

UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BÁSICAS

ESTUDIO EN LA DUDA, ACCIÓN EN LA FE.



**ESTUDIO MAGNÉTICO PARA ANÁLISIS Y
CARACTERIZACIÓN EN LA ZONA
ARQUEOLÓGICA DE LA VENTA,
HUIMANGUILLO, TABASCO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO GEOFÍSICO

PRESENTA:

MARÍA GUADALUPE PINTADO CORONEL

BRISEIDA HERNÁNDEZ IZQUIERDO

DIRECTOR DE LA TESIS:

DRA. ADRIANA GUADALUPE JIMÉNEZ VÁZQUEZ

Cunduacán, Tabasco.

Mayo 2025

LICENCIATURA - ESTUDIO MAGNÉTICO PARA ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN EN LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE LA VENTA, HUIMANGUILLO, TABASCO

INFORME DE ORIGINALIDAD

17%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	datospdf.com Internet	531 palabras — 3%
2	docplayer.es Internet	442 palabras — 2%
3	revistas.unlp.edu.ar Internet	238 palabras — 1%
4	alogro.files.wordpress.com Internet	218 palabras — 1%
5	hdl.handle.net Internet	183 palabras — 1%
6	www.fundaciongarciasineriz.es Internet	168 palabras — 1%
7	www.ptolomeo.unam.mx:8080 Internet	150 palabras — 1%
8	sinat.semarnat.gob.mx Internet	135 palabras — 1%
9	repositorio.ipicyt.edu.mx Internet	123 palabras — 1%
10	eprints.uanl.mx Internet	121 palabras — 1%



DIVISIÓN ACADÉMICA DE
CIENCIAS BÁSICAS

ESTUDIOS
TERMINALES

Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa, el día 1 del mes Mayo del año 2025, el que suscribe María Guadalupe Pintado Coronel alumna del Programa de Licenciatura en Ingeniería Geofísica con número de matrícula 172A19050, adscrito a la División Académica de Ciencias Básicas, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autora de la Tesis presentada para la obtención del título de Ingeniero Geofísico y titulada **“Estudio magnético para análisis y caracterización en la zona arqueológica de La Venta, Huimanguillo, Tabasco”** dirigida por la Dra. Adriana Guadalupe Jiménez Vázquez.

DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita. Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Villahermosa, Tabasco a 1 de mayo de 2025.



María Guadalupe Pintado Coronel

172A19050

Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa, el día 1 del mes Mayo del año 2025, el que suscribe Briseida Hernández Izquierdo alumna del Programa de Licenciatura en Ingeniería Geofísica con número de matrícula 172A19025, adscrito a la División Académica de Ciencias Básicas, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autora de la Tesis presentada para la obtención del título de Ingeniero Geofísico y titulada **“Estudio magnético para análisis y caracterización en la zona arqueológica de La Venta, Huimanguillo, Tabasco”** dirigida por la Dra. Adriana Guadalupe Jiménez Vázquez.

DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita. Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Villahermosa, Tabasco a 1 de mayo de 2025.



Briseida Hernández Izquierdo

172A19025



UJAT
UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”



División
Académica
de Ciencias
Básicas



DIRECCIÓN

Cunduacán, Tabasco; a 01 de mayo de 2025.

**C. MARÍA GUADALUPE PINTADO CORONEL
PASANTE DE LA LIC. EN INGENIERÍA GEOFÍSICA
PRESENTE**

Por medio del presente, me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que proceda a la impresión del trabajo titulado: **“ESTUDIO MAGNÉTICO PARA ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN EN LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE LA VENTA, HUIMANGUILLO, TABASCO”** dirigido por la Dra. Adriana Guadalupe Jiménez Vázquez, bajo la modalidad de titulación por **TESIS**. La comisión de revisión conformada por el Mtro. Guillermo Chávez Hernández, Mtro. Gelder Éneo Cámara Beauregard, Dra. Adriana Guadalupe Jiménez Vázquez y Mtro. Miguel Ángel Guzmán de la Cruz, liberó el documento en virtud de que reúne los requisitos para el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente.

Sin otro particular, reciba usted un cordial saludo.

ATENTAMENTE

**DRA. HERMICENDA PÉREZ VIDAL
DIRECTORA**



DIVISIÓN ACADÉMICA DE
CIENCIAS BÁSICAS

C.c.p. Archivo.

DIR´DRA.HPV/kfvg

Km.1 Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, A.P. 24, C.P. 86690, Cunduacán, Tab., México.
Tel/Fax: (993) 3581500 Ext. 6702,6701 E-Mail: direccion.dacb@ujat.mx

www.ujat.mx



UJAT
UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”



División
Académica
de Ciencias
Básicas



DIRECCIÓN

Cunduacán, Tabasco; a 01 de mayo de 2025.

**C. BRISEIDA HERNÁNDEZ IZQUIERDO
PASANTE DE LA LIC. EN INGENIERÍA GEOFÍSICA
PRESENTE**

Por medio del presente, me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que proceda a la impresión del trabajo titulado: **“ESTUDIO MAGNÉTICO PARA ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN EN LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE LA VENTA, HUIMANGUILLO, TABASCO”** dirigido por la Dra. Adriana Guadalupe Jiménez Vázquez, bajo la modalidad de titulación por **TESIS**. La comisión de revisión conformada por el Mtro. Guillermo Chávez Hernández, Mtro. Gelder Éneo Cámara Beauregard, Dra. Adriana Guadalupe Jiménez Vázquez y Mtro. Miguel Ángel Guzmán de la Cruz, liberó el documento en virtud de que reúne los requisitos para el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente.

Sin otro particular, reciba usted un cordial saludo.

ATENTAMENTE



DIVISIÓN ACADÉMICA DE
CIENCIAS BÁSICAS

**DRA. HERMICENDA PÉREZ VIDAL
DIRECTORA**

C.c.p. Archivo.

DIR'DRA.HPV/kfvg

Km.1 Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, A.P. 24, C.P. 86690, Cunduacán, Tab., México.
Tel/Fax: (993) 3581500 Ext. 6702,6701 E-Mail: direccion.dacb@ujat.mx

www.ujat.mx

Carta de Cesión de Derechos

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente la tesis de grado denominada **“Estudio magnético para análisis y caracterización en la zona arqueológica de La Venta, Huimanguillo, Tabasco”** de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de la tesis antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa mas no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en este documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco al día 1 del mes de mayo del año 2025.

AUTORIZÓ



María Guadalupe Pintado Coronel

172A19050

Carta de Cesión de Derechos

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente la tesis de grado denominada **“Estudio magnético para análisis y caracterización en la zona arqueológica de La Venta, Huimanguillo, Tabasco”** de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de la tesis antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa mas no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en este documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco al día 1 del mes de mayo del año 2025.

AUTORIZÓ



Briseida Hernández Izquierdo

172A19025

DEDICATORIA

A Dios, por concederme la sabiduría y entendimiento en toda mi historia de formación académica y con ella formarme con los mejores valores de vida. Por darme la salud y el amor, por enseñarme que siempre tenemos un espacio para amarlo y servirle desde el lugar en donde estemos. Todo es gracia, señor, gracias a ti.

A mis queridos padres. Este logro académico es un reflejo del incansable esfuerzo que han dedicado para brindarme una educación sólida. Cada sacrificio que han hecho con amor, cada día de trabajo duro y cada decisión que han tomado en mi nombre son el cimiento de mi formación profesional. Valoro su dedicación y compromiso con mi educación más allá de las palabras. Esta tesis es un testimonio de su sacrificio y amor, y me enorgullece poder honrarlos de esta manera. Gracias por ser los faros de mi vida, por iluminar el camino hacia el conocimiento y por inculcarme la importancia de los valores, el esfuerzo y la educación; les amo profundamente con todo lo que soy.

A mi amado esposo Ezequiel, que es mi lugar seguro en los días turbulentos y de desánimo, y la razón de mi sonrisa en los mejores momentos. Esta tesis se teje con el hilo de tu amor y apoyo, un reflejo de la seguridad que me brindas. Gracias por apoyarme en mis momentos de flaqueza, por ser mi impulso para llegar a la meta de mi carrera profesional y brindarme tu amor sin medidas. Te amo con mi vida. ¡Hasta el cielo, no paramos!

A mis queridos hermanos Ana e Iván, que siempre estuvieron con una sonrisa en los momentos difíciles de esta pequeña aventura. Gracias por su cercanía y acompañamiento en todo momento, el sueño de nuestros amados padres por fin se cumplió en los tres.

A mis queridos Geolupitos, ese grupo diverso de amigos en la universidad; Briseida, Belén, Paola, Yader, Kevin, Javier y Aarón, cada uno con una historia personal y quienes fueron mi mayor red de apoyo, en nuestras dudas siempre estuvimos el uno para el otro. Gracias por cada segundo compartido, por las risas, desvelos, preocupaciones y sueños cumplidos. Les quiero mucho, donde quiera que estén sigan siendo buenos y felices.

Este sueño que hoy lo hago realidad, también lo dedico para mí, porque, aunque el camino se haya tornado difícil casi llegando a la meta, lo logré y crucé la línea.

Lupita Pintado.

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía espiritual en este largo camino, y con el cual superé los momentos difíciles para levantarme y culminar con éxito. Gracias por ser mi fortaleza, gracias por llenarme cada día de ti.

Para uno de mis principales apoyos en la culminación de este proyecto, mi padre, el señor Rafael Hernández Martínez. Por ser mi fuente de inspiración, motivación y confianza. Gracias por enseñarme el valor de la educación y brindarme todo tu apoyo para alcanzar mis metas. Esta tesis es una forma de agradecerte por tu constante apoyo y por creer en mí y brindarme la oportunidad de culminar mis estudios.

A mi querida madre, la señora María Concepción Izquierdo Vasconcelos, cuya dedicación y amor han sido la base de mi vida y éxito académico. Gracias por ser mi guía, mi refugio y mi inspiración en cada paso de este largo camino.

Este logro es también de ustedes, porque cada paso que di fue posible gracias a su apoyo incondicional y aliento constante. Los amo mucho y toda mi vida estaré agradecida con ustedes por todo el apoyo brindado durante estos años. De ustedes es el éxito y triunfo de este trabajo.

Para mi querida abuela, mi mami, la señora María Jesús Vasconcelos Almeida, tu bendición a diario a lo largo de mi vida me protege y me lleva por el camino del bien, te amo mucho.

Para mi tía, que ha sido mi amiga incondicional en todos estos años, María del Carmen Izquierdo Vasconcelos agradezco profundamente el cariño y la dedicación que me has brindado a lo largo de los años. Gracias por ser mi confidente y por estar siempre ahí para mí.

A mis hermanos, Betzy y Rafael, que con su amor me han enseñado a salir adelante. Gracias por su paciencia, gracias por preocuparse por su hermana mayor, pero sobre todo gracias por estar en otro momento tan importante en mi vida.

Briseida Hernández.

AGRADECIMIENTOS

A cada uno de nuestros profesores, con quienes compartimos horas de estudio y a quienes agradecemos desde lo más profundo del corazón por siempre transmitirnos sus conocimientos, resolver nuestras inquietudes y dudas durante esta trayectoria, por siempre brindarnos su apoyo para ser cada vez mejores y culminar con éxito nuestros estudios. Sigamos formando profesionales, pero aún más profesionales integrales, donde el ejemplo sea la principal enseñanza para cada alumno.

