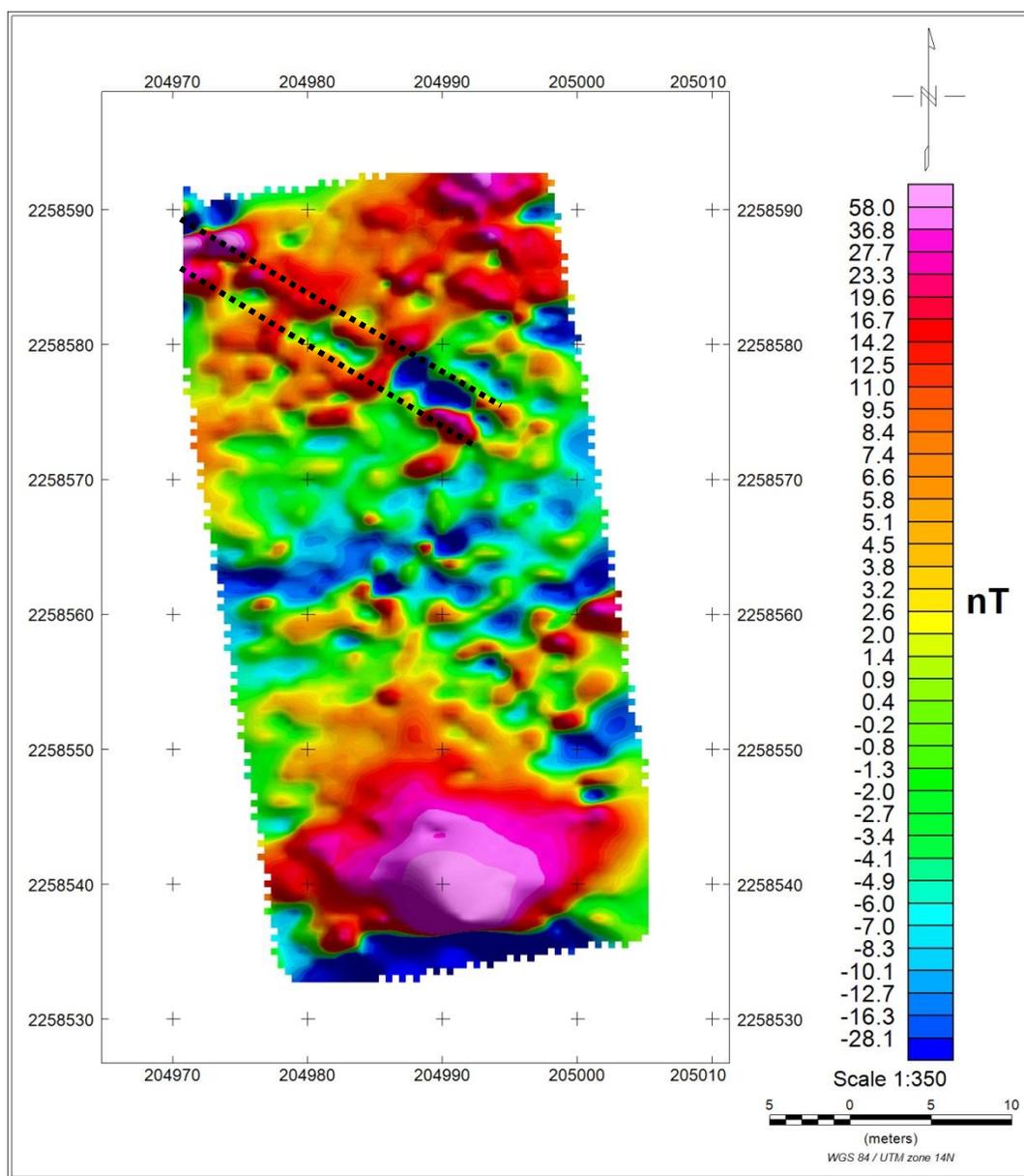


Figura 29. Campo residual del sensor inferior de la T1

La figura 30 corresponde al campo residual al que se le aplicó una reducción al polo, en ella se observa la misma anomalía (B1) mencionada en la imagen anterior pero con un tamaño menor en el eje X y alargada en el eje Y. También es visible un dipolo debajo de la anomalía con -91.3 nT, así como la tendencia lineal antes mencionada.

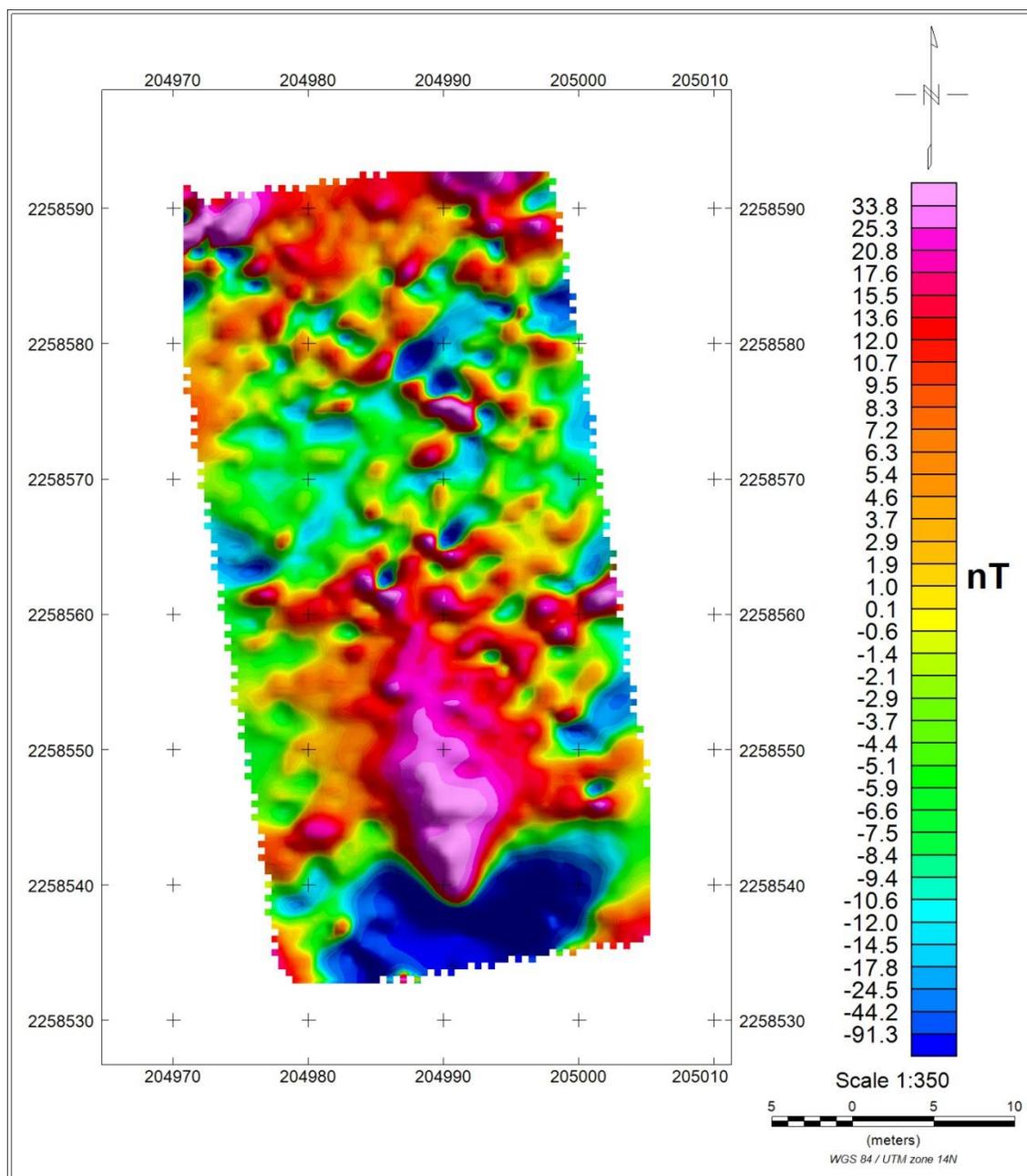


Figura 30. Reducción al polo del sensor inferior de la T1

La figura 31 muestra la señal analítica del residual, en esta imagen se puede observar un mayor número de anomalías distribuidas a lo largo y ancho de la imagen, también se observa la anomalía de mayor tamaño (B1) mencionada anteriormente, los máximos magnéticos corresponden al orden de 83.6 nT y los mínimos a 2.1 nT. Entre los 2258570 y 2258590 del eje Y se puede ver un conjunto de anomalías que presentan una forma lineal, enmarcada con dos líneas punteadas de color negro. Este conjunto de anomalías es más visible en esta imagen que en las imágenes anteriores.

Por último en esta imagen se observa un segundo grupo de anomalías, que en conjunto presentan una forma geométrica semicircular (enmarcada con líneas de color amarillo).

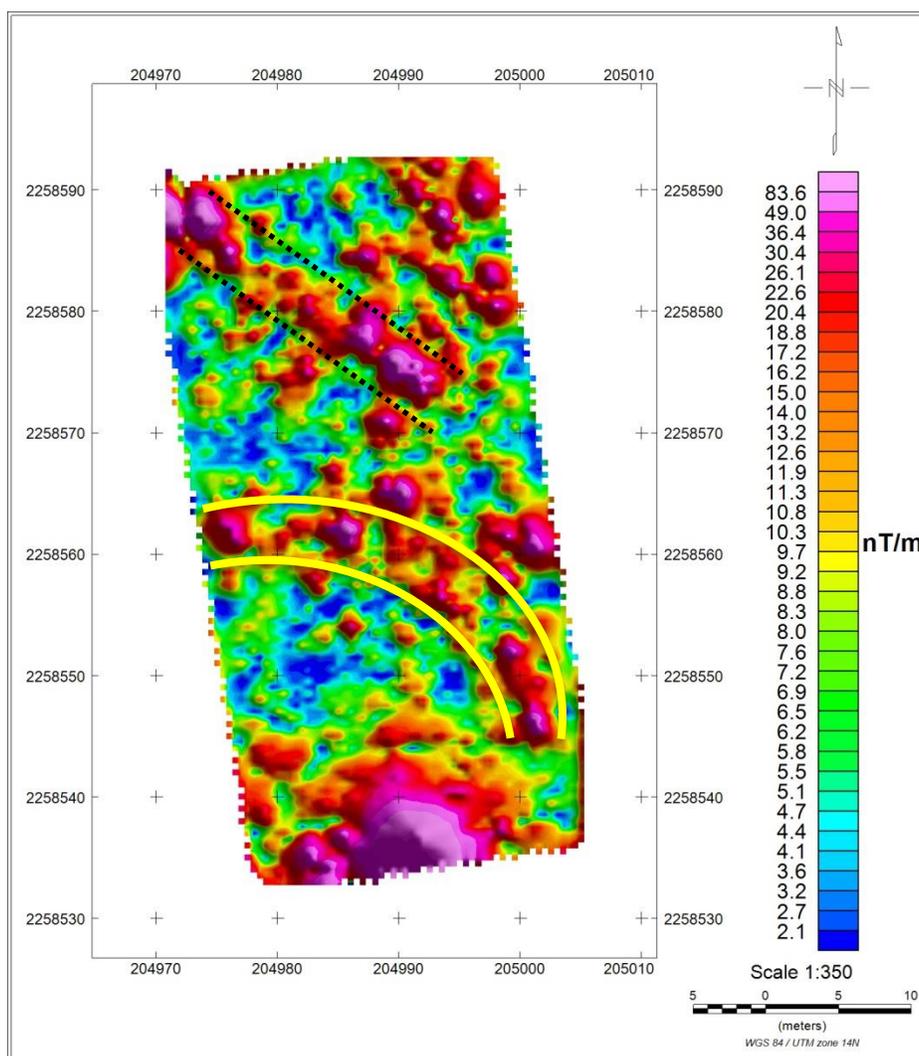


Figura 31. Señal analítica del sensor inferior de la T1

A continuación se presenta la figura 32, correspondiente al gradiente vertical, en la que se observan un gran número de anomalías, las cuales no se encuentran bien delimitadas y muchas se unen entre sí, por lo que sí sólo tuviéramos esta imagen sería difícil encontrar una tendencia entre ellas, pero al compararla con las demás imágenes podemos observar la misma tendencia lineal que ya se ha mencionado antes.