Con el más sincero respeto y admiración, queremos expresar nuestro profundo agradecimiento a nuestra directora de tesis la Dra. Adriana Guadalupe Jiménez Vázquez, por su paciencia y ayuda invaluable durante la realización de esta misma. Su experiencia y orientación fueron fundamentales para llevar a cabo un trabajo de calidad. Deseamos siga creciendo en conocimiento y experiencia académica.

De una manera muy especial expresamos nuestro más sincero agradecimiento al M.C. Luis Alfredo Madrigal Avalos, pieza fundamental en nuestro trabajo de tesis. Gracias por brindarnos su apoyo y orientación para resolver nuestras dudas e inquietudes a lo largo de todo el levantamiento y procesado de los datos de esta tesis, fue en verdad muy grato poder compartir con usted una parte importante de este proyecto, quedando una estrecha amistad. ¡Gracias por todo lo compartido!

Al Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) por brindarnos el acceso a la Zona Arqueológica de La Venta, en Huimanguillo Tabasco, y poder llevar a cabo el levantamiento de los datos magnéticos, que sabemos podrá ser de interés para más líneas de investigación que pudieran abrirse para continuar estudiando este importante vestigio para Tabasco.

CONTENIDO

Resumen	17
Abstract	18
CAPITULO 1. GENERALIDADES	19
Introducción	19
1.1. Justificación	22
1.2. Planteamiento del problema	22
1.3. Hipótesis	23
1.4. Objetivo general	24
1.5. Objetivos específicos	24
1.6. Ubicación del área de estudio	25
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO	26
2.1. Antecedentes	26
2.2. Fundamentos teóricos de la magnetometría	30
2.3. El campo magnético de la Tierra	30
2.4. Origen y componentes del campo magnético	32
2.5. Elementos del campo magnético	33
2.6. Variaciones del campo magnético	35
2.6.1. Variación diurna	35
2.6.2. Variación lunar	36
2.6.3. Variación secular	37
2.7. Magnetización	38
2.7.1. Magnetización inducida	38
2.7.2. Magnetización Remanente	39
2.8. Propiedades magnéticas de las rocas	41
2.8.1. Diamagnetismo	41
2.8.2. Paramagnetismo	41
2.8.3. Ferromagnético	42
2.8.4. Antiferromagnético	43
2.8.5. Ferrimagnético	43
2.9. Susceptibilidad de rocas y minerales	44
2.10. Magnetómetros de Torsión, Fluxgate y Resonancia	45
2.11. Corrección de datos	48

2.11.1. Corrección por variación diurna.....	48
2.11.2. Corrección IGRF.....	49
CAPÍTULO 3. MARCO GEOLÓGICO	51
3.1. Geología Regional	51
3.2. Geología Local.....	52
3.2.1. Estratigrafía.....	55
3.2.2. Petrología de artefactos en la zona arqueológica de La Venta.....	56
CAPITULO 4. METODOLOGÍA.....	60
4.1. Instrumentación y equipos	60
4.1.1 Magnetómetro de precesión libre de protones; magnetómetro G-857 (Geometrics)....	60
4.1.2. GPS Garmin eTrex 10.....	61
4.2 Levantamiento y adquisición de datos.....	62
4.3 Procesamiento de datos.....	64
4.3.1 Generación de mapas de anomalías magnéticas	65
4.4 Análisis de filtros	69
4.4.1. Reducción al polo (RTP).....	69
4.4.2. Filtro de señal analítica	72
4.4.3. Filtro pasa altas.....	73
4.4.4. Primera derivada vertical	75
4.5. Deconvolución de Euler localizada	77
4.6. Perfiles de interés.....	82
CAPITULO 5. DISCUSIÓN Y RESULTADOS.....	84
5.1. Análisis de anomalías y Deconvolución de Euler localizada	84
5.2. Modelado Magnético en 2D (GM-SYS).....	85
5.2.1. Perfil S-A1 y modelo geológico.....	85
5.2.2. Perfil S-B1 y modelo geológico.....	88
CAPITULO 6. CONCLUSIONES.....	90
Referencias	93
Anexos.....	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica y delimitación de la zona arqueológica de La Venta.	16
Figura 2. a) Ubicación de la zona arqueológica de La Venta y zonas aledañas (A. Boxt et al., 2012;). b) Distribución de los complejos de la zona arqueológica de La Venta (Maps of Mexico, 2006).	21
Figura 3. Área de estudio Zona Arqueológica de La Venta.	25
Figura 4. a) Anomalía observada dentro de uno de los complejos en la prospección magnética realizada en la zona Arqueológica La Venta, interpretada como un monumento escultórico (Barba,1998). b) Respuesta magnética de un experimento realizado sobre un monumento escultórico de ubicación conocida (Barba, 1988).	29
Figura 5. Mapa topográfico del complejo D dentro de la Zona Arqueológica de La Venta (Barba, 1988).	29
Figura 6. Modelo del campo geomagnético (Reynolds,, 2011).	31
Figura 7. Elementos del campo magnético (McElhinny, 2000).	34
Figura 8. Alineación atómica de las propiedades diamagnéticas y paramagnéticas (Robinson & Coruh, 1988).	42
Figura 9. Alineación atómica de las propiedades ferromagnético, antiferromagnético y paramagnético (Robinson & Coruh, 1988).	43
Figura 10. Principio de funcionamiento básico de un magnetómetro de torsión o equilibrio (Reynolds, 2011).	45
Figura 11. Principio de funcionamiento básico del Magnetómetro Fluxgate (Reynolds, 2011).	46
Figura 12. Principios del funcionamiento de un magnetómetro de precesión de protones (Reynolds, 2011).	47
Figura 13. Servicio Geológico Nacional. (2008). Carta geológico-minera estados de Chiapas y Tabasco [Mapa]. 1:500.000. Chiapas y Tabasco. Servicio Geológico Nacional.	51
Figura 14. Mapa de localización regional del área de estudio y de la planicie costera tabasqueña (Jiménez Salas, 1990).	52
Figura 15. Geología del municipio de Huimanguillo (INEGI, 2010).	54
Figura 16. Tipos de rocas en el municipio de Huimanguillo, Tabasco (CONAGUA, 2023).	55
Figura 17. Yacimientos de serpentinita dentro del área de Mesoamérica (Robles Camacho et al., 2008).	58
Figura 18. Magnetómetro G-857 Geometrics®.	60
Figura 19. Ubicación de los perfiles en el área de estudio.	62
Figura 20. Distribución del levantamiento de los perfiles magnéticos en mapa topográfico.	66
Figura 21. Mapa de campo magnético total (Datos crudos).	67
Figura 22. Mapa de campo magnético total corregido.	68

Figura 23. Mapa de reducción al polo aplicado a los datos magnéticos corregidos.....	71
Figura 24. Mapa de Señal Analítica aplicado a los datos magnéticos corregidos.....	72
Figura 25. Mapa de filtro pasa altas aplicado al grid de campo magnético corregido.	74
Figura 26. Mapa de derivada vertical aplicada al grid de campo magnético corregido.	76
Figura 27. Mapa de Deconvolución de Euler con valores de profundidades.	79
Figura 28. Mapa de Deconvolución de Euler con valores de índice estructural.	81
Figura 29. Mapa de perfiles magnéticos sobre puestos sobre el grid de señal analítica.	82
Figura 30. Modelo 1. Perfil S-A1	86
Figura 31. Modelo 2. Perfil S-B1	89
Figura 32. Toma de datos en la Zona Arqueológica de La Venta, Huimanguillo, Tabasco.	96
Figura 33. Brigada de trabajo para el levantamiento de los datos Magnéticos, Organización de equipos y preparación de instrumentos de medición.....	96

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
 México.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de magnetización remanente (Reynolds, 2011).	39
Tabla 2. Susceptibilidades de rocas y minerales (Reynolds, 2011).....	44
Tabla 3. Detalles técnicos.....	60
Tabla 4. Características físicas y de rendimiento del GPS Garmin eTrex 10.	61
Tabla 5. Mapas y memoria del GPS Garmin eTrex 10	61
Tabla 6. Ejemplo de conjunto de datos en Excel de un perfil tomado en campo, datos procesados en Excel.	64
Tabla 7. Valores de índice estructural definidos por Oasis Montaj®.	78
Tabla 8. Valores de índice estructural (Reynolds, 2011).	80
Tabla 9. Litología y susceptibilidades magnéticas usadas en el modelo del perfil S-A1.....	87
Tabla 10. Litología y susceptibilidades magnéticas usadas en el modelo del perfil S-B1.	89

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

“ESTUDIO MAGNÉTICO PARA ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN EN LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE LA VENTA, HUIMANGUILLO, TABASCO”

Resumen

La zona arqueológica de La Venta en Huimanguillo, Tabasco es el principal sitio arqueológico ceremonial de la Cultura Olmeca. Se levanta sobre una isla en medio de la región pantanosa que forma el río Tonalá. El campo de investigación en torno a la cultura arqueológica Olmeca es de reciente creación, en comparación con otras áreas de especialización dentro de la arqueología mesoamericana. Aunque existe una modesta bibliografía sobre diversos aspectos de la civilización Olmeca, aún existe un número considerable de problemas por resolver, lo cual se refleja en nuestro actual conocimiento del tema.

El presente estudio consistió en realizar una serie de levantamientos de datos magnéticos en la zona arqueológica de La Venta, empleando dos magnetómetros de precisión protónica Geometrics G-857 con una sensibilidad de 0.1 nT, dentro de un área aproximada de 2 km². Los datos magnéticos se adquirieron en modalidad de perfil, obteniendo en total 7 perfiles que cubrieron las principales zonas de interés en el área. Se analizó la variación del campo magnético a partir del procesamiento de los datos y se usó el método de Deconvolución de Euler Localizada para estimar valores de profundidad e índice estructural de cuerpos u objetos a partir del filtro de señal analítica aplicado a los datos de campo magnético corregido.

Con los valores obtenidos se proyectó la creación de dos perfiles y se obtuvieron dos modelos de tipo geofísico-geológico, donde se comprobó que están constituidos por dos capas principales de suelo arcillo-arenoso, lutita y arenisca. Así mismo, se encontraron cuerpos esféricos irregulares constituidos de basalto y serpentinita que, en su época de apogeo fueron transportados desde las ubicaciones de otras culturas prehispánicas, cerros y yacimientos para utilizarlos en esculturas, provocando así algunas de las anomalías magnéticas presentes en la zona de estudio.

Palabras claves: Magnético, caracterización, geología, arqueológica, La Venta.

Abstract

The archaeological zone of La Venta in Huimanguillo, Tabasco is the main ceremonial archaeological site of the Olmec Culture. It stands on an island in the middle of the swampy region formed by the Tonalá River. The field of research on the Olmec archaeological culture is of recent creation, in comparison with other areas of specialization within Mesoamerican archaeology. Although there is a modest bibliography on various aspects of Olmec civilization, there are still a considerable number of problems to be solved, which is reflected in our current knowledge of the subject.

The present study consisted of a series of magnetic data surveys in the archaeological zone of La Venta, using two Geometrics G-857 precision proton magnetometers of 0.1 nT sensitivity, in an area of approximately 2 km². The magnetic data were acquired in profile mode, obtaining a total of 7 profiles covering the main zones of interest in the area. The magnetic field variation it was analysed from the data processing and the Localised Euler Deconvolution method was used to estimate depth and structural index values of bodies or objects from the analytical signal filter applied to the corrected magnetic field data.