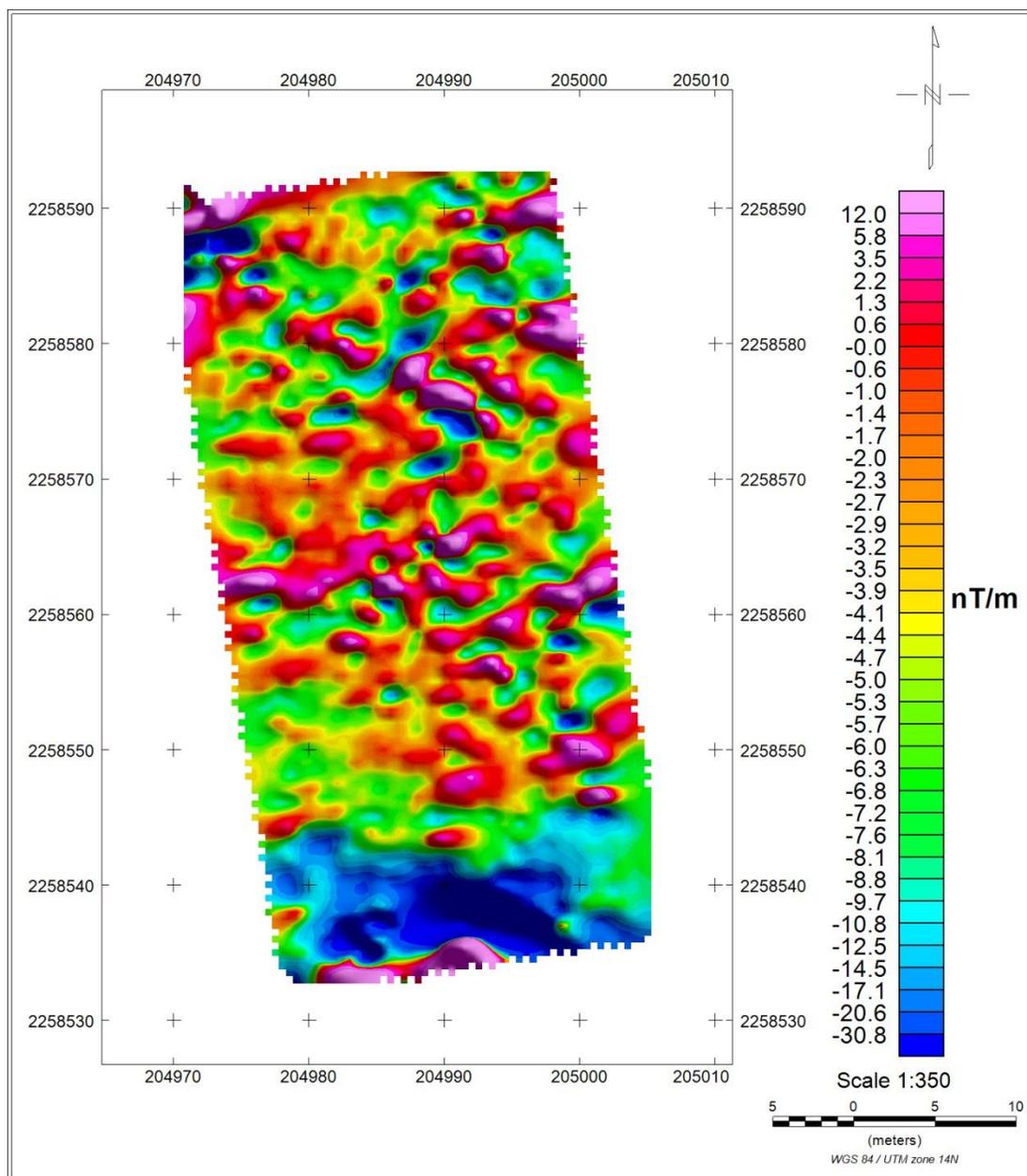


Figura 32. Gradiente vertical de la T1

En seguida se presenta el resultado de restar el sensor superior al sensor inferior, habiendo aplicado antes una Reducción al Polo (Figura 33). En esta imagen se observa un gran número de anomalías, destacando la que se encuentra en la parte inferior debido a que comparando con la figura 29, esta anomalía redujo su tamaño y se movió hacia la derecha. También se puede observar, enmarcado con dos líneas punteadas de color negro, la tendencia del conjunto de anomalías que se mencionó en las imágenes anteriores.

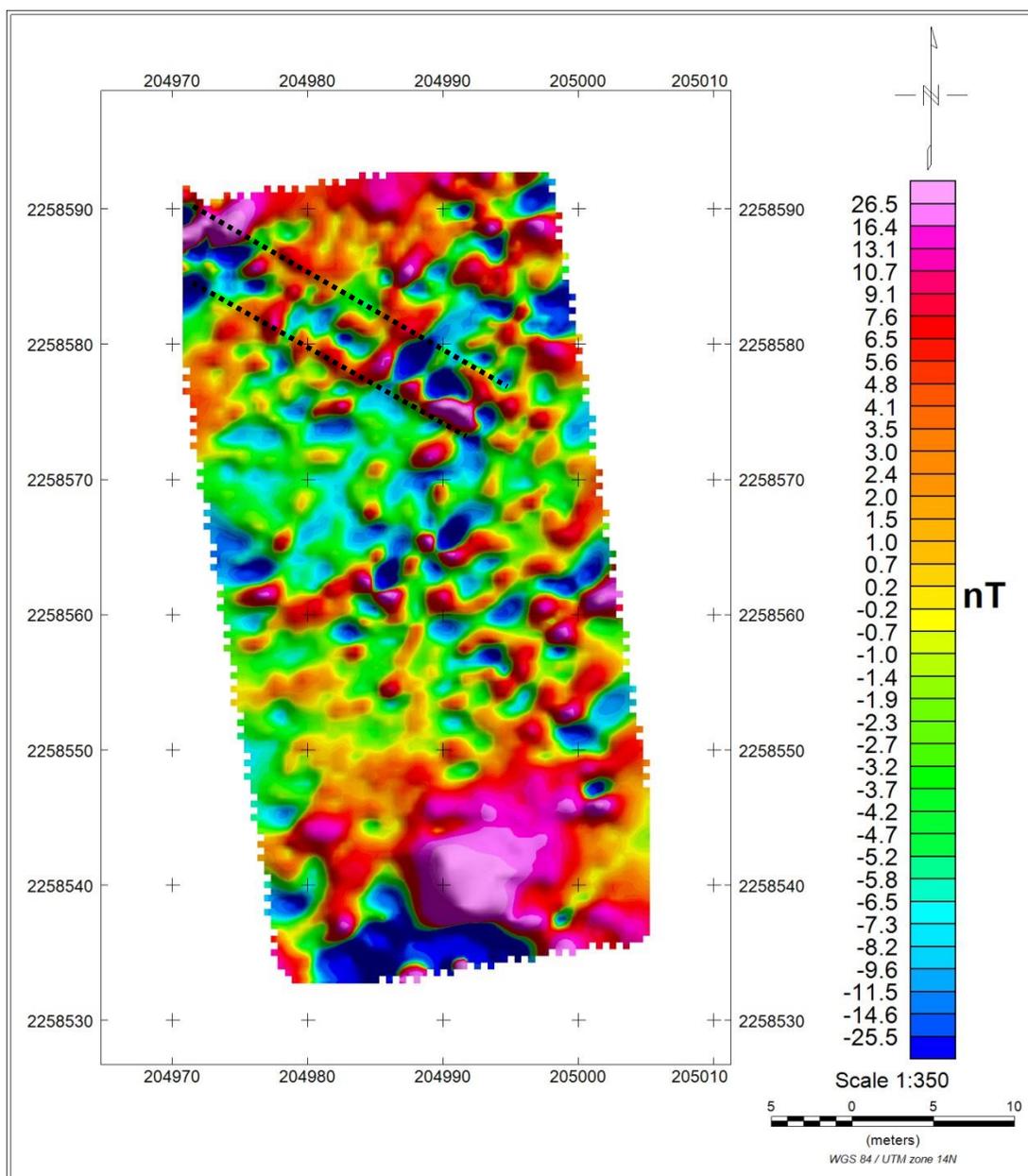


Figura 33. Resta de la reducción al polo del sensor inferior menos el sensor superior de la T1

La figura 34 muestra el resultado de restar el sensor superior al sensor inferior, al cual antes ya se le había aplicado una señal analítica. En esta imagen se observa que la anomalía que se encuentra en la parte inferior disminuyó de tamaño y se muestra con bordes delimitados, lo que provoca que la influencia de la misma sea menor y se puedan observar más anomalías aunque poco definidas.

Al igual que en las imágenes la figura 28, se observa el conjunto de anomalías que presentan una tendencia lineal, la cual se encuentra enmarcada por dos líneas punteadas color negro, así como el segundo conjunto de anomalías que forman una geometría semicircular.

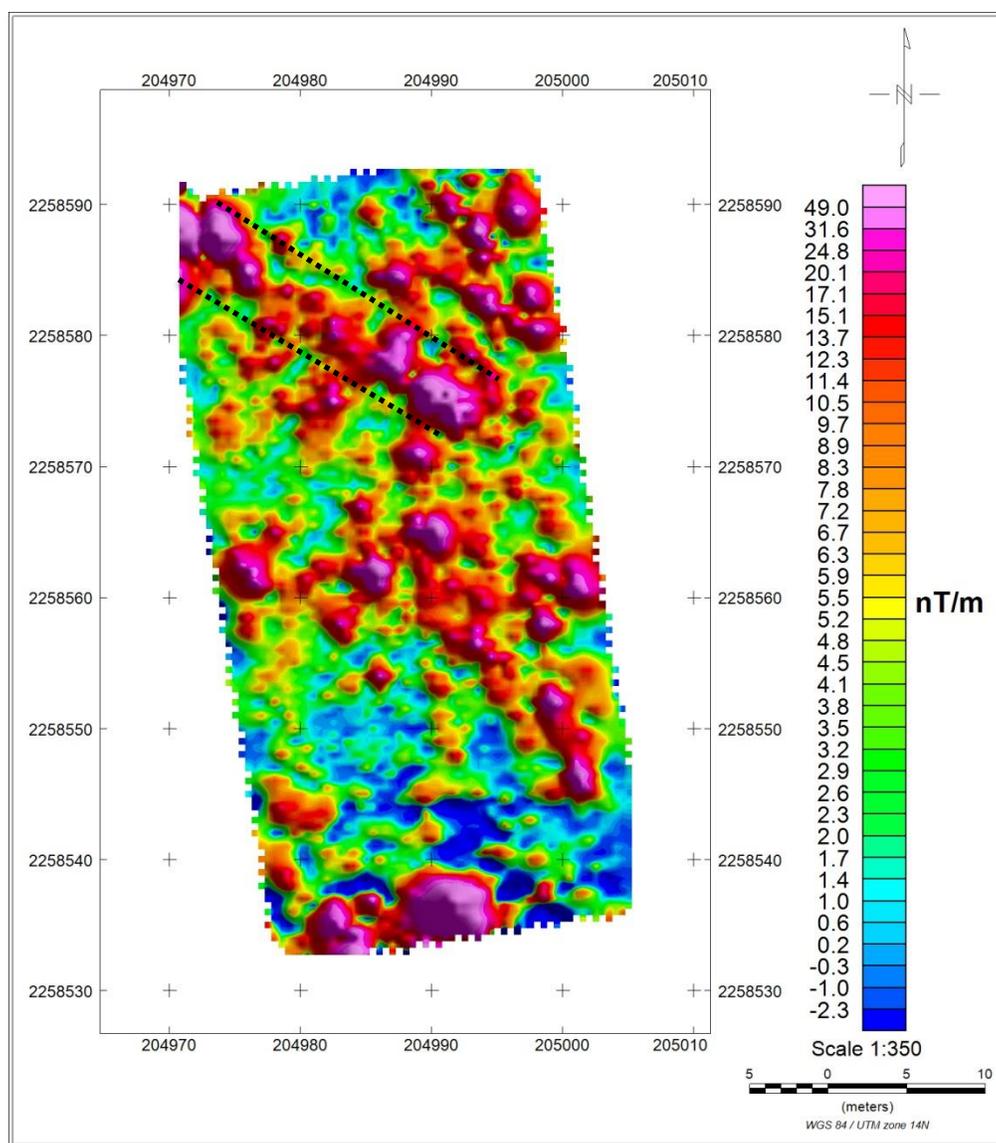


Figura 34. Resta de la señal analítica del sensor inferior menos el sensor superior de la T1

5.3 Terraza 3 (T3)

La figura 35 corresponde al campo residual obtenido con los datos del sensor superior (TOP), en ella se observan tres anomalías en la parte inferior de la imagen (B1, B2 y B3), un dipolo de gran tamaño en la parte central (D) y otra anomalía de mayor tamaño en la parte superior (B4), presentando máximos de 8.3 nT y mínimos de -8.2 nT. Estas anomalías al observarse en este sensor nos muestran que se encuentran a más de 2 metros de profundidad, por lo que probablemente no son de interés arqueológico.

Al igual que en las zonas anteriores, en la Terraza 3 solo se mostraran los resultados del sensor inferior (BOTTOM), al presentarse en este rango de profundidades las anomalías de interés antropológico.

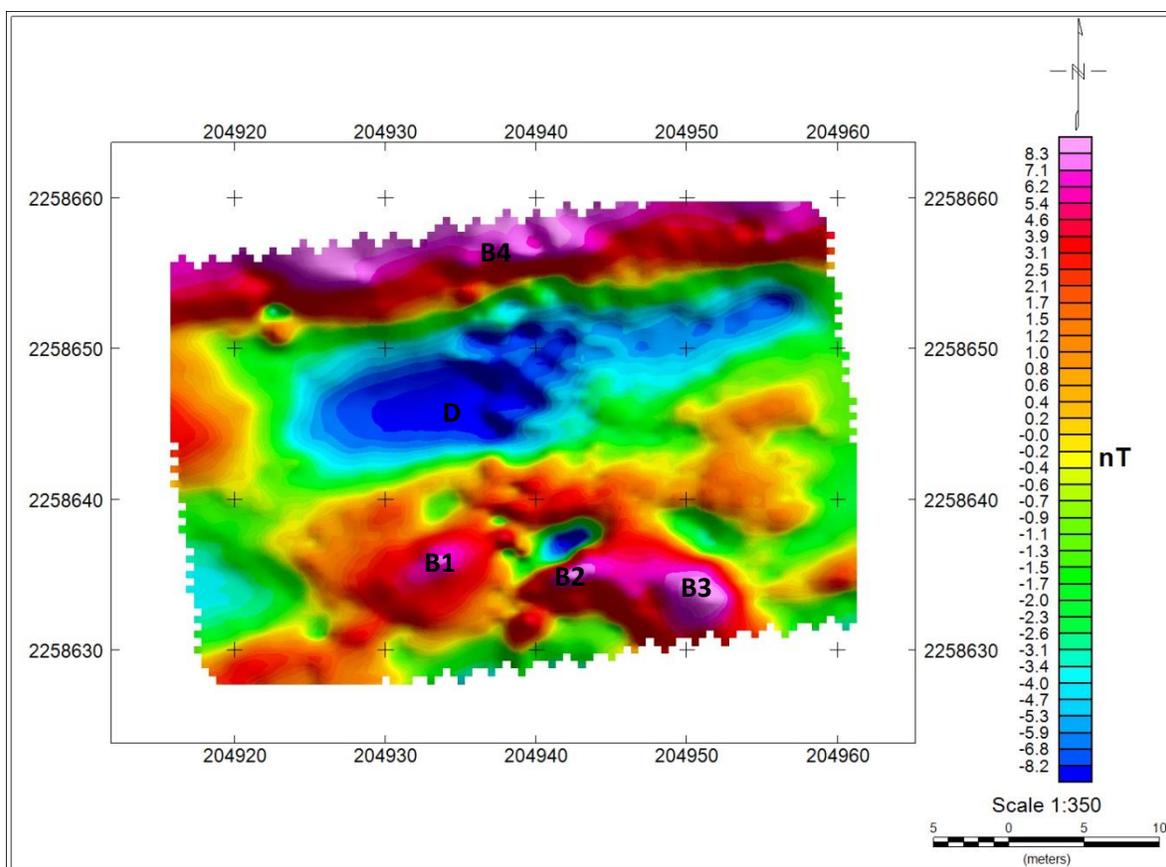


Figura 35. Campo residual del sensor superior de la T3

A continuación se muestra la figura 36, la cual corresponde al residual del sensor inferior, en ella se observan un mayor número de anomalías que en la imagen anterior incluyendo las cuatro anomalías mencionadas en la figura 35. Los máximos magnéticos están en el orden de 11.8 nT mientras que los mínimos en -11.3 nT.

Del lado derecho de la imagen se observa un grupo de anomalías (C1) que presentan una forma lineal (enmarcadas con dos líneas punteadas color negro) entre las coordenadas 204950 y 204960 en el eje X y a lo largo de todo el eje Y, las cuales pueden ser de interés para los arqueólogos.

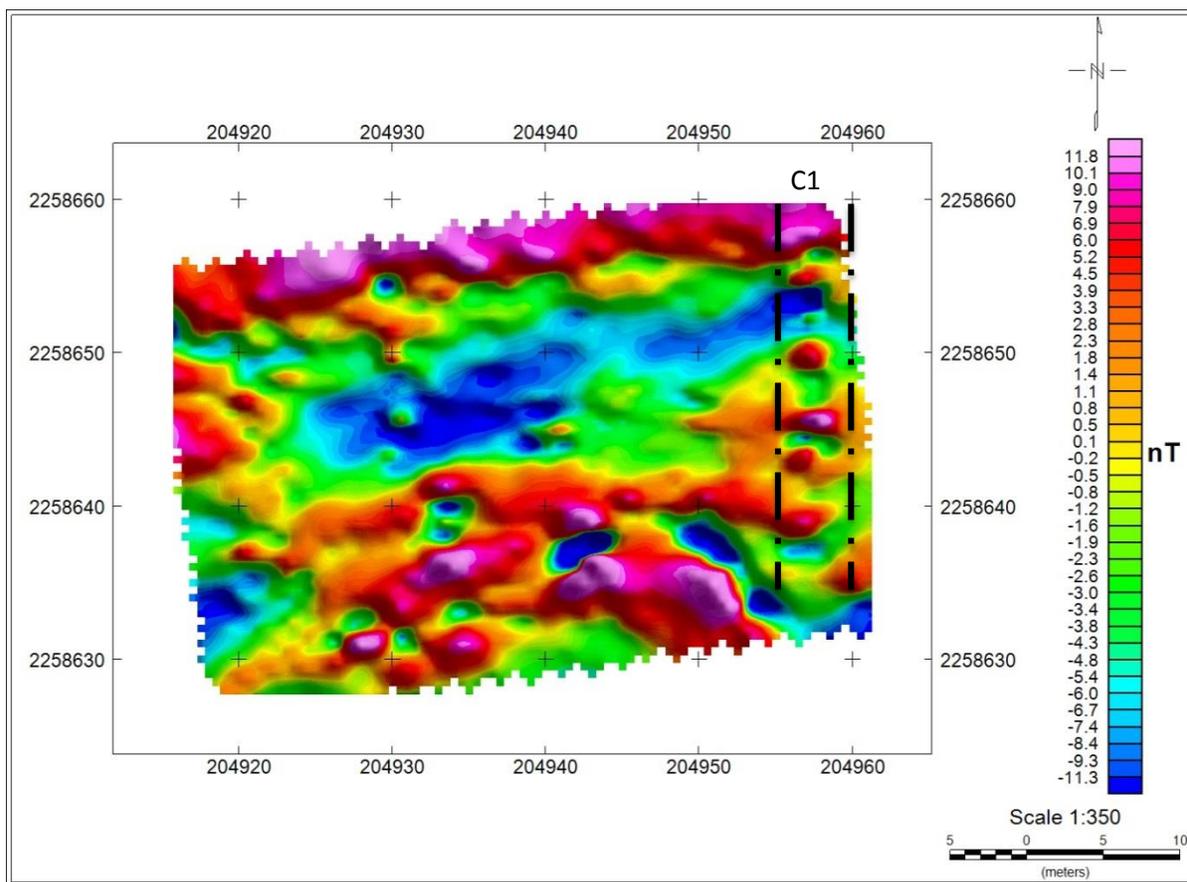


Figura 36. Campo residual del sensor inferior de la T3

La figura 37 muestra el campo residual al que se le aplicó una derivada direccional en “Y”, en ella podemos ver que existe más de un conjunto de anomalías que presentan una forma lineal, los cuales están señalados con líneas punteadas de color negro. El primero (C1), ya mencionado en la imagen anterior, se encuentra del lado derecho de la imagen, entre 204950 y 204960 del eje X. El segundo (C3) se encuentra entre las coordenadas 204930 y 204940 del eje X y es casi paralela a la primera, aunque al parecer tiene una longitud menor. Y por último tenemos un tercer conjunto de anomalías (C4), el cual se encuentra perpendicular al segundo y primer conjunto de anomalías, este conjunto se puede ver entre las coordenadas 2258650 y 2258660 del eje Y y se extiende a todo lo largo del eje X.