With the values obtained, the creation of two profiles was projected and two geophysical-geological models were obtained, where it was found that they are constituted by two main layers of clay-sandy soil, shale and sandstone. Likewise, irregular spherical bodies made up of basalt and serpentinite were found, which in their heyday were transported from the locations of other pre-Hispanic cultures, hills and deposits to be used in sculptures, thus causing some of the magnetic anomalies present in the study area.

Keywords: Magnetic, characterization, geology, archaeological, La Venta.

CAPITULO 1. GENERALIDADES

Introducción

Históricamente, cuando un arqueólogo sospechaba que podría haber un yacimiento importante bajo la superficie, establecía el lugar donde iniciaría su excavación, impulsado por la expectativa de un posible gran hallazgo. Al transcurrir el tiempo y el avance tecnológico, se han desarrollado métodos indirectos que permiten al experto determinar con antelación cuáles son sus zonas de extracción. La exploración geofísica utiliza métodos físicos y matemáticos para analizar el subsuelo. Entre sus múltiples aplicaciones, los métodos geofísicos contribuyen a identificar y delimitar objetos, así como a entender la disposición de las estructuras del subsuelo.

En los estudios arqueológicos se han utilizado varias técnicas geofísicas basadas en métodos magnéticos, eléctricos, sísmicos o gravimétricos. Los métodos magnéticos y gravimétricos, conocidos también como métodos potenciales o de prospección pasivos, usan el campo magnético y gravitacional natural de la Tierra y son ideales para un estudio arqueológico porque no introducen ninguna perturbación en el terreno. La aplicación de estos métodos potenciales en la arqueología sirve para "cuidar" lugares que pudieran ser destruidos con las técnicas tradicionales de excavación (Breiner & Coe, 1972). El grado de interés de la Arqueología abarca desde unos cuantos centímetros hasta algunas pocas decenas de metros bajo la superficie del terreno. Por este motivo, se han utilizado recientemente de forma extensa técnicas que estudian objetivos a profundidades someras en las investigaciones arqueológicas de México y de algunas partes del mundo (Argote Espino, 2008).

Por ello, este trabajo propone realizar una serie de levantamientos de datos magnéticos, utilizando el método geofísico de prospección magnética en la zona arqueológica de La Venta, Huimanguillo, Tabasco (Figura 1), con la finalidad de seguir complementando y actualizando la información adyacente de investigaciones realizadas en esta área de estudio. Así, al término de las correspondientes interpretaciones y correcciones de datos, presentar un modelo geológico de la zona arqueológica donde se pueda definir, caracterizar y ubicar zonas con anomalías magnéticas presentes que puedan ser de interés arqueológico para el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH).

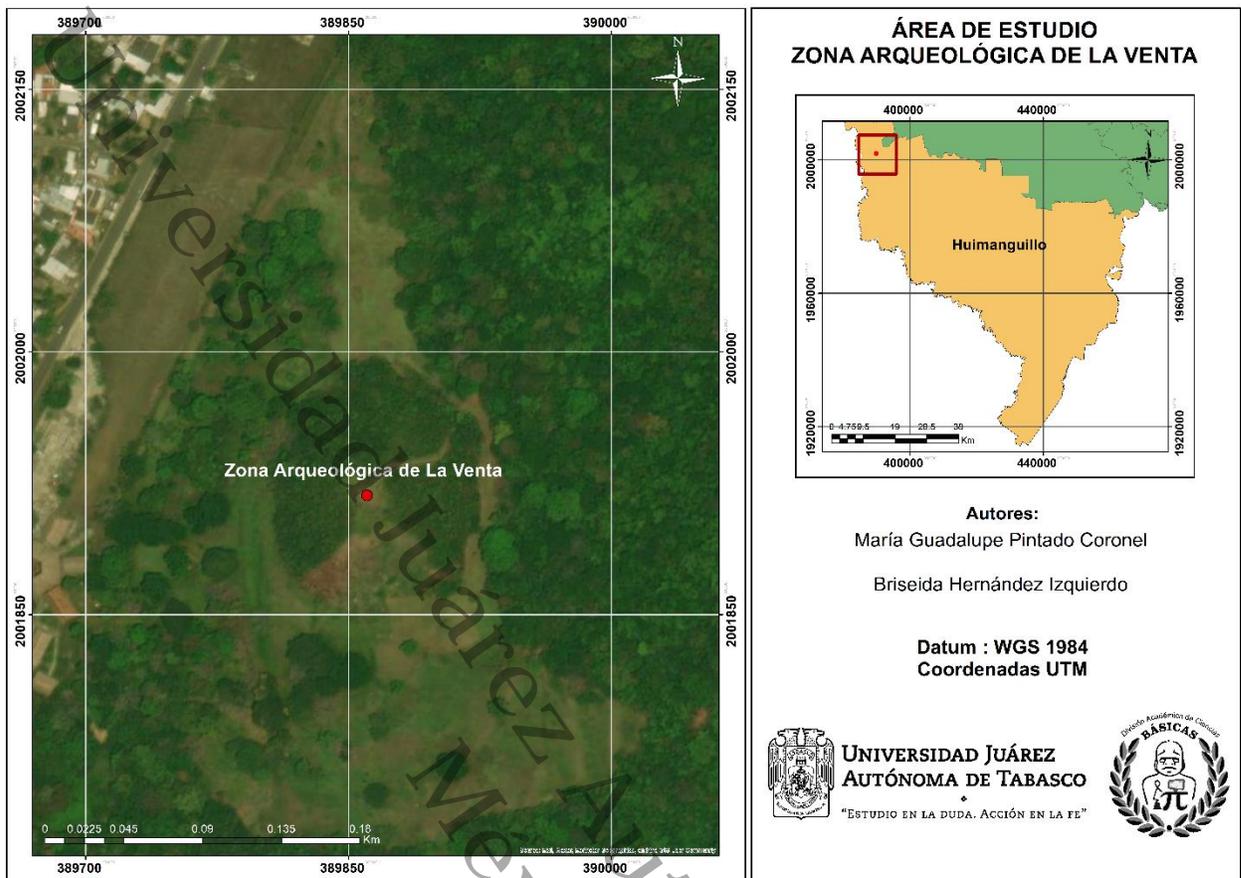


Figura 1. Ubicación geográfica y delimitación de la zona arqueológica de La Venta.

Comprender el desarrollo cultural prehistórico en la región de La Venta ha sido durante mucho tiempo un desafío formidable. Gran parte de la región es un terreno bajo y pantanoso que hasta hace poco era inaccesible. El clima cálido y húmedo de la región es hostil a la preservación de los materiales orgánicos; grandes centros arqueológicos, como el sitio de La Venta, fueron escenario de grandes proyectos de construcción durante la antigüedad, perturbando frecuentemente depósitos arqueológicos anteriores (González Lauck, 2000). Como resultado, ha sido difícil identificar estratos culturales intactos que abarquen largos períodos de tiempo.

Este tipo de investigaciones suponen un giro en todos los trabajos de arqueología realizados hasta el momento en México y en muchas partes del mundo. Además, la prospección geofísica es un método no invasivo y relativamente rápido, y la información obtenida del sitio arqueológico permanece intacta para futuras investigaciones.

Es así que en las zonas donde sea necesario realizar una caracterización rápida y no sea posible excavar por problemas de tipo patrimonial, pueden estudiarse y modelarse mediante métodos

geofísicos, evitando así la pérdida de información importante y el deterioro de las estructuras arqueológicas.

La Figura 2.a) muestra la ubicación de la zona arqueológica de La Venta, así como lugares y ríos por los cuales se encuentra rodeada. Mientras que la imagen 2.b) muestra el plano actual de la distribución por complejos en la zona arqueológica (A. Boxt et al., 2012; Maps of Mexico, 2006).

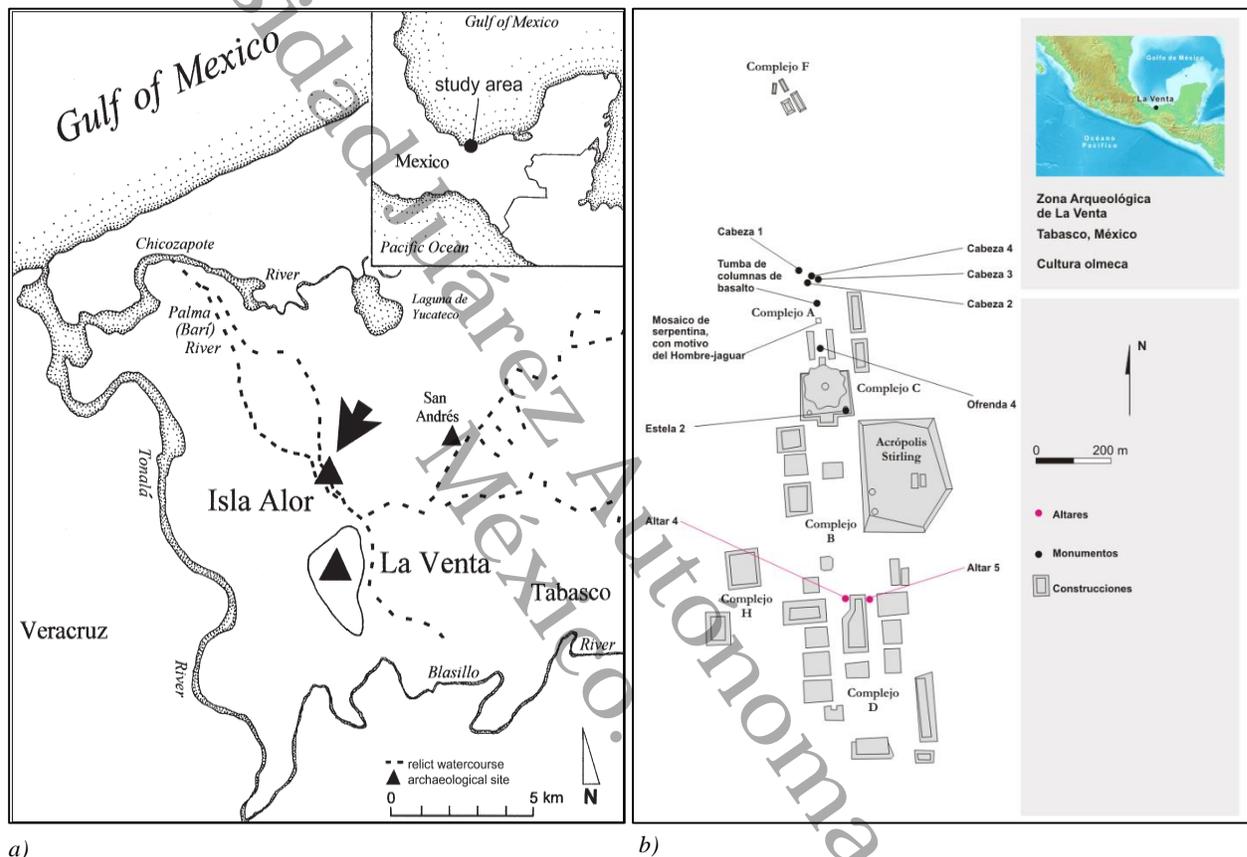


Figura 2. a) Ubicación de la zona arqueológica de La Venta y zonas aledañas (A. Boxt et al., 2012); b) Distribución de los complejos de la zona arqueológica de La Venta (Maps of Mexico, 2006).