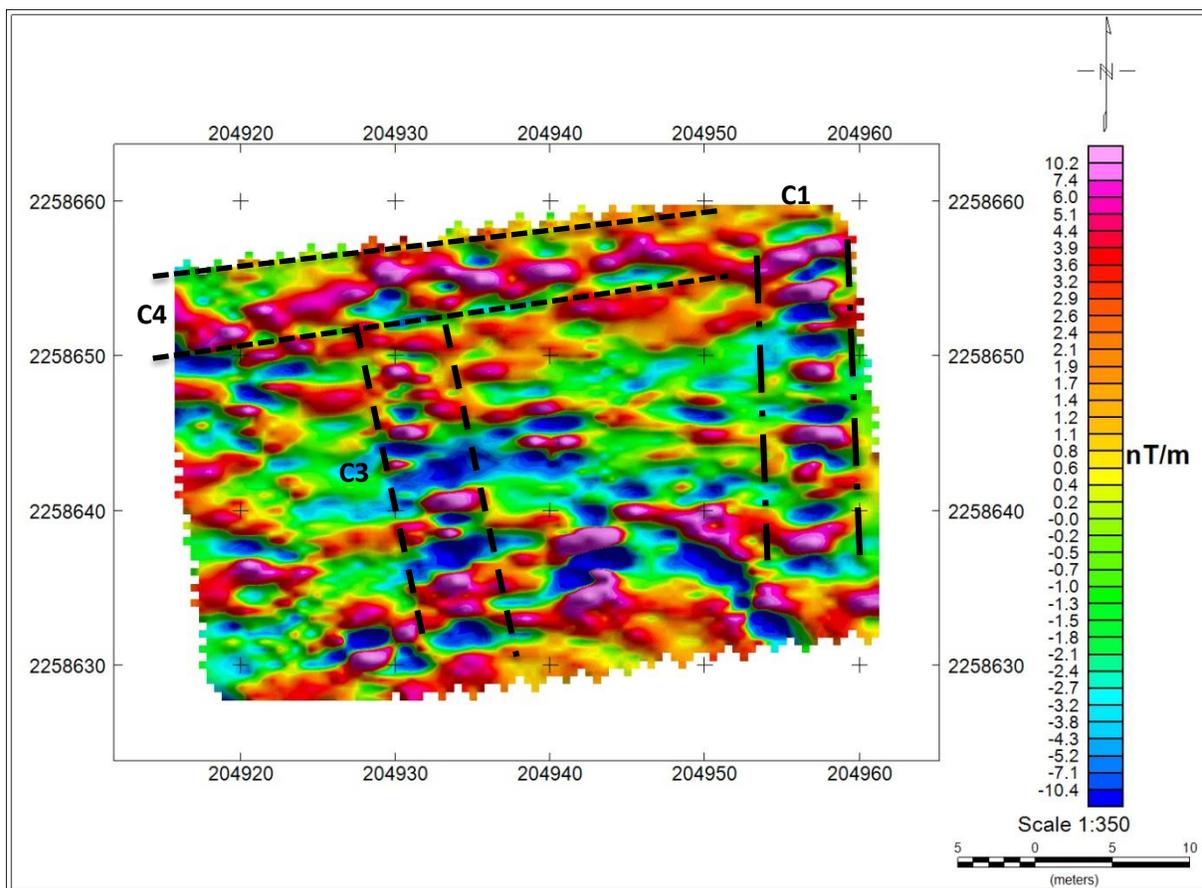


Figura 37. Derivada direccional en “Y” del sensor inferior de la T3.

La figura 38 muestra el campo residual al que se le aplicó una reducción al polo, en ella se observan dos de los tres conjuntos de anomalías (C1 y C3) mencionados en la imagen anterior, con la diferencia de que en esta imagen hay un menor número de anomalías que los conforman, presentando máximos magnéticos en el orden de 13.1 nT y mínimos de -11.9 nT.

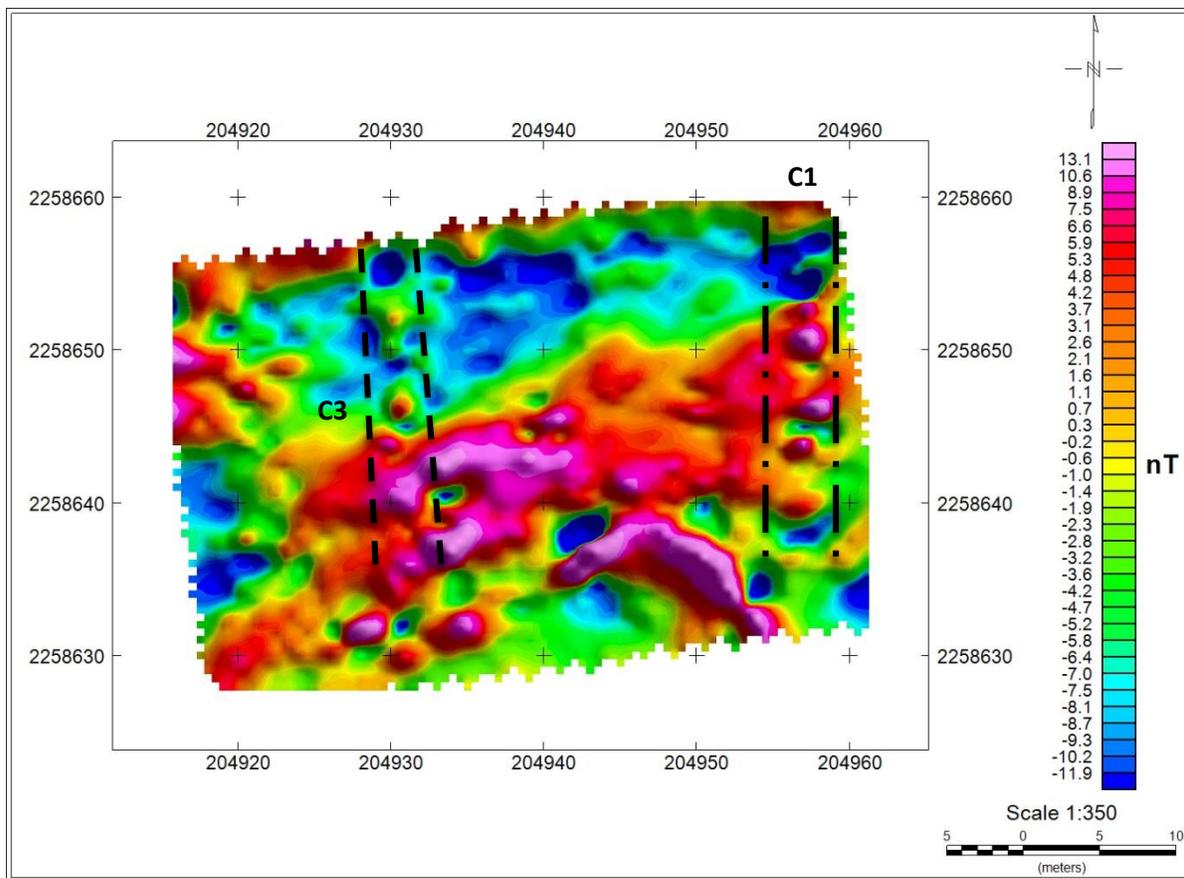


Figura 38. Reducción al polo del sensor inferior en la T3

En la siguiente imagen (Figura 39), se observa el resultado de aplicar una señal analítica al residual del sensor inferior (BOTTOM) de la Terraza 3. En ella se observan los tres conjuntos de anomalías (C1, C3 y C4) con forma lineal, mencionados anteriormente y dos anomalías aisladas encerradas en dos círculos punteados de color blanco, las cuales muy probablemente no son de interés arqueológico, al corresponden a las anomalías B2 y B3 mencionadas en la figura 35. Los máximos presentes en esta imagen corresponden al orden de 23.4 nT y los mínimos a 1.1 nT.

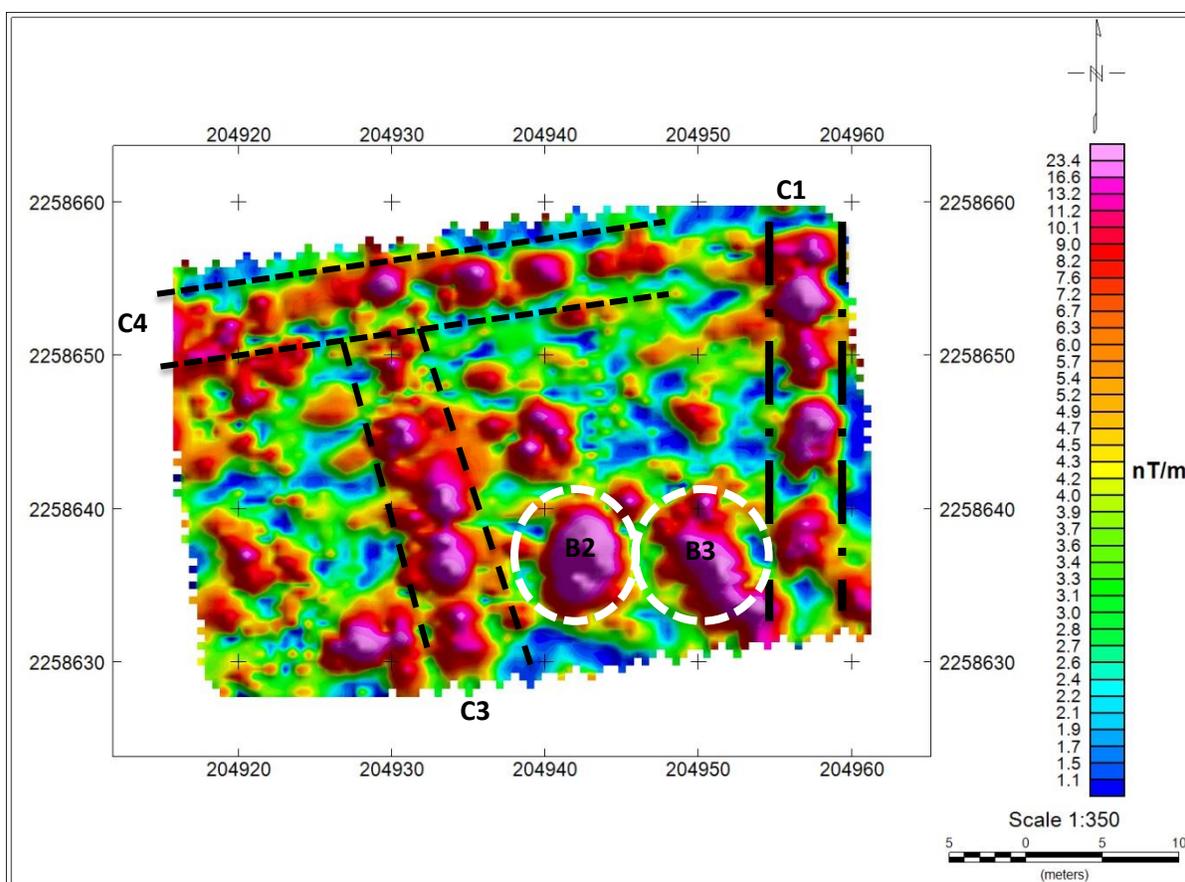


Figura 39. Señal analítica del sensor inferior en la T3.

A continuación se muestra el campo residual del sensor superior (TOP) al que se le aplicó una señal analítica (Figura 40). En esta imagen se observa un conjunto de anomalías que forman una línea recta (C2), mostrado en el rectángulo negro, que se encuentra entre las coordenadas 204930 y 204940 en el eje X, el cual al compararlo con las imágenes anteriores no corresponde a ninguno de los conjuntos de anomalías antes mencionados, por lo que se trataría de uno nuevo y el cual al presentarse en este sensor indicaría que se encuentra a más de 2 metros de profundidad.

Se observan las dos anomalías aisladas (B2 y B3) mencionadas en la imagen anterior, las cuales podemos observar enmarcadas por dos círculos punteados de color blanco.

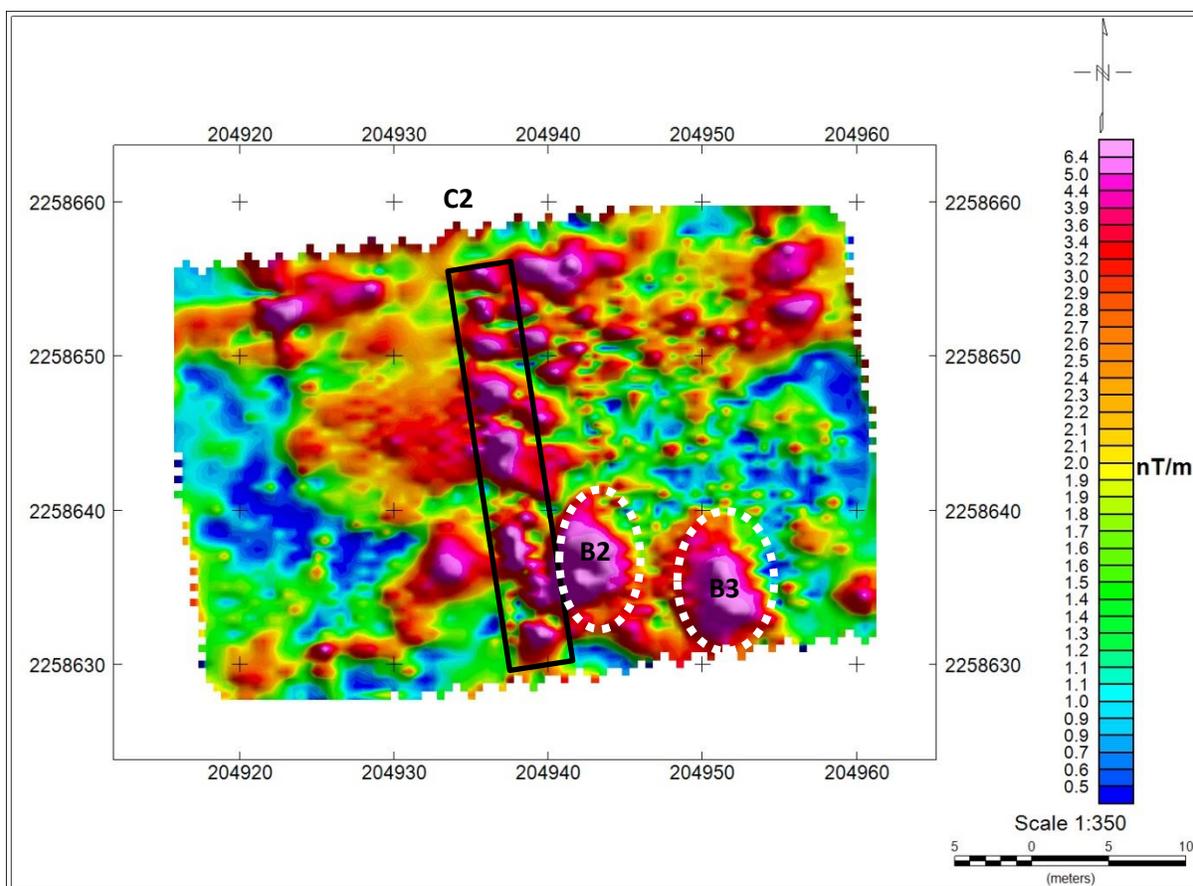


Figura 40. Señal analítica del sensor superior en la T3.

En la figura 41 se muestra el Gradiente Vertical de la Terraza 3, en ella se pueden observar algunas anomalía, las cuales no se encuentran delimitadas y muchas de ellas se unen entre sí, a pesar de ello, se pueden distinguir dos de los cuatro conjuntos de anomalías encontrados en las imágenes anteriores (enmarcados por líneas punteadas de color negro). Los máximos magnéticos en esta imagen alcanzan los 7.5 nT y los mínimos son de -7.4 nT.

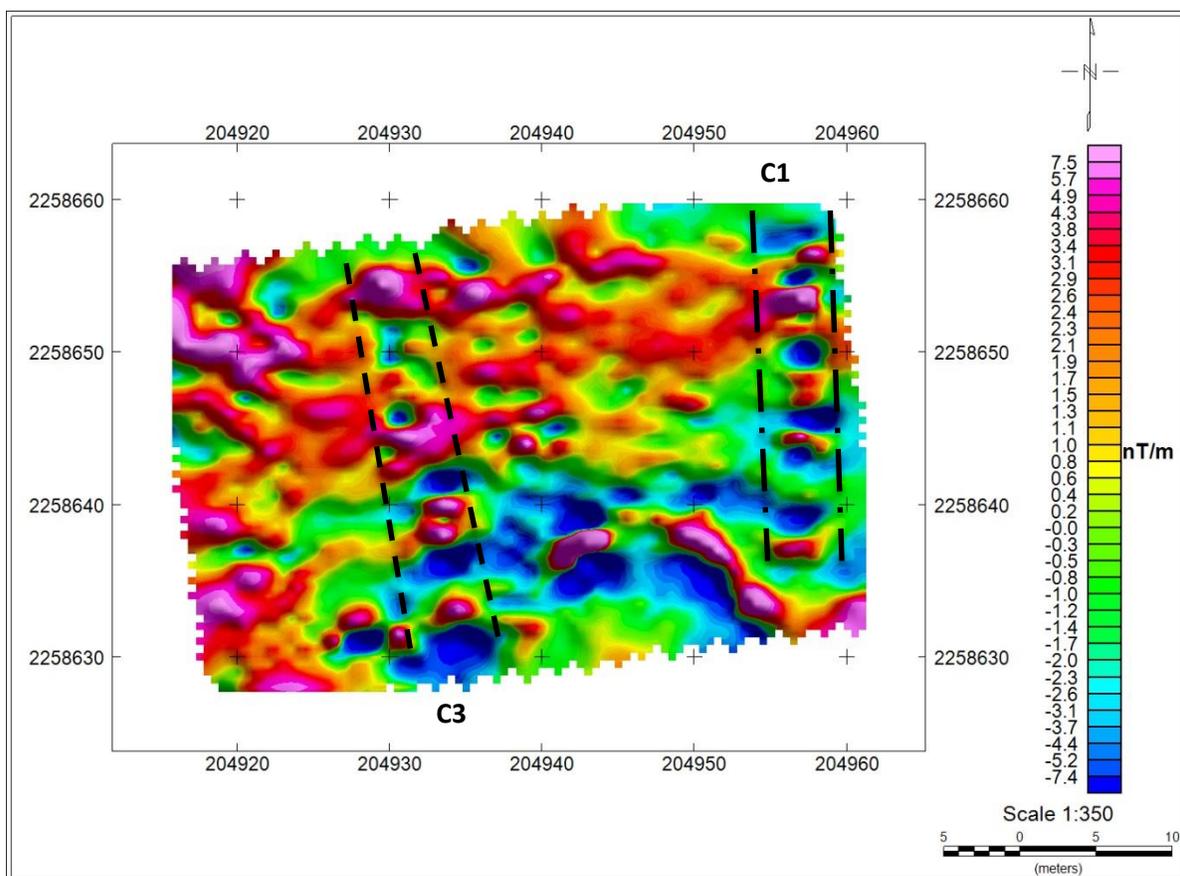


Figura 41. Gradiente vertical de la T3.

Finalmente para esta Terraza, se muestra el resultado de la resta de la señal analítica del sensor inferior menos la señal analítica del sensor superior (Figura 42). En esta imagen se pueden observar los cuatro conjuntos de anomalías mencionados en las imágenes anteriores, enmarcados con líneas punteadas de color negro y un rectángulo del mismo color, así como las dos anomalías aisladas también mencionadas con anterioridad (en círculos punteados color blanco).

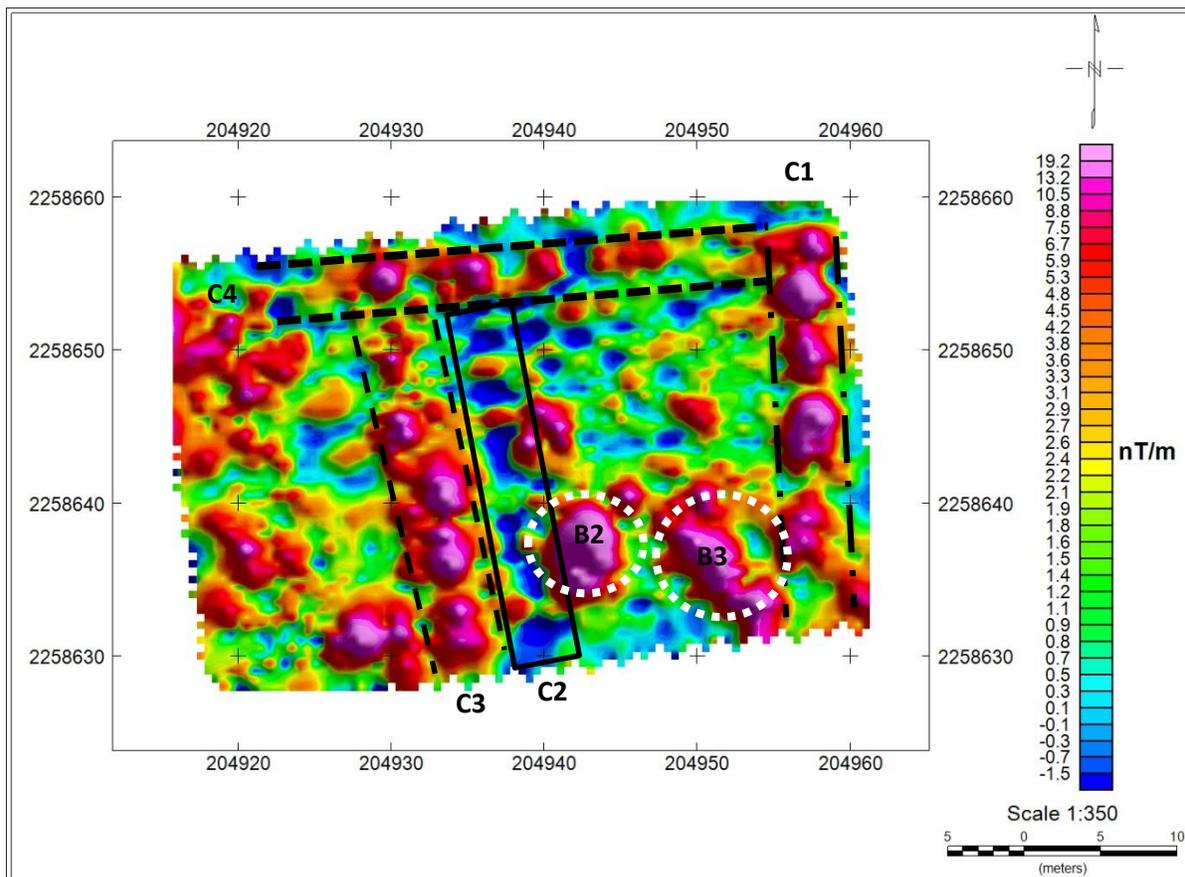


Figura 42. Resta de la señal analítica del sensor inferior menos el sensor superior en la T3

5.4 Terraza 4 (T4)

Las siguientes imágenes muestran los resultados de la Terraza 4, al igual que en las zonas anteriores solo se muestran las imágenes que pueden ser de interés arqueológico, por lo que la siguiente imagen es la única perteneciente al sensor superior de la terraza 4.

En la figura 43, se muestra el residual del sensor superior, en el que se observan dos anomalías bien definidas (E1 y E2), que debido a la profundidad a la que se encuentran (más de 2 metros de profundidad) es probable que no sean de interés arqueológico, en ella podemos observar máximos magnéticos de 8.2 nT y mínimos de -8.2 nT.