1.1. Justificación

La importancia de llevar a cabo el estudio en esta zona radica en que actualmente conocemos muy pocos estudios del área que involucren datos magnéticos. Sin embargo, con esta aportación buscamos seguir complementando la información de este vestigio arqueológico desde un panorama geofísico-geológico, donde se incluya información actualizada de datos magnéticos en comparación con otras aportaciones ya existentes y presentar un modelo geológico de algunas zonas de interés a partir de los datos magnéticos obtenidos.

Con base a los objetivos establecidos en este estudio, tenemos claro que en los estudios arqueológicos buscamos cuerpos con tamaños no mayores a 20 m y profundidades con rangos de entre 3 a 20 m, características distintas a las que comúnmente se tienen en estudios geofísicos más sofisticados.

1.2. Planteamiento del problema

El estudio de las sociedades culturales prehistóricas deriva de particular relevancia, exclusivamente en lo que respecta a expresiones autóctonas o nativas que se han transformado de diversas maneras en distintas regiones del mundo. La civilización Olmeca es uno de los ejemplos más arcaicos y complejos de la historia del México prehispánico. Esta civilización ha sido objeto de múltiples clasificaciones, siendo la más significativa la de “Cultura Madre de Mesoamérica”. (González Lauck, 2000) Sin embargo, con base en los conocimientos que se conocen en la actualidad, dichas clasificaciones son demasiado simples para una adecuada caracterización de esta particular manifestación cultural del México antiguo. Sin embargo, dichas clasificaciones son demasiado simples para caracterizar adecuadamente esta manifestación cultural del México antiguo, teniendo en cuenta los conocimientos actuales. El sitio arqueológico de “La Venta”, ubicado en el municipio de Huimanguillo, en el estado de Tabasco, es el sitio ceremonial más relevante de la cultura Olmeca y se encuentra emplazado sobre una isla en medio de la región pantanosa que forma el río Tonalá. (A. Boxt et al., 2012).

El campo de investigación de la cultura olmeca es de reciente formación en comparación con otras áreas de especialización dentro de la arqueología mesoamericana. Aunque se encuentra una modesta bibliografía sobre múltiples aspectos de dicha civilización, aún existen muchos problemas por resolver desde el punto de vista científico. Son insuficientes los trabajos de campo

realizados en la región olmeca que involucren disciplinas que complementen lo que ya se conoce o que permitan comprender el desarrollo de esta cultura mexicana tan importante.

Nuestra problemática está enfocada a la identidad cultural de la zona arqueológica de La Venta, para ello este trabajo propuso utilizar el método geofísico de magnetometría realizando una serie de levantamientos de datos magnéticos que permita aportar un modelo geofísico-geológico en la zona arqueológica de La Venta, además de continuar aportando datos de interés arqueológicos para esta zona a partir del análisis de mapas del campo magnético, mapas topográficos y caracterización con ayuda de la geofísica.

1.3. Hipótesis

Los datos magnéticos permiten analizar las variaciones magnéticas presentes en la zona de estudio e identificar zonas con anomalías de interés geológico y arqueológico. Por consiguiente, tras procesar estos datos, obtener un modelo geológico que permita comprender el comportamiento de dichas anomalías.

1.4. Objetivo general

Proponer un modelo geofísico-geológico de la zona arqueológica La Venta, Huimanguillo, Tabasco, por medio de la adquisición y procesamiento de datos de prospección magnética que permita puntualizar anomalías magnéticas presentes en el área de estudio.

1.5. Objetivos específicos

- Realizar una serie de levantamientos de datos magnéticos en el área de estudio para analizar las alteraciones del campo magnético en la zona arqueológica, a partir de la adquisición de los datos, y representarlos en un mapa de campo magnético.
- Interpretar perfiles de datos magnéticos y crear un mapa de anomalías magnéticas donde se ubiquen zonas puntuales de interés arqueológico.
- Crear un modelo geofísico-geológico a partir de los datos magnéticos que explique la posible causa de la anomalía magnética y su geometría.
- Analizar la posible presencia de vestigios arqueológicos de interés para el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) con base a los resultados obtenidos.

1.6. Ubicación del área de estudio

La Venta es una zona arqueológica situado en el extremo noroeste del estado mexicano de Tabasco, a unos 15 kilómetros de la costa del Golfo de México. Este vestigio Arqueológico se ha localizado en la zona UTM 15N, con coordenadas 2001914.10m N y 389864.60m E. La Venta es el principal sitio arqueológico de la cultura olmeca y alcanzó su época de apogeo entre los años 900 y 400 a. C. El sitio La Venta está situado en un montículo de unos 20m sobre el nivel de las tierras bajas inundables que lo rodean. Estas tierras bajas están formadas por una compleja y dinámica red fluvial y lagunar que incluye ríos, arroyos, lagunas costeras, pantanos, manglares y lagunas de agua dulce con numerosa flora y fauna comestibles (Jiménez Salas, 1990). La superficie de la isla de La Venta es de apenas 5,2 km². En el centro de la isla, los edificios forman una plaza en forma de rectángulo irregular, con una pirámide principal ubicada en el centro, y montículos y monumentos en el norte y en el sur (Figura 3).

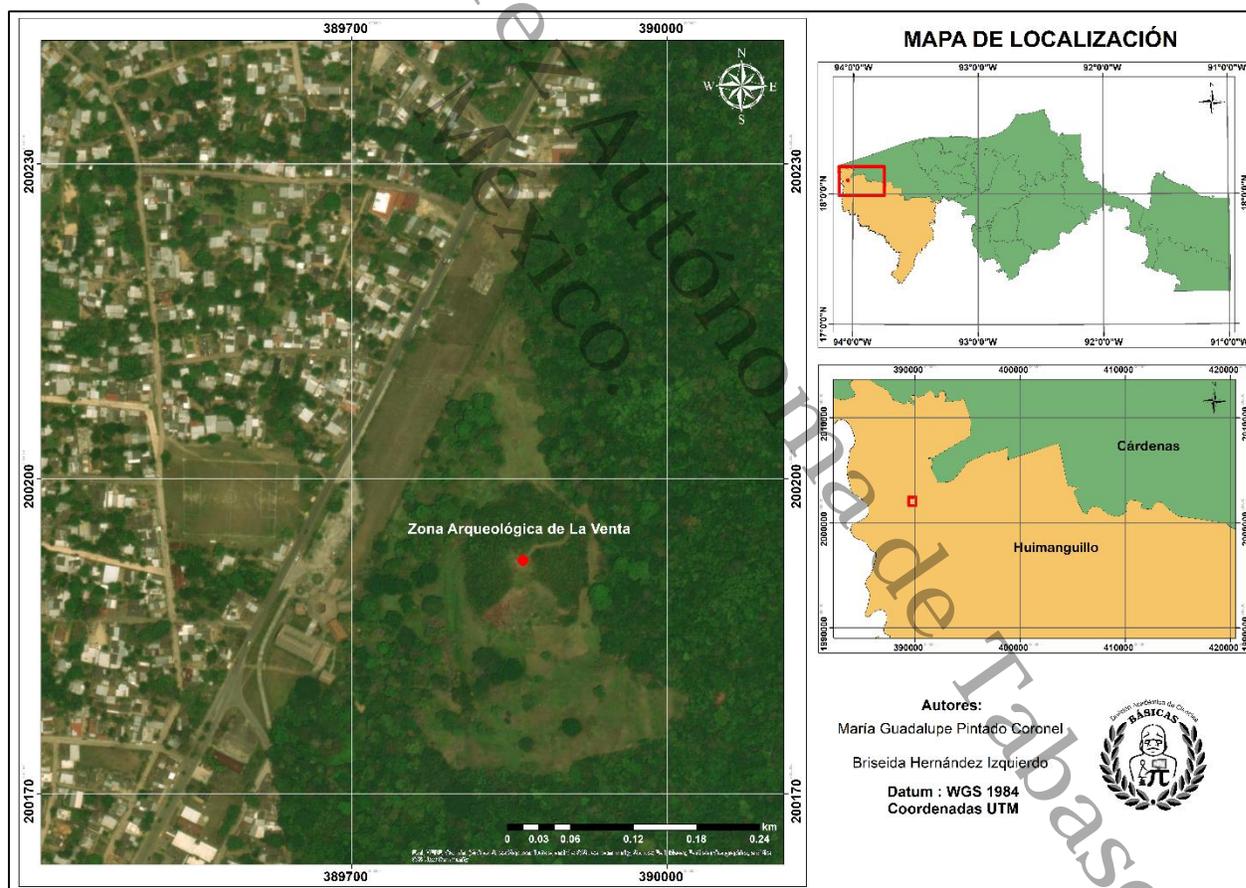


Figura 3. Área de estudio Zona Arqueológica de La Venta.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

En los estudios arqueológicos se han utilizado varias técnicas geofísicas basadas en métodos magnéticos, eléctricos, sísmicos o gravimétricos. El método de prospección magnética, ha demostrado ser con mucho la más práctica y útil en estudios arqueológicos (Breiner & Coe, 1972). Aunque no es una herramienta común dentro de los kits arqueológicos, los magnetómetros se han utilizado desde ya hace varias décadas, en varios sitios como en el mediterráneo donde ayudaron a encontrar la antigua Sybaris, en Inglaterra y en América del Norte (Rainey, 1968). En la actualidad, este método geofísico es uno de los más utilizados en arqueología, posteriormente del método gravimétrico; esto es gracias al desarrollo de nuevos magnetómetros portátiles basados en fenómenos físicos (Argote Espino, 2008). Una de las principales ventajas de este método es su naturaleza no invasiva, lo que lo hace más adecuado que otros métodos que pueden resultar más invasivos. Además, se caracteriza por su bajo valor económico y por su capacidad de operación rápida y sencilla en el campo. En el entorno de una investigación geofísica de este tipo, los rasgos de interés arqueológico son los principales elementos a considerar.

Dentro de la geofísica, se sabe que al efectuar un método de prospección se pueden obtener diversos datos a escalas regionales y locales, es decir, de un área extensa o de una zona delimitada. De acuerdo con los objetivos marcados, se pueden localizar estructuras u objetivos con tamaños y profundidades de rasgos mucho menores que los comunes en la geofísica, ya que en esta última se buscan objetivos de kilómetros de profundidad. Por otro lado, en arqueología se buscan objetivos de tamaño no mayor a 10 metros y una profundidad menor a 120 metros.

Las anomalías magnéticas de importancia en la exploración arqueológica son causadas por las propiedades contrastantes de objetos arqueológicos y del suelo, agua o rocas que lo cubren (Breiner & Coe, 1972). La cantidad de la mineral magnetita (muy común) así como su historia mecánica y térmica, generalmente determinan el tamaño de la perturbación o anomalía en el campo magnético de la Tierra que en realidad mide el magnetómetro. Varias rocas, suelos y objetos extraños al sitio poseen diferentes propiedades magnéticas debido a las cantidades muy variables de magnetita (Breiner & Coe, 1972). Tal es el caso de rocas enterradas, muros, artefactos de varios tipos, tumbas y trincheras que presentan anomalías magnéticas más destacadas siendo causadas por este tipo de materiales naturales que se han sometido a calentamiento.

Los objetos de arcilla que han sido sometidos a altas temperaturas, como ladrillos, tejas, cerámica y fogatas, logran alcanzar un magnetismo remanente como consecuencia de la alineación de sus elementos magnéticamente susceptibles con el campo magnético terrestre durante el proceso de enfriamiento (Breiner & Coe, 1972); tal magnetismo remanente es también propiedad de las rocas que han sido calentadas en la naturaleza especialmente de las rocas volcánicas o ígneas. Si bien el estudio de la componente de campo magnético total ha sido ampliamente utilizado, la técnica que han empleado con mayor periodicidad los arqueólogos es la de gradiente magnético. Para ello, utilizan un gradiómetro y microcomputadoras equipadas con sistemas automatizados de recolección de datos, con el propósito de evitar los efectos temporales en el campo magnético (Argote Espino, 2002).

En México, los estudios geofísicos más destacados han sido realizados por el Instituto de Geofísica, el Instituto de Investigaciones Antropológicas y la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Uno de los primeros estudios se llevó a cabo en el sitio arqueológico de San José Ixtapa, en Chiapas, por el Dr. Luis Barba y Morrison Limón (Limón & Barba Pingarrón, 1981). En este estudio se realizó un levantamiento magnético en una zona con materiales arqueológicos superficiales (cerámica y materiales de construcción), debido a las condiciones naturales del terreno (suelos arcillosos). Se observaron grandes contrastes entre los restos arqueológicos y el suelo circundante. A partir de los datos de campo total obtenidos, se generó un mapa de distribución de anomalías.

Dentro de los trabajos de rescate y recuperación de la zona arqueológica de La Venta por parte del Instituto de Cultura del Gobierno del Estado de Tabasco y la Dirección de Monumentos Prehispánicos del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) y en conjunto con el laboratorio Móvil del Instituto de Investigaciones Antropológicas de la UNAM, se propuso un proyecto piloto de distintas técnicas de prospección en la zona, con la intención de evaluar la factibilidad de su aplicación a mayor escala. El objetivo marcado fue de carácter experimental, pues se probaron distintas técnicas de prospección geofísica, dentro de ellas la prospección magnética y técnicas químicas en las condiciones particulares de la Zona Arqueológica de La Venta, Tabasco con el fin de planear un estudio futuro a mayor escala (Barba Pingarrón, 1988).

El propósito fundamental de la presente investigación radica en la localización de elementos escultóricos confeccionados a partir de rocas basálticas y cubiertos por sedimentos de origen no

volcánico. Estos elementos presentan un contraste magnético que ha sido detectado, lo que plantea interrogantes sobre su naturaleza y origen. Se detectaron anomalías magnéticas de gran magnitud que se relacionan con la probable causa de dos efectos: alineaciones de piedras y magnetismo termo remanente (relacionado con la presencia de carbón y ceniza), que indican restos de actividad humana relacionada con el fuego (Barba Pingarrón, 1988). Además, observaron una anomalía magnética concentrada en uno de los complejos, como ahora se les llama, la cual fue interpretada como la respuesta de un monumento escultórico enterrado. Esto fue deducido a partir de un experimento realizado sobre un monumento escultórico enterrado dentro de la misma zona arqueológica cuya ubicación y composición eran conocidas, ya que el contraste de propiedades magnéticas entre la roca basáltica que se utilizó para hacerlas y los sedimentos que la cubrían eran una hipótesis en base a datos de trabajos anteriores tanto de Breiner y Coe en San Lorenzo (Breiner & Coe, 1972), así como de Morrison y Barba en el montículo principal (Limón & Barba Pingarrón, 1981). Sobre este elemento se realizó un levantamiento magnético utilizando una retícula similar a la empleada en el resto de la investigación, con lecturas cada cuatro metros.

Como se evidencia en la Figura 3, al realizar la comparación de las anomalías de ambos casos, se observa una alta similitud entre ellas, con una variación en los valores de la intensidad magnética de apenas 100 gamas. En este contexto, las interpretaciones son de naturaleza cualitativa, ya que se fundamentan en la distribución de las intensidades del campo magnético total (Barba Pingarrón, 1988). Sin embargo, se omite la mención del uso de una base magnética y la aplicación de una corrección de datos por variación diurna. En consecuencia, la claridad de las gráficas resulta limitada y no exhiben los valores correspondientes.

El estudio realizado por Luis Barba en 1988 (Barba Pingarrón, 1988), ha sido uno de los más completo dentro de la historia de La Venta, ya que se hicieron variados descubrimientos tanto de esculturas como de artículos que en la actualidad son expuestos en esta zona arqueológica. La Figura 4, muestra las anomalías de la retícula de datos que se tomaron en la Zona Arqueológica; se tienen recopiladas imágenes de este estudio, como de otros aledaños, donde se han resaltado la importancia de usar los métodos potenciales en zonas arqueológicas de México.

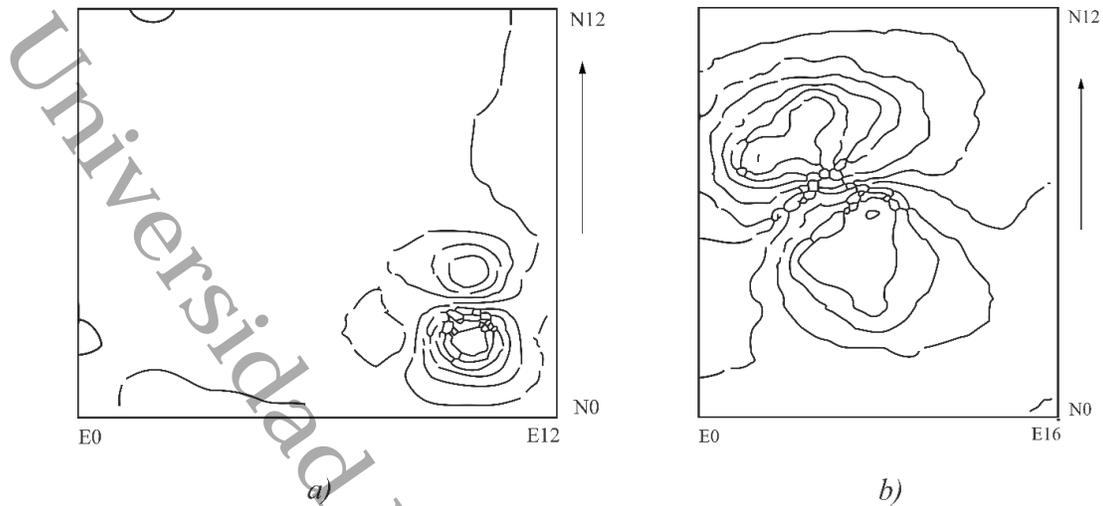


Figura 4. a) Anomalia observada dentro de uno de los complejos en la prospección magnética realizada en la zona Arqueológica La Venta, interpretada como un monumento escultórico (Barba, 1998). b) Respuesta magnética de un experimento realizado sobre un monumento escultórico de ubicación conocida (Barba, 1988).

El estudio realizado en este trabajo complementa las investigaciones antes mencionadas aportando mapas del campo magnético total con metodologías y equipos recientes, así como la ubicación de anomalías puntuales en los complejos de La Venta, donde queda abierta la brecha de estudio para futuras investigaciones en campo y laboratorio.

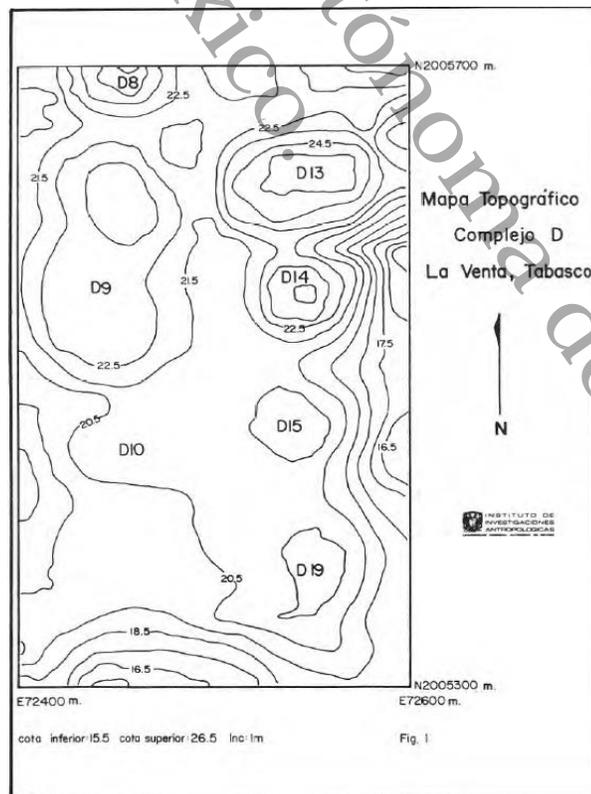


Figura 5. Mapa topográfico del complejo D dentro de la Zona Arqueológica de La Venta (Barba, 1988).

2.2. Fundamentos teóricos de la magnetometría

La prospección magnética es un método geofísico que se basa en medir las alteraciones del campo magnético terrestre para inferir la geología del subsuelo. Para ello, se realizan mediciones del campo magnético sobre la superficie terrestre con magnetómetros a intervalos de distancia lo más constantes posibles y alejados de fuentes de ruido que puedan generar un campo magnético externo de gran magnitud, como lo son cables de alta tensión o tuberías metálicas.

La mayor aportación del campo geomagnético proviene del núcleo terrestre y la otra parte de la distribución de los materiales en la corteza y el manto superior. Para que esta última contribución pueda ser captada por las mediciones, es necesario eliminar la aportación del núcleo al campo, así como las fuentes externas de origen humano y las interacciones entre el Sol y la Tierra, entre otras.

2.3. El campo magnético de la Tierra

Alrededor de una barra magnética existe un flujo magnético, como lo indican las líneas de flujo en la Figura 6, y converge cerca de los extremos del imán que se conocen como polos magnéticos. Si una barra magnética de este tipo se suspende en el aire libre, el imán se alineará con el campo magnético de la Tierra con un polo (el positivo que busca el norte) apuntando hacia el polo norte de la Tierra y el otro (el negativo que busca el sur) hacia el polo magnético sur. Los polos magnéticos siempre existen en pares de sentido opuesto para formar un dipolo. Cuando un polo está lo suficientemente alejado del otro como para que ya no lo afecte, el polo único se denomina monopolio.

El campo geomagnético exhibe una analogía con el campo de un imán de gran magnitud que se encuentra orientado en dirección norte-sur, coincidente con el eje de rotación de la Tierra (Reynolds, 2011), como se ilustra en la Figura 6. Las líneas de campo que presenta este imán de gran magnitud emergen desde el polo norte magnético y convergen en el polo sur magnético.

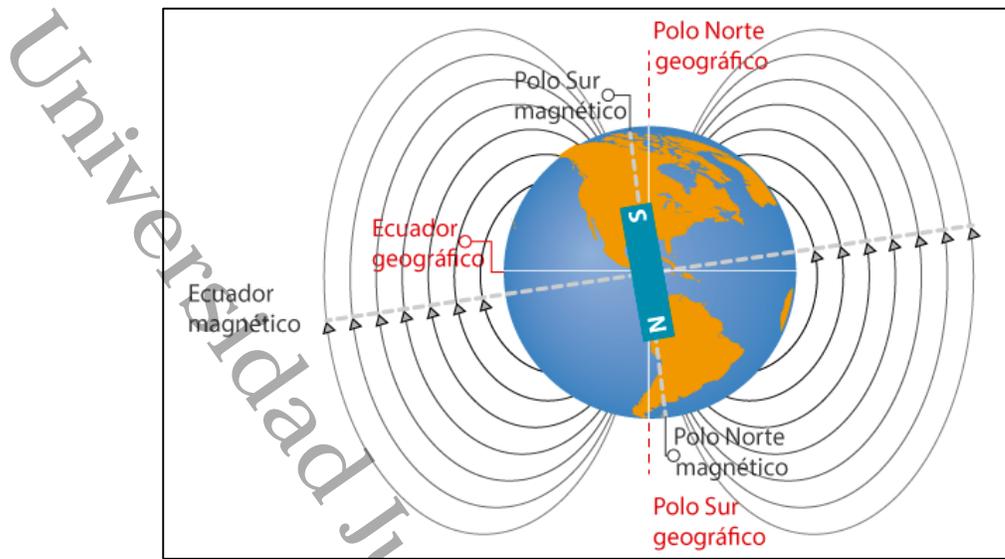


Figura 6. Modelo del campo geomagnético (Reynolds., 2011).