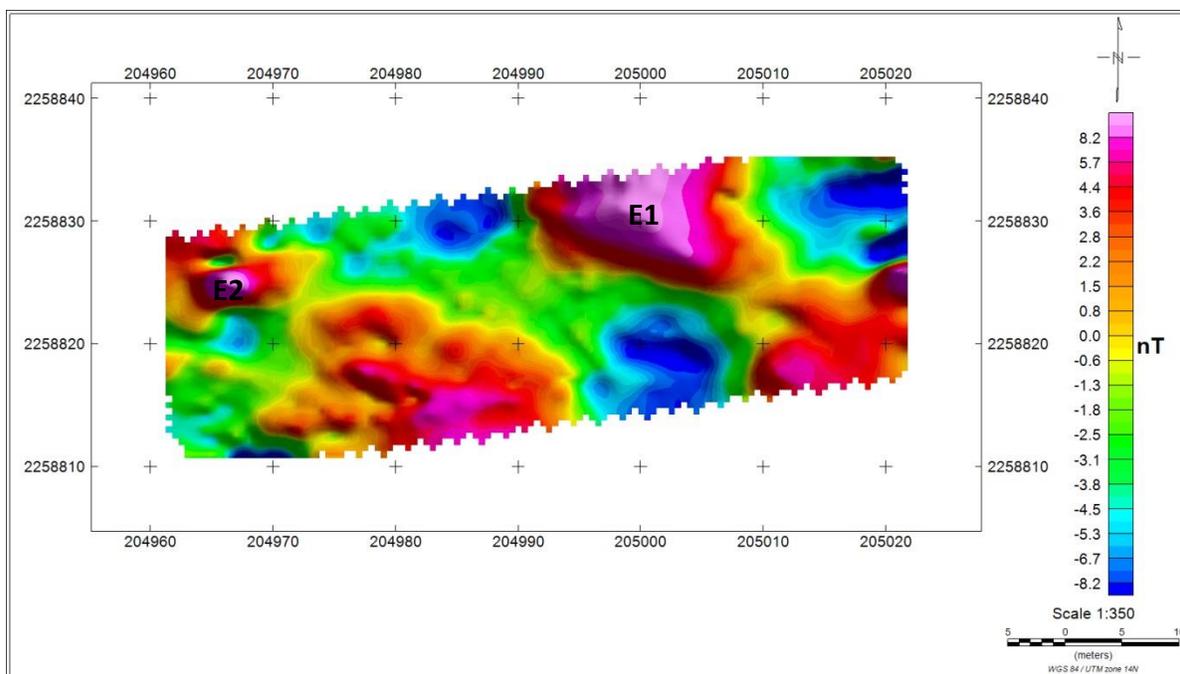


Figura 43. Campo residual del sensor superior para la T4.

A continuación se presenta la imagen corresponde al residual del sensor inferior (Figura 44), en ella se observa un cambio de magnetización a partir de la coordenada 204995 (aprox.) del eje X, el cual dividí con una línea negra para enfatizar este cambio. Junto a esta línea del lado izquierdo se puede ver un conjunto de anomalías que presentan una forma lineal (F1).

Del lado izquierdo se observan varias anomalías, las cuales se encuentran dispersas, los máximos magnéticos presentes son de hasta 20.2 nT y los mínimos de -26.1 nT.

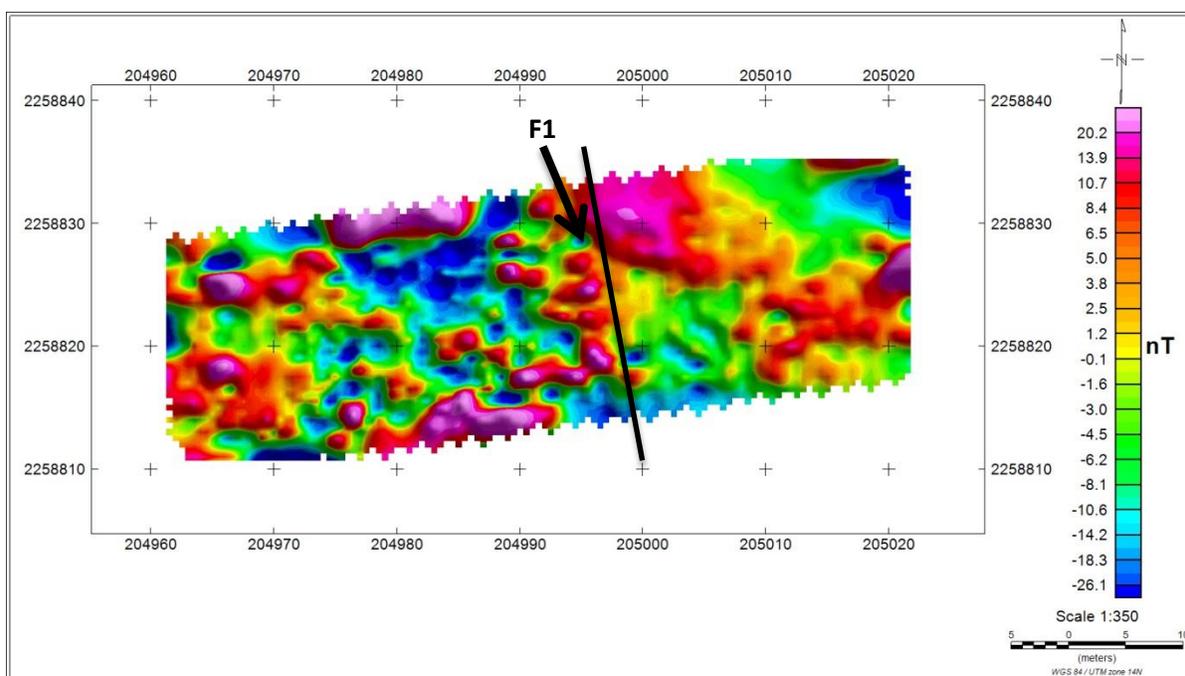


Figura 44. Campo residual del sensor inferior para la T4.

La figura 45 muestra el campo residual al que le fue aplicado una reducción al polo, en ella se vuelve a observar el cambio de magnetización que se mencionó en la imagen anterior, este cambio se presenta aproximadamente a la mitad del área total de la terraza 4. También se puede ver el conjunto de anomalías que presentan una forma lineal (F1) y que ya había sido detectado en la figura 44.

Cabe mencionar que en esta imagen se presenta un mayor número de anomalías, las cuales no se encuentran bien delimitadas, uniéndose muchas de ellas, por lo que no es posible determinar si existen más anomalías que pudieran resultar de interés arqueológico. Los máximos magnéticos presentes en esta imagen son del orden de 21.1 nT y los mínimos de -33.7 nT.

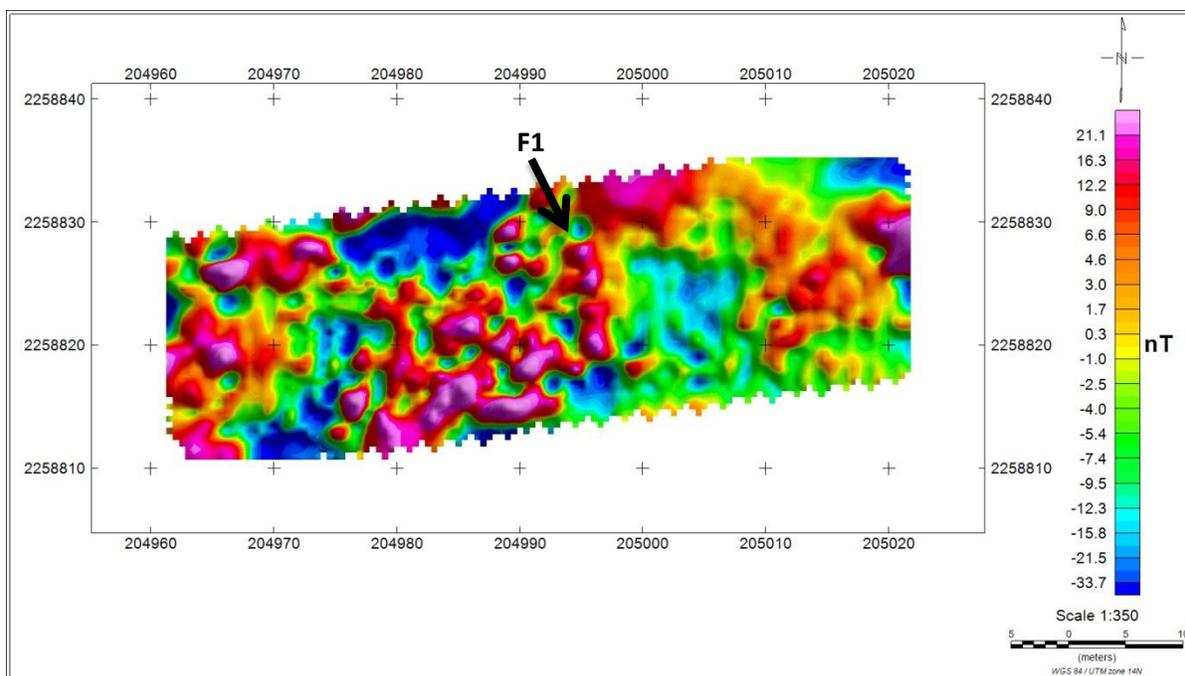


Figura 45. Reducción al polo del sensor inferior en la T4.

A continuación se presenta el residual al que se le aplicó una señal analítica (Figura 46), en esta imagen se continúa observando el cambio de magnetización que divide la zona en dos, en el lado derecho no se presentan anomalías, mientras que en el lado izquierdo se observan más anomalías que en las imágenes anteriores.

Se pueden ver dos conjuntos de anomalías con forma lineal (F2 y F3) de los cuales el del lado derecho ya se había presentado en las imágenes anteriores. Los máximos magnéticos en esta imagen llegan a los 45.1 nT y los mínimos son del orden de 2.5 nT.

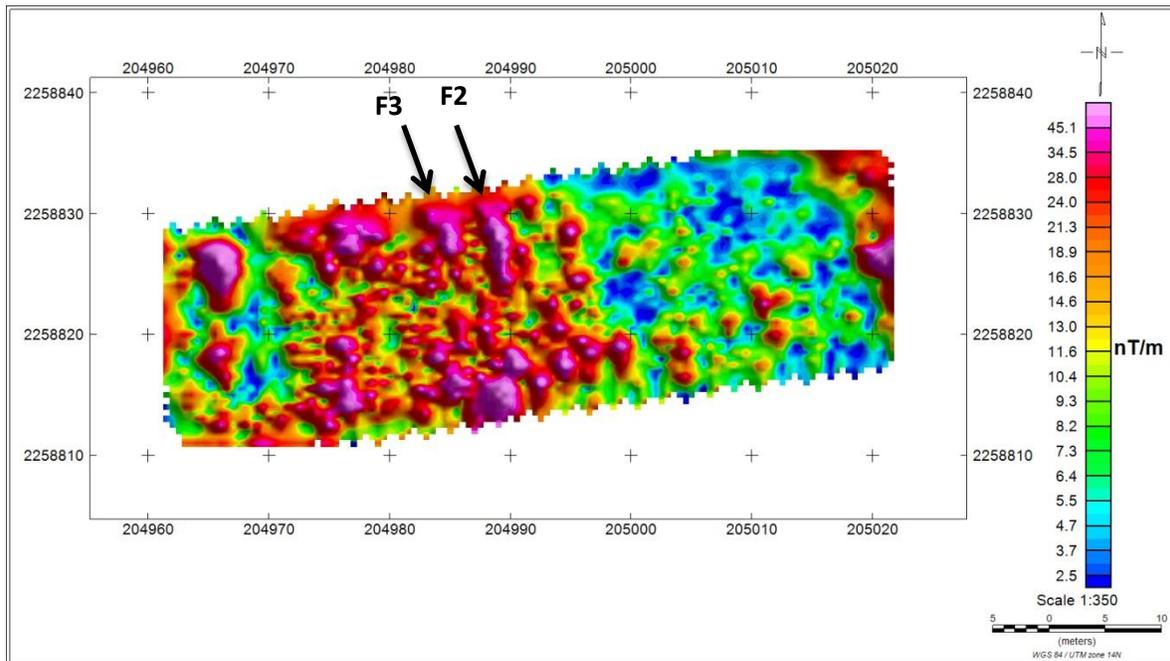


Figura 46. Señal analítica del sensor inferior para la T4.