Luis Muñiz Barreto, (Muñiz Barreto, 1997) decía que el Campo Magnético Terrestre se conforma por cuatro principales fuentes, que son:

- El campo principal. Se crea en la superficie del núcleo externo líquido, que es una mezcla de hierro y níquel a 2900 km de profundidad. Se cree que las corrientes de convección de este material conductor en el núcleo actúan como un potente dínamo autoexcitado, creando cerca del 90 % del campo total.
- El campo cortical. Es el resultado de la magnetización de las rocas de la corteza, donde las temperaturas son inferiores a la temperatura de Curie, de minerales magnéticos destacados con alto contenido de hierro (Fe), en particular de magnetita. Este campo es el más permanente, ya que muestra fluctuaciones en lapsos de cientos de miles de años.
- El campo externo. Su origen radica en el vínculo entre el viento solar y la magnetósfera que rodea la Tierra. Esta interacción se propaga hasta la ionosfera y produce cambios diurnos en días tranquilos o en periodos de perturbación, tormentas y pulsaciones magnéticas, entre otros.
- El campo magnético creado por inducción electromagnética proviene de corrientes eléctricas provocadas en la corteza y el manto debido a fluctuaciones externas del campo.

Dado que el campo magnético es vectorial, el campo magnético total es la resultante de la suma de dichas contribuciones.

2.4. Origen y componentes del campo magnético

En lo que respecta al origen de las fuentes del campo geomagnético, es imperativo tener en cuenta ciertas propiedades físicas de los materiales que constituyen la Tierra y su estructura interna.

Previamente, se pensó que el magnetismo terrestre funcionaba como un potente imán como consecuencia de las propiedades magnéticas del hierro, que abunda en la corteza terrestre. Para contrarrestar esta teoría, se empleó un atributo físico conocido como temperatura de Curie. Esta indica que, a elevadas temperaturas, desaparece el magnetismo debido a que los momentos magnéticos de cada partícula ferromagnética que compone el cuerpo y se orientan aleatoriamente. Para el hierro, esta temperatura se aproxima a 770 °C, y para la magnetita, a 675 °C. Se estima que la isoterma de la temperatura de Curie de los materiales de la corteza terrestre se encuentra a una profundidad de aproximadamente 25 km. Sin embargo, la temperatura de Curie aumenta con la presión y esta, a su vez, con la profundidad, aunque de manera muy regular. Por tanto, en las fronteras del núcleo terrestre, donde la temperatura puede alcanzar los 3000 °C, la temperatura de Curie del hierro no podría superar los 780 °C. Todo esto indica que el interior de la Tierra, independientemente de sus componentes, no posee propiedades magnéticas. Al examinar los materiales hallados en la corteza, se ha comprobado que su magnetización total contribuye de forma insignificante al campo bipolar. (Campbell Wallace, 1997).

Una de las razones por la que la Tierra no puede considerarse un gran imán es la formación de los polos magnéticos y los cambios de polaridad en el campo geomagnético. La hipótesis que explica el origen del campo geomagnético, basada en pruebas que refutan la existencia de un material con características magnéticas situado en el núcleo terrestre (o muy próximo a él), sugiere que este se debe a corrientes eléctricas que fluyen en el núcleo externo de la Tierra, las cuales constituyen un “dínamo auto sustentado”(Campbell Wallace, 1997).

Actualmente, sabemos que el campo magnético terrestre proviene principalmente del propio globo terrestre. Aunque, un pequeño porcentaje del campo que se percibe en la superficie (entre un 2 y un 3 %) proviene de origen externo y se produce principalmente en las capas superiores de la atmósfera y la magnetosfera, debido a la actividad solar. Debido a lo cual, el campo de origen interno se conoce como campo principal. El campo principal tiene su origen en el núcleo externo de la Tierra, una zona que se extiende entre los 2885 y los 5155 km de profundidad y que está formada principalmente por hierro y níquel en estado fundido debido a las elevadas presiones y

temperaturas presentes.(Argote Espino, 2008). A causa de la diferencia de temperaturas entre la parte superior del núcleo externo (unos 3500 °C) y la inferior (más de 6000 °C), se producen corrientes ascendentes y descendentes de metal líquido que transportan calor desde el núcleo interno de la Tierra hasta el manto. Estos movimientos de convección llevan asociados corrientes eléctricas que, a su vez, inducen un campo magnético.

2.5. Elementos del campo magnético

El campo magnético es un campo vectorial y, por tanto, cada punto se caracteriza por el vector intensidad de campo, por lo que recibe el nombre de vector de inducción magnética o campo magnético (Reynolds, 2011), y se expresa por \vec{B} .

El campo magnético es una magnitud vectorial que, en cada punto, se especifica como la fuerza que ejerce el campo sobre una unidad de carga positiva que se traslada con una velocidad perpendicular al campo en dicho punto. Su unidad en el Sistema Internacional de Unidades (SI) es el tesla (T), en reconocimiento al científico serbio Nikola Tesla.

Un tesla es la inducción de un campo magnético que ejerce una fuerza de 1 N (newton) sobre una carga de 1 C (coulomb) que se desplaza a 1 m/s en el interior del campo y perpendicularmente al mismo:

$$1 \text{ Tesla} = 1 \frac{N}{C \text{ m/s}} \quad (1)$$

El campo magnético, al ser un campo vectorial de fuerzas, se puede representar gráficamente mediante líneas de campo o líneas de fuerza, que reciben el nombre de líneas de inducción magnética (Reynolds, 2011). La dirección del campo es tangente a las líneas de inducción en cada punto y tiene el mismo sentido. Además, se forman de modo que la densidad de líneas es mayor en aquellos puntos en los que el campo magnético es más potente. El campo magnético terrestre \vec{H} es un vector, que posee magnitud y dirección. Por lo tanto, la magnitud del campo se define como:

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

2.6. Variaciones del campo magnético

2.6.1. Variación diurna

El campo magnético de la Tierra cambia durante un período diario, esto es conocido como variación diurna. Estos son causados por cambios en la fuerza y dirección de las corrientes en la ionósfera. En un entorno magnéticamente silencioso (Q), los cambios son suaves y en promedio rondan los 50 nT, pero con amplitudes máximas de hasta 200 nT en el ecuador geomagnético. Los cambios son menores durante la noche, cuando el fondo es casi constante y disminuyen en amplitud desde el amanecer hasta el mediodía, después de lo cual aumentan hasta el máximo diario alrededor de media tarde antes de estabilizarse en el valor nocturno.

La variación diurna se origina por el efecto de la combinación de los sistemas de corrientes ionosféricas que circulan en la región E o capa «Heaviside» (entre los 90 y 150 km de altura en la ionosfera) y su correspondiente corriente inducida, denominada «corrientes telúricas», creada por el efecto dinamo. Este sistema consta de dos vórtices, uno en cada hemisferio, con focos cercanamente a 30° de latitud y localizados aproximadamente una hora antes del mediodía local. Ambos vórtices están formados por dos sistemas de corrientes: una fluye por encima de la superficie terrestre (en dirección oeste-este) y la otra circula bajo la superficie terrestre (en dirección opuesta). Ambos sistemas de corrientes son fijos en el espacio y en el tiempo en relación con el Sol, fluyendo en todo momento. La Tierra gira bajo ellos, lo que da lugar a la variación regular diurna denominada "variación SR". La intensidad de las corrientes y las amplitudes de los vórtices cambian a lo largo del año, manifestándose en la variación estacional, siendo mayores en verano para cada hemisferio (Svalgaard & Cliver, 2007). El ciclo de actividad solar de aproximadamente 11 años también plasma su efecto en la variación diurna, por lo que la amplitud de la variación estacional es mayor en el máximo de actividad solar y menor en un mínimo de actividad solar.

2.6.2. Variación lunar

El primordial efecto geomagnético analizado en las mareas lunares se asigna a tres circunstancias físicas interconectadas:

- El empuje gravitacional de la Luna sobre la atmósfera terrestre y los océanos.
- Las variaciones diarias (debidas a la actividad solar) y estacionales de la ionosfera.
- La inducción de corrientes en las partes conductoras de la Tierra.

El resultado gravitacional de la Luna sobre la Tierra, en su movimiento de rotación, ocasiona la elevación de los niveles de la atmósfera y los océanos en el hemisferio terrestre que se orienta hacia la Luna y en el hemisferio opuesto. Este efecto de marea semi diurno se produce porque la atracción gravitacional de la Luna supera a la fuerza centrífuga en el hemisferio que mira hacia la Luna, mientras que en el hemisferio opuesto ocurre lo contrario. Desde la perspectiva del polo norte, la Luna rota en torno a la Tierra en sentido contrario al de las agujas del reloj, con un período sideral de 27,32 días. Este movimiento se produce en la misma dirección en que la Tierra gira sobre su propio eje y orbita alrededor del Sol. Como consecuencia, desde la perspectiva de la Tierra, la Luna parece ascender en el horizonte este unos 50,5 minutos más tarde cada día.

Las mareas exhiben una dinámica análoga. En un día lunar, determinado a partir de las 00 horas lunares en el tránsito inferior de la Luna, se registran 24 horas, 50 minutos y 47 segundos de tiempo solar. La disparidad entre el tiempo lunar y el tiempo solar medio se traduce en una fase lunar. El cálculo de los valores de v y otras propiedades lunares se detallan en Chapman y Lindzen (Chapman & Lindzen, 1970).

2.6.3. Variación secular

El campo magnético analizado en un punto concreto de la Tierra no es constante en el tiempo, más bien muestra lentas variaciones en su dirección e intensidad que solamente pueden apreciarse mediante observaciones a lo largo de decenas o centenares de años. Estos cambios se han podido observar en áreas con mediciones instrumentales precisas desde hace siglos.

El rango de variación en algunas partes alcanza hasta 150 nT/año y de 6 a 10 minutos de arco/año para la declinación e inclinación. El campo magnético terrestre suele tomarse del modelo "International Geomagnetic Reference Field" (IGRF, por sus siglas en inglés).

Se sostiene la hipótesis de que la variación secular tiene su origen en el interior de nuestro planeta y es la causa de la deriva de los polos geomagnéticos, así como del decrecimiento de la intensidad del campo. Este fenómeno, a su vez, puede dar lugar a la inversión de la polaridad del campo geomagnético (Reynolds, 2011). Se ha observado que la variación secular se manifiesta de distintas formas tanto en el campo dipolar como en la componente no dipolar. El efecto de la variación secular sobre el campo dipolar se refiere a la intensidad y la dirección.

El resultado de la variación secular sobre el campo magnético no dipolar presenta una característica sobresaliente: una clara deriva hacia el oeste. Este fenómeno se interpreta como una manifestación de la rotación diferencial del núcleo externo con respecto al manto. Por consiguiente, los datos sobre la variación secular proporcionados por los estudios paleomagnéticos son esenciales para comprender el mecanismo generador del campo magnético total de origen interno (Villalaín Santamaría, 2016).

2.7. Magnetización

2.7.1. Magnetización inducida

La magnetización inducida provocada por el campo magnético terrestre y depende de la susceptibilidad de los materiales. El vínculo entre la magnetización inducida (M_i) y el campo magnético H , se expresa de la siguiente forma:

$$M_i = kH \quad (4)$$

Dónde:

k , representa la capacidad que tienen las rocas para adquirir magnetización (susceptibilidad magnética).

H , representa la magnitud del campo magnético inducido.

De esta forma, se representa que la magnetización de las rocas es una cantidad adimensional y que los minerales se ven perjudicados por la temperatura del campo inductor (Robinson & Coruh, 1988). El campo magnético es el resultado de la interacción entre cargas eléctricas. Sin embargo, a nivel atómico, el campo magnético se debe al movimiento de los electrones.

2.7.2. Magnetización Remanente

Muchas rocas y minerales exhiben magnetización permanente o magnetización remanente natural. Los diversos procesos mediante los cuales las rocas pueden alcanzar magnetización remanente se enumeran en la Tabla 1.

La magnetización remanente (M_r), es la presencia de un campo magnético después de que haya desaparecido el campo externo. En el caso de las rocas, la magnetización remanente es una grabación de los campos magnéticos pasados que han actuado sobre ellas (McElhinny, 2000).

Tabla 1. Tipos de magnetización remanente (Reynolds, 2011).

Tipos de Magnetización Remanente	Proceso
<i>Magnetización Remanente Natural (MRN)</i>	Adquirido por una roca o mineral en condiciones naturales.
<i>Magnetización Remanente Térmica (MRT)</i>	Adquirido por un material durante el enfriamiento desde una temperatura mayor que la temperatura de Curie hasta la temperatura ambiente. Por ejemplo, la lava fundida que se enfría después de una erupción volcánica.
<i>Magnetización Remanente Isotérmico (MRI)</i>	Se adquiere en un corto tiempo (segundos) en un campo magnético fuerte a una temperatura constante. Por ejemplo, la caída de un rayo.
<i>Magnetización Remanente Química (MRQ)</i>	También conocida como cristalización RM; Se adquiere en el momento de la nucleación y crecimiento o cristalización de finos granos magnéticos muy por debajo del punto de Curie en un campo ambiental.
<i>Magnetización Remanente Termoquímica (MRTQ)</i>	Adquirido durante la alteración química y el enfriamiento.
<i>Magnetización Remanente Detrítica (MRD)</i>	También conocida como Magnetización Remanente Depositional; Se adquiere por la sedimentación de partículas previamente magnetizadas para formar sedimentos finalmente consolidados que luego tienen una magnetización neta débil, pero antes de cualquier alteración química mediante procesos diagenéticos.
<i>Magnetización Remanente Post-deposicional (MRPD)</i>	Adquirido por un sedimento mediante procesos físicos que actúan sobre él después de la deposición. Por ejemplo, bioturbación y compactación.
<i>Magnetización Remanente Viscosa (MRV)</i>	Se adquiere después de una exposición a un campo ambiental con todos los demás factores constantes. Por ejemplo Química y temperatura.
<i>Magnetización Remanente Anhistérica</i>	Se adquiere cuando la amplitud máxima de un campo alterno disminuye desde un valor grande hasta cero en presencia de un campo magnético débil pero constante.

En rocas naturales la tasa entre (M_i) y (M_r) es conocida como la relación de Königsberger (Q).

$$Q = \frac{|M_r|}{|M_i|} \quad (5)$$

La relación de Königsberger (Q) se define como la relación que existe entre la intensidad de magnetización remanente y la intensidad de magnetización inducida donde una de las dos intensidades puede inundar a la otra. Particularmente se da en rocas ígneas y térmicamente metamórficas.

Las rocas alto Q son magnéticamente estables y registran bien el antiguo campo magnético. La magnetización remanente depende de la composición, del tipo de minerales magnéticos y del tamaño de los granos. Las rocas con un alto Q son, por ejemplo, el basalto y el gabro (Reynolds, 2011). En comparación de la roca caliza, que tiene una devaluada tasa de Königsberger.

La magnetización remanente se puede dividir en primarias y secundarias. Las magnetizaciones remanentes primarias se adquieren mediante el enfriamiento y solidificación de una roca ígnea por encima de la temperatura de Curie hasta la temperatura superficial normal, o mediante magnetización remanente detrítica. Las magnetizaciones remanentes secundarias, como las magnetizaciones remanentes químicas, viscosas o pos-deposicionales pueden adquirirse más adelante en la historia de la roca (Reynolds, 2011).

2.8. Propiedades magnéticas de las rocas

Todos los átomos tienen un momento magnético como resultado del movimiento orbital de los electrones alrededor del núcleo y el espín de los electrones. Según la teoría cuántica, dos electrones pueden existir en la misma capa de electrones siempre que giren en direcciones opuestas. Los momentos magnéticos de dos de esos electrones, conocidos como electrones emparejados, se cancelará. En la mayoría de los casos, cuando no se aplica un campo magnético externo, los momentos magnéticos de espín de los átomos adyacentes se distribuyen aleatoriamente, por lo que no hay magnetización general.

Todas las sustancias o rocas pueden considerarse como generadoras a nivel atómico de campos magnéticos y según su intensidad se clasifican en diamagnético, paramagnético, ferromagnético, antiferromagnético y ferrimagnético.

2.8.1. Diamagnetismo

En un material diamagnético, todas las capas de electrones están completas y, por lo tanto, no hay electrones alejados. Cuando se aplica un campo magnético externo, se induce magnetización. Los electrones orbitan de tal manera que crean un campo magnético que se opone al campo aplicado, dando lugar a una susceptibilidad baja y negativa (Figura 8) (Robinson & Coruh, 1988). Algunos minerales, como la halita, el cuarzo, la calcita, la galena y la esfalerita, presentan una susceptibilidad magnética muy baja.

2.8.2. Paramagnetismo

Para un material paramagnético las capas electrónicas se encuentran incompletas y los electrones desapareados, cuando un campo externo es aplicado los momentos magnéticos se alinean en la misma dirección generando un campo más fuerte con momentos magnéticos de espín desequilibrados e interacciones magnéticas débiles entre los átomos (Reynolds, 2011).

La consecuencia es una susceptibilidad magnética positiva baja que va disminuyendo conforme a la temperatura (Figura 8). El paramagnetismo es generalmente un orden de magnitud más fuerte que el diamagnetismo. Algunos minerales con esta propiedad son los olivinos, piroxenos, anfíboles, granate y biotita. En exploración el paramagnetismo y el diamagnetismo son inapreciables.

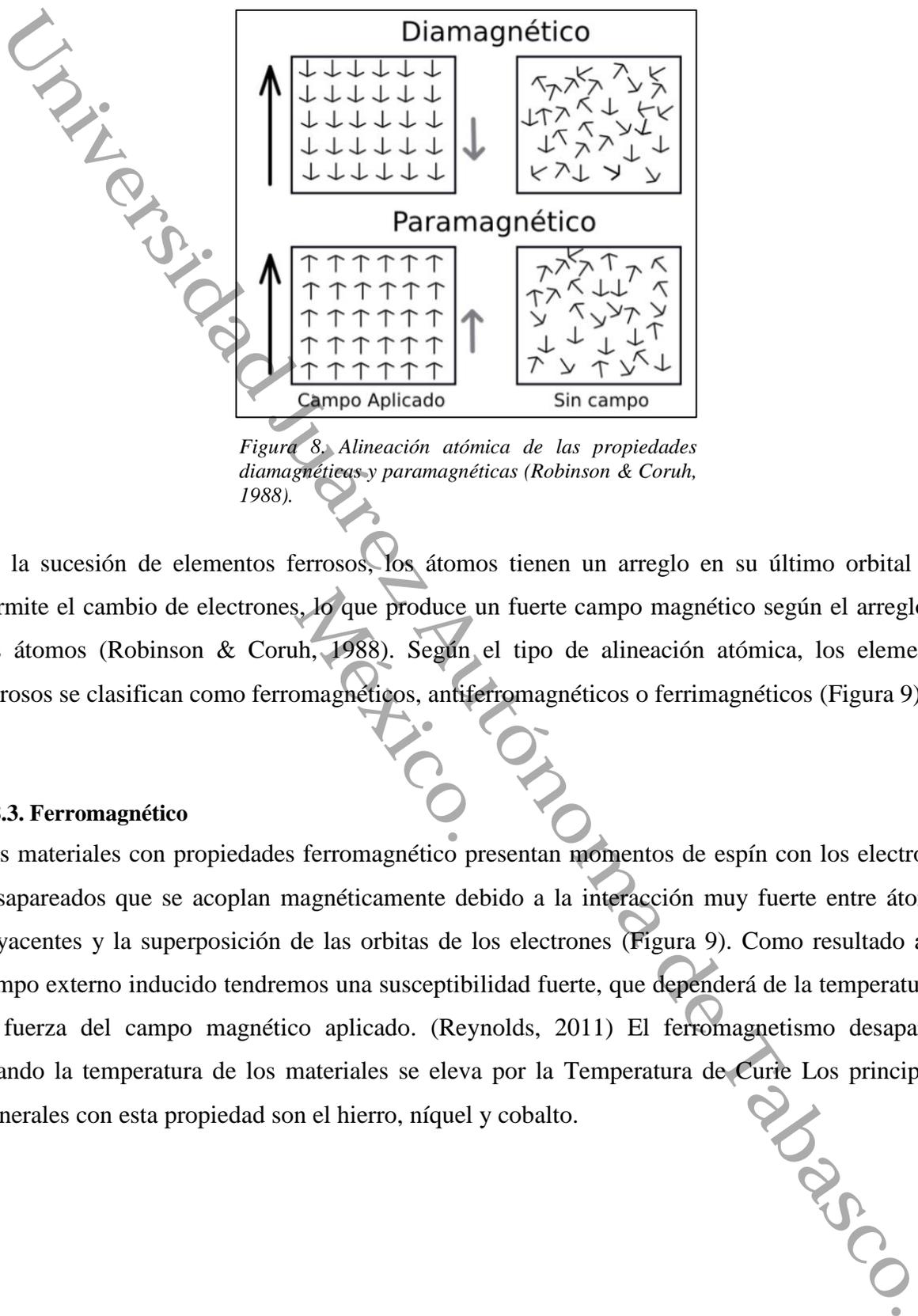


Figura 8. Alineación atómica de las propiedades diamagnéticas y paramagnéticas (Robinson & Coruh, 1988).

En la sucesión de elementos ferrosos, los átomos tienen un arreglo en su último orbital que permite el cambio de electrones, lo que produce un fuerte campo magnético según el arreglo de los átomos (Robinson & Coruh, 1988). Según el tipo de alineación atómica, los elementos ferrosos se clasifican como ferromagnéticos, antiferromagnéticos o ferrimagnéticos (Figura 9).

2.8.3. Ferromagnético

Los materiales con propiedades ferromagnético presentan momentos de espín con los electrones desapareados que se acoplan magnéticamente debido a la interacción muy fuerte entre átomos adyacentes y la superposición de las orbitas de los electrones (Figura 9). Como resultado a un campo externo inducido tendremos una susceptibilidad fuerte, que dependerá de la temperatura y la fuerza del campo magnético aplicado. (Reynolds, 2011) El ferromagnetismo desaparece cuando la temperatura de los materiales se eleva por la Temperatura de Curie. Los principales minerales con esta propiedad son el hierro, níquel y cobalto.

2.8.4. Antiferromagnético

Los momentos de espín de los electrones tienen un acoplamiento magnético anti paralelos en sus arreglos atómicos, el campo magnético en este caso resulta estar balanceado. La hematita es uno de los ejemplos de materiales antiferromagnético.

2.8.5. Ferrimagnético

En este caso, la dirección de los átomos es opuesta y uno de los momentos magnéticos anti paralelos es más potente que el otro (Figura 9). Esto produce una magnetización remanente neta incluso en ausencia de un campo magnético externo. Un claro ejemplo de estas propiedades son la magnetita y la greigita.

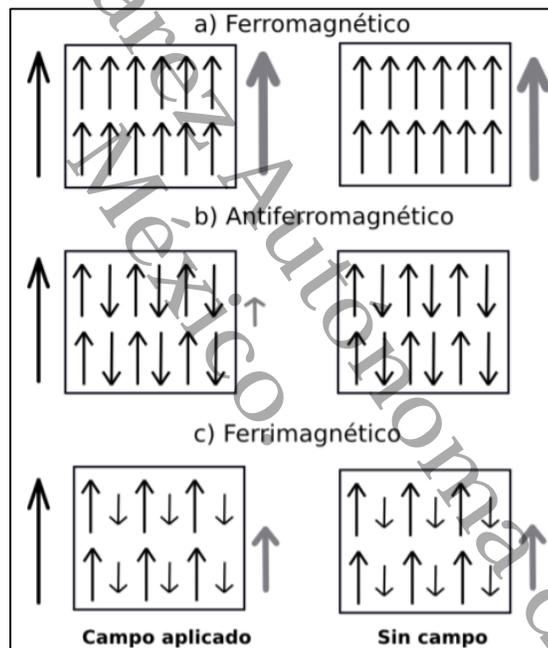


Figura 9. Alineación atómica de las propiedades ferromagnético, antiferromagnético y paramagnético (Robinson & Coruh, 1988).

2.9. Susceptibilidad de rocas y minerales

La capacidad de las rocas para ser susceptibles se rige por el orden atómico de los minerales, su forma, volumen, distribución, y más. Esta diversidad de elementos genera una amplia gama de susceptibilidades en las rocas, lo que requiere la realización de mediciones en estas. La susceptibilidad magnética es una característica inherente a la roca y representa la cantidad de magnetismo que una roca puede experimentar frente a la presencia de un campo magnético específico. (Reynolds, 2011). No obstante, la capacidad magnética de las rocas es una característica de gran relevancia, y representa para los procedimientos de exploración magnética lo que la densidad representa para las investigaciones de gravedad.

Las rocas que tienen una concentración significativa de minerales ferromagnéticos y/o ferrimagnéticos tienden a tener las mayores susceptibilidades. En consecuencia, las rocas básicas y ultra básicas tienen las mayores susceptibilidades, las rocas ígneas ácidas y metamórficas tienen valores intermedios a bajos, y las rocas sedimentarias tienen susceptibilidades muy bajas (Tabla 2). La susceptibilidad de toda la roca puede variar considerablemente debido a una serie de factores además de la composición mineralógica. Las susceptibilidades dependen de la alineación y las formas de los granos magnéticos dispersos por la roca. Si hay una marcada orientación de las partículas,

como en algunas rocas sedimentarias y metamórficas, puede existir una fuerte anisotropía física (Villalaín Santamaría, 2016). Se denomina estructura magnética a la variación de las características magnéticas dependiendo de la orientación y forma de los granos minerales.

Tabla 2. Susceptibilidades de rocas y minerales (Reynolds, 2011).

Tipo de rocas o minerales	Susceptibilidad*
Sedimentarias	
Dolomita (pura)	-12.5 a 44
Dolomita (impura)	20,000
Caliza	10 a 25,000
Arenisca	0 a 21,000
Lutitas	60 a 18,600
Promedio para varios	0 a 360
Metamórficas	
Esquistos	315 a 3,000
Pizarra	0 a 38,000
Gneis	125 a 25,000
Serpentinita	3,100 a 75,000
Promedio par varios	0 a 73,000
Ígneas	
Granito	10 a 65
Granito (m)	20 a 50,000
Riolita	250 a 37,700
Pegamita	3000 a 75,000
Gabro	800 a 76,000
Basalto	500 a 182,000
Basalto oceánico	300 a 36,000
Peridotita	95,500 a 196,000
Promedio de ígneos ácidos	40 a 82,000
Promedio de ígneos básicos	550 a 122,000
Minerales	
Hielo (d)	-9
Halita (d)	-10
Yeso (d)	-13
Cuarzo (d)	-15
Grafito (d)	-80 a -200
Calcopirita	400
Pirita (o)	50 a 500
Hematita (o)	420 a 38,000
Pirrotina (o)	1,250 a 6.3×10^6
Ilmenita (o)	314,000 a 3.8×10^6
Magnetita (o)	70,000 a 2×10^7

(d): Material Diamagnético, (o): Mineral, (m): Con minerales magnéticos.

*Convertir:
 $k \cdot 10^6$, para unidades SI racionalizadas.
 $k / 4\pi$, para unidades CGS no racionalizadas.

2.10. Magnetómetros de Torsión, Fluxgate y Resonancia

La primera medición precisa de la inclinación del campo terrestre fue realizada por Robert Norman, Londres, en 1576, donde describió sus instrumentos y recopiló datos en su libro “El nuevo atractivo (1581)”, el cual es considerado el primer libro dedicado al geomagnetismo (Reynolds, 2011). En la exploración geofísica, al emplear el método de prospección magnética, usamos como instrumento para el levantamiento de los datos, el magnetómetro, el cual mide las componentes horizontales y/o verticales del campo magnético o el campo total. Se clasifica en tres grupos según el tipo de estudio a realizar:

- Magnetómetros de torsión y equilibrio
- Magnetómetros Fluxgate
- Magnetómetros de resonancia.

De los cuales, los dos últimos han reemplazado por completo al primero. Los magnetómetros de torsión todavía se utilizan en un 75% de los observatorios geomagnéticos, particularmente para medir la declinación.

Los *magnetómetros de torsión y equilibrio* históricamente fueron los primeros en idearse (1640). Consisten esencialmente en una aguja magnética suspendida de un hilo (tipo torsión) o equilibrada sobre un pivote. En el campo magnético de la tierra el imán adopta una posición de equilibrio. Si el dispositivo se lleva a otra ubicación donde el campo magnético de la tierra es diferente al de la estación base, o si el campo magnético cambia en la estación base, el imán se alinearán con el nuevo campo y la desviación desde la posición de reposo será tomado como medida del campo magnético de la tierra (Figura 10).

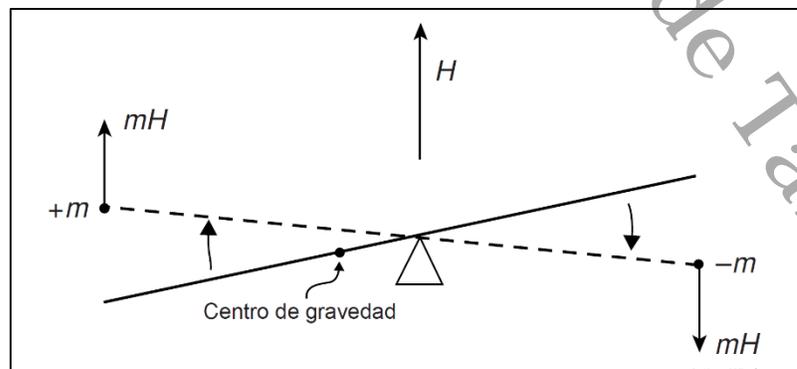


Figura 10. Principio de funcionamiento básico de un magnetómetro de torsión o equilibrio (Reynolds, 2011).

El *Magnetómetro Fluxgate* fue desarrollado durante la Segunda Guerra Mundial para detectar submarinos. Consta de dos núcleos paralelos fabricados de material ferromagnético de alta permeabilidad. Las bobinas principales se enrollan alrededor de estos núcleos en serie, pero en direcciones opuestas, mientras que las bobinas secundarias también se enrollan alrededor de los núcleos, pero en el sentido opuesto al de la respectiva bobina primaria. Su funcionamiento consiste en que una corriente alterna a 50-100 Hz pasa a través de las bobinas primarias que impulsa cada núcleo a través de un bucle de histéresis. El campo magnético alterno generado induce un voltaje en fase dentro de las bobinas secundarias. Este voltaje alcanza su máximo cuando la tasa de cambio del campo magnético es más rápida. Como las bobinas están enrolladas en direcciones opuestas alrededor de los dos núcleos, los voltajes secundarios están en fase, pero tienen polaridad opuesta, de modo que la suma de los dos voltajes es en todo momento cero. Sin embargo, cuando los núcleos se colocan en el campo magnético de la tierra, una componente de ese campo será paralela a la orientación de los núcleos. En consecuencia, el núcleo cuyo campo primario se ve reforzado por el ambiente externo alcanzará la saturación antes que el otro núcleo cuyo campo magnético se opone al campo externo (Figura 11).

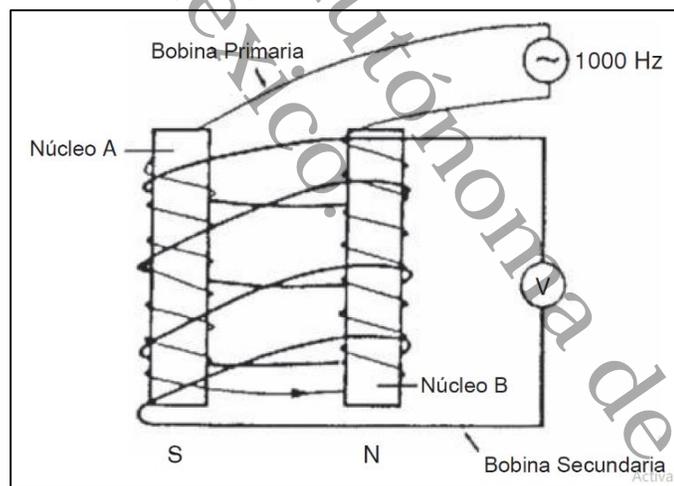


Figura 11. Principio de funcionamiento básico del *Magnetómetro Fluxgate* (Reynolds, 2011).

Por último, se muestra el *magnetómetro de resonancia*, del cual existen dos tipos, de acuerdo a su funcionamiento interno; el *magnetómetro de precesión libre de protones*, y el *magnetómetro de vapor alcalino*. Los dos modelos de magnetómetro supervisan la presión de partículas atómicas en un campo magnético circundante para ofrecer una medición absoluta del campo magnético total.

El magnetómetro de precesión libre de protones cuenta con un sensor compuesto por una botella llena de un líquido con alta cantidad de protones, usualmente agua o queroseno. Alrededor de esa botella se enrolla una bobina que está vinculada al dispositivo de medición. Cada protón posee un momento magnético, y dado que se encuentra en constante movimiento, también posee un momento angular (Reynolds, 2011). En un campo magnético ambiental similar al del planeta Tierra, la mayoría de los protones están en alineación con este campo, mientras que el resto se dirige