La figura 47 muestra el gradiente vertical de la zona T4, en ella se observan diversas anomalías las cuales no se encuentran bien delimitadas por lo que no es posible visualizar los conjuntos de anomalías (F1 y F2) mencionados en las imágenes anteriores. Sin embargo el cambio de magnetización está bien definido al igual que en las imágenes anteriores.

En esta imagen los máximos magnéticos son de 32.4 nT y los mínimos magnéticos corresponden al orden de -18.6 nT.

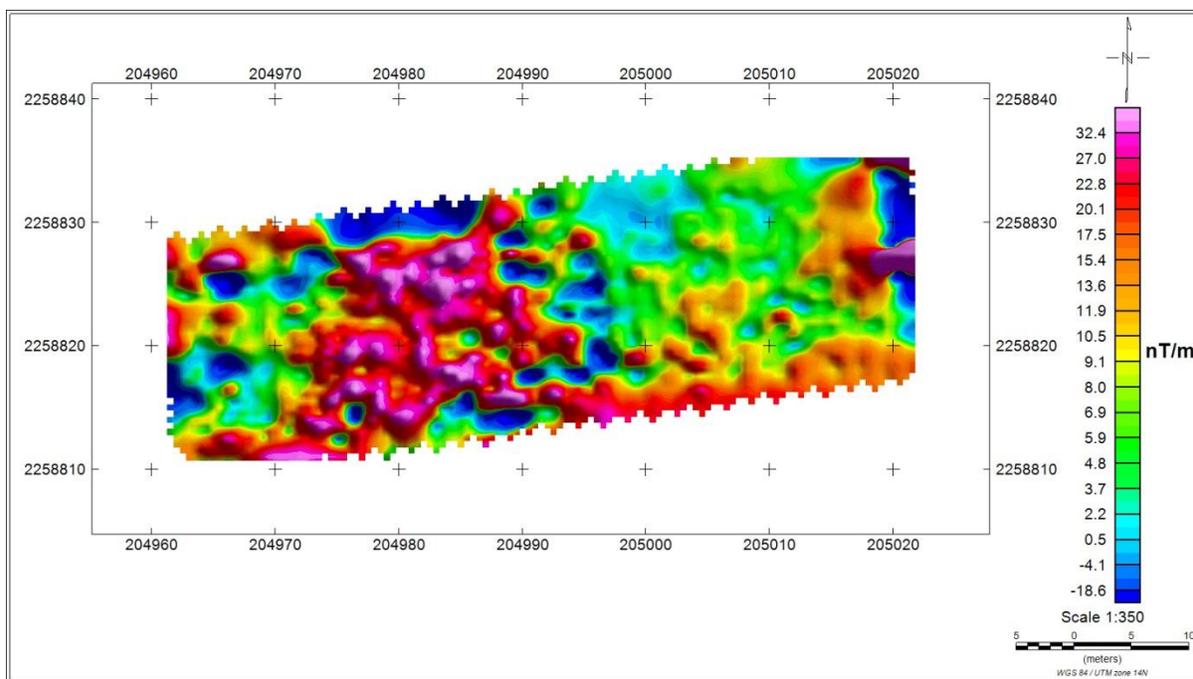


Figura 47. Gradiente vertical de la T4.

Finalmente se muestra el resultado de restar el sensor superior al sensor inferior de la señal analítica (Figura 48).

En esta imagen podemos observar los tres conjuntos de anomalías mencionados en las imágenes anteriores. Donde el conjunto F2 y F3 se observan claramente a diferencia del conjunto F1 que es menos visible, estos conjuntos de anomalías presentan una forma lineal y se encuentran paralelos entre sí. Al igual que en las imágenes anteriores en ésta es visible el cambio de magnetización que se presenta aproximadamente a la mitad del área de la Terraza 4.

Los máximos magnéticos que se presentan en esta imagen son de hasta 42.1 nT mientras que los mínimos magnéticos son de -0.2 nT.

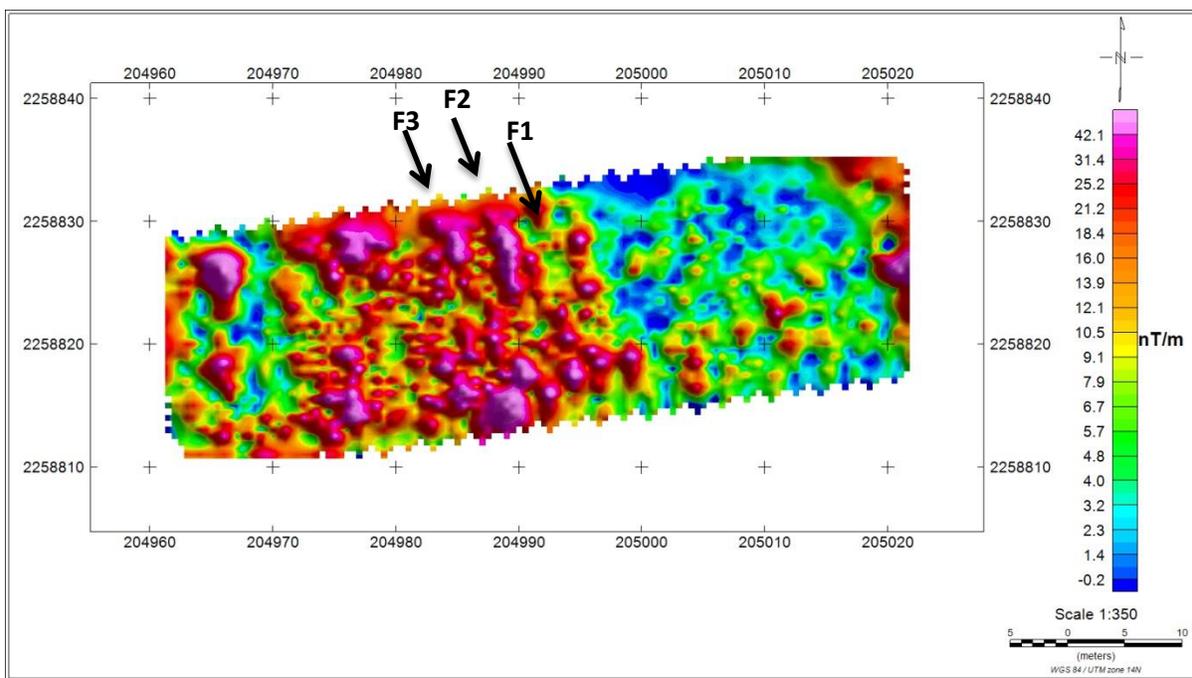


Figura 48. Resta de la señal analítica del sensor superior menos el inferior de la T4.

Capítulo VI. Conclusiones y Recomendaciones

- Por medio del método magnetométrico se demostró la importancia que tiene el uso de los resultados de ambos sensores de forma independiente. Con ello se pudieron descartar anomalías profundas, las cuales se asocian a estructuras geológicas, que se observan en ambos sensores y que pudieran ser confundidas con estructuras arqueológicas.
- En las mallas de las cuatro zonas de estudio podemos observar que las imágenes resultantes del sensor superior no presentan anomalías de interés para los arqueólogos, esto debido a que este sensor nos muestra estructuras a más de 2 metros de profundidad, por lo que muy probablemente pertenecen a rocas de origen volcánico.
- Se concluye que en el Juego de Pelota existe un canal de drenaje en la sección Sur de la cancha. Este presenta una forma semicircular, extendiéndose hasta la mitad de la cancha y desembocando en la parte Este de la misma.
- En cuanto a las anomalías A1 y A2 que se observan en el Juego de Pelota, posiblemente correspondan a estructuras de origen geológico. Esto se puede determinar, ya que dichas anomalías se observan tanto en el sensor superior como en el inferior, lo que demuestra que se trata de estructuras que se encuentran a mayor profundidad. Además de observarse en los resultados que estas anomalías abarcan una mayor área en el sensor superior y que disminuye en las imágenes del sensor inferior.
- Lo más destacado que se encontró en la Terraza 1 fue un grupo de anomalías que en conjunto forma una línea recta, esta comienza en la esquina superior izquierda, terminando aproximadamente 20 [m] debajo de la esquina superior derecha. Debido a las características que presentan estas anomalías, se puede inferir que no se trata de una estructura de origen natural, por lo que es de posible interés arqueológico.
- En cuanto a las anomalías presentes en la sección Sur de la Terraza 1 y que en conjunto forman un semicírculo, se puede decir que faltaría realizar

más estudios para determinar si realmente corresponden a una estructura arqueológica o solo se trata de un efecto causado por la anomalía de mayor tamaño presente debajo de ellas.

- Para la anomalía B1 que presenta un mayor tamaño y que se puede ver en la parte sur de los resultados de la T1, se puede decir que probablemente sea de origen geológico, ya que al igual que en el Juego de Pelota es visible tanto en el sensor superior como en el sensor inferior por lo que demarcaría una estructura a mayor profundidad.
- En la Terraza 3 se encontraron conjuntos de anomalías que presentan una geometría lineal, de los cuales el conjunto C1 muy probablemente se trate de la continuación del muro banqueteta que se encuentra en la zona, el cual colinda con las escaleras que dan acceso al Juego de Pelota. Se llega a esta conclusión por la forma y lugar en el que se localiza este conjunto de anomalías magnéticas. También podemos decir que se trata de una estructura somera ya que en las imágenes correspondientes al sensor superior no se visualiza.
- En cuanto al conjunto de anomalías C2, C3 y C4 de la T3, se concluye que se podría tratar de una tercera estructura que tendría características similares a las que se encuentran cerca. La cual correspondería con el hecho de que se encuentra aproximadamente en la misma alineación de las dos explanadas al Este del Juego de Pelota (Figura 49).

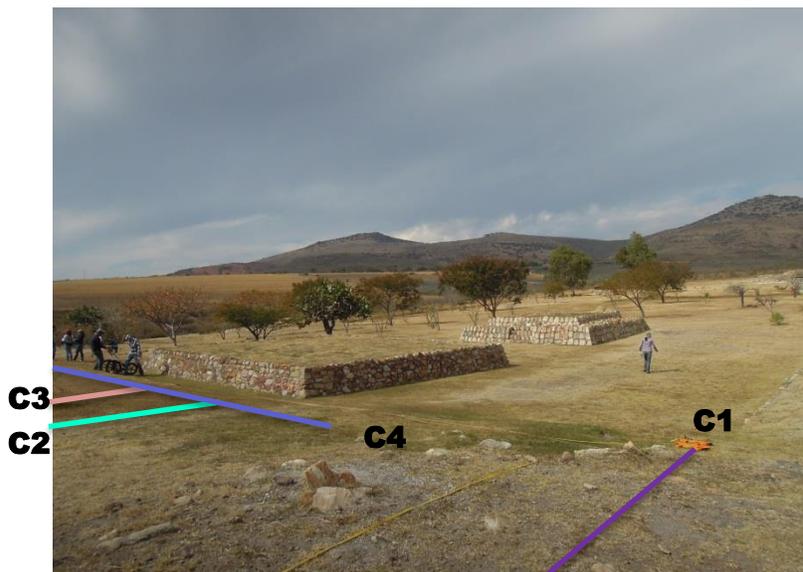


Figura 49. Explanadas localizadas al Este del Juego de Pelota, que ejemplifican lo dicho anteriormente (Tomada de Google Earth).

- Del conjunto de anomalías C2 y C3 de la T3, podemos destacar que el conjunto C2 se localiza a mayor profundidad, ya que es posible observarlo en los dos sensores, mientras que la estructura conformada por las anomalías del conjunto C3 es somero, debido a esto y a que se encuentran muy cerca uno del otro se puede pensar que se trata de una estructura escalonada, parecida a la explanada de la derecha que se ve en la figura 49.
- El resultado de restar las señales analíticas de los dos sensores en la malla de la Terraza 3 demuestra la utilidad de ésta, al ser el único mapa en el que se observan todos los conjuntos de anomalías, por lo que se puede decir que esta resta es de utilidad para localizar estructuras que se encuentren a una profundidad intermedia entre la dada por los sensores superior e inferior,
- Cabe mencionar que de acuerdo con los arqueólogos de la zona, se pensaba que en la sección T3 se podría encontrar un cementerio, lo cual sería descartado al no encontrarse anomalías que lo sugieran.
- Finalmente para la Terraza 4, el cambio de magnetización que se observar en los resultados, nos indica que existen diferentes litologías o materiales aproximadamente a la mitad del área de la zona de estudio, lo cual muy probablemente se debe a un posible relleno que se pudo haber hecho durante los arreglos que se realizaron en el proyecto para la apertura de la Zona Arqueológica al público.
- También se pueden concluir que en la zona T4 el conjunto de anomalías F1, F2 y F3 que tienen dirección Norte-Sur y que se encuentran paralelas al cambio de magnetización antes mencionado, posiblemente se trate de pequeños muros, los cuales estarían alineados con la estructura central de casas tapadas.

Recomendaciones

- Realizar más estudios geofísicos en la zona, por ejemplo la Tomografía de alta resolución, la cual sería de gran utilidad para la Terraza 4 para determinar el tipo de material presente en el cambio de magnetización. Y el Georradar (GPR), el cual se podría utilizar en la Terraza 3 para establecer la profundidad a la que se podría encontrar la estructura encontrada.
- Realizar excavaciones, principalmente en la Terraza 3 y en la Terraza 1, las cuales podrían ser de interés arqueológico y no presentarían un proyecto de gran costo al ser estructuras poco profundas, exceptuando una parte de la Terraza 3.

REFERENCIAS

1. Aboites, V. y Wilson, M., Mediciones acústicas en sitios arqueológicos del estado de Guanajuato. Acta Universitaria, vol. 23, núm 2, pp. 5-15, Universidad de Guanajuato, México, 2013.
2. Argote Espino D. L., Modelación en 3D de Datos Magnéticos para Caracterizar Estructuras Arqueológicas, Tesis de Doctorado, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, 2008.
3. Blakely, Richard J., Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications. Cambridge University Press, UK, 1996.
4. Brito-Schimmel, P. y Carreras, C., Metodología para la Prospección Geofísica en Arqueología: Apuntes a Partir de los Trabajos de Ileso, Cantacó, Molins Nous y El Golero, Universitat Autònoma de Barcelona, LVCENTVM XXIX, pp 9-22, 2010.
5. Carta Geológico-Minera Queretaro F14-10, Servicio Geológico Mexicano, 1999.
6. Castañeda López, C., La Maqueta de Plazuelas Guanajuato. Revista Arqueología Mexicana, núm 46, pp 76-79, editorial raíces, México, 2000.
7. Castañeda López, C., Plazuelas Guanajuato, Revista Arqueología Mexicana, vol 16, núm 92, pp 44-47, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Guanajuato, México, 2008.
8. Dobrin, M.B., Introduction to geophysical prospecting, Editorial McGraw-Hill, 1988.
9. García Serrano, A., Prospección Magnetométrica en el Trapiche Cozoaltepec, Oaxaca, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2006.
10. GEOSOFT OASIS MONTAJ V 8.5. (2017).
11. Google Earth Versión 7.1.8.3036
12. Hernández Contreras, H.O.A., Estudio Magnetométrico en Tláhuac de la Subcuenca de Chalco, Zona Conurbada México D.F., Tesis de Licenciatura,

- Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2014.
13. Logachev, Aleksandr Andreevich, Exploración magnética, Editorial Reverte, Barcelona, 1978.
 14. Mishra, Dinesh Chandra., Gravity and Magnetic Methods for Geological Studies: principles, integrated exploration and plate tectonics, BS Publications, India, 2011.
 15. Morales, J., Castañeda, C., Cárdenas, E., Goguitchaichvili, A., Nuevas Evidencias sobre la Edad de Abandono del Sitio Arqueológico Plazuelas (Guanajuato, México) Mediante la Datación Arqueomagnética de un Piso Quemado, Arqueología Iberoamericana, vol 28, pp 40-45, Editor Publisher, 2015.
 16. Nava Flores, M., Análisis Armónico en la Detección de Fenómenos Geomagnéticos, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, México, 2005.
 17. Parga, P. J.J., Castillo, N.F., Inventario Físico de los Recursos Minerales del Municipio Pénjamo, Gto., Consejo de Recursos Minerales, Dirección de Minas de Guanajuato, Pachuca, Hgo., Abril 2003.
 18. Prontuario de Información Geográfica Municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Guanajuato, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Guanajuato, 2009. Recuperado de:
<http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825292997>
 19. Reynolds J. M., An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, Editorial Wiley-Blackwell, 2da Edición, 2011.
 20. Smekalova, T.N., Voss, O., Smekalov, S.L., MAGNETIC SURVEYING IN ARCHAEOLOGY. More than 10 years of using the Overhauser GSM-19 gradiometer, 2da Edición, Wormianum, 2008.
 21. Talib Oliver Cabrera, Determinación de Áreas Protegidas Caso de Estudio: Sierra de Pénjamo, Gto.", México, D.F., Ciudad Universitaria, Tesis Unam, 2011.

22. Telford W.M., Geldart L. P., Sheriff R. E., Applied Geophysics, Cambridge University Press, UK, 1990.

OTRAS FUENTES:

Castañeda López, Carlos. (2014). Plazuelas 2014 del Libro Zonas Arqueológicas en Guanajuato. Arqueólogo Carlos Castañeda López. issue: Recuperado de https://issuu.com/arquitectooctavio/docs/plazuelas_2014_del_libro_zonas_arqu

Gem System. Gem Systems Advanced Magnetometer. (2017). <http://www.gemsys.ca>

Geometrics.com (2017). G-858 MagMapper. Geometrics.com <http://www.geometrics.com/geometrics-products/geometrics-magnetometers/g-858-magmapper/>

Instituto Nacional de Antropología e Historia. (2017). ZONA ARQUEOLÓGICA PLAZUELAS. <http://inah.gob.mx/es/zonas/74-zona-arqueologica-plazuelas>

<http://cultura.guanajuato.gob.mx/zonas/info-plazuelas.php>

https://dga-ssp.guanajuato.gob.mx/atlas/ge/mapas/mapa_geo3.jpg

NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION. (2017). Magnetic Field Calculators. <https://ngdc.noaa.gov/geomag-web/#igrfwmmGeosoft>

Secretaría de Seguridad Pública. (2017). Fenómenos Geológicos. <http://seguridad.guanajuato.gob.mx/proteccion-civil/atlas-de-riesgos/fenomeno-geologico/#.WK4LT9LhDIV>

ANEXO

✓ D0:0	X	Y	TOP NT	BOT NT	GU	TIME	Date	LONG
0.0	204983.94	2258636.31	40868.134	40847.285	20.849	22:31:20	2015/01/08	-101.49.36.03
1.0	204983.86	2258637.30	40870.061	40852.992	17.069	22:30:58	2015/01/08	-101.49.36.03
2.0	204983.77	2258638.30	40874.569	40858.527	16.042	22:30:47	2015/01/08	-101.49.36.04
3.0	204983.68	2258639.30	40873.779	40855.598	18.181	22:30:40	2015/01/08	-101.49.36.04
4.0	204983.59	2258640.29	40873.237	40871.450	1.787	22:30:32	2015/01/08	-101.49.36.04
5.0	204983.51	2258641.29	40873.114	40862.865	10.249	22:30:24	2015/01/08	-101.49.36.05
6.0	204983.42	2258642.28	40873.519	40861.738	11.781	22:30:16	2015/01/08	-101.49.36.05
7.0	204983.33	2258643.28	40873.078	40871.930	1.148	22:30:09	2015/01/08	-101.49.36.05
8.0	204983.25	2258644.28	40872.276	40857.268	15.008	22:30:02	2015/01/08	-101.49.36.06
9.0	204983.16	2258645.27	40872.109	40854.740	17.369	22:29:54	2015/01/08	-101.49.36.06
10.0	204983.07	2258646.27	40870.969	40847.886	23.083	22:29:47	2015/01/08	-101.49.36.07
11.0	204982.98	2258647.27	40870.176	40846.700	23.476	22:29:40	2015/01/08	-101.49.36.07

Tabla 6A. Datos obtenidos con el magnetómetro móvil en el Juego de Pelota

LAT	ALT	MAG CORR BASE TOP	MAG CORR BASE BOT	IMT IGRF	DEC IGRF	INC IGRF	ANO MAG TOP	ANO MAG BOT
20.24.11.44	1842.0	40869.464	40848.615	41030.1	6.0	47.9	-168.6	-181.5
20.24.11.47	1842.0	40871.318	40854.249	41030.1	6.0	47.9	-158.8	-175.9
20.24.11.50	1842.0	40875.789	40859.747	41030.1	6.0	47.9	-154.3	-170.4
20.24.11.53	1842.0	40874.976	40856.795	41030.1	6.0	47.9	-155.1	-173.3
20.24.11.56	1842.0	40874.407	40872.620	41030.1	6.0	47.9	-155.7	-157.5
20.24.11.60	1842.0	40874.257	40864.008	41030.1	6.0	47.9	-155.9	-166.1
20.24.11.63	1842.0	40874.636	40862.855	41030.1	6.0	47.9	-155.5	-167.3
20.24.11.66	1842.0	40874.171	40873.023	41030.1	6.0	47.9	-156.0	-157.1
20.24.11.69	1842.0	40873.346	40858.338	41030.2	6.0	47.9	-156.8	-171.8
20.24.11.73	1842.0	40873.147	40855.778	41030.2	6.0	47.9	-157.0	-174.4
20.24.11.76	1842.0	40871.979	40848.896	41030.2	6.0	47.9	-158.2	-181.3
20.24.11.79	1842.0	40871.158	40847.682	41030.2	6.0	47.9	-159.0	-182.5

Tabla 6B. En las dos últimas columnas se observan los datos magnéticos corregidos por Variación diurna e IGRF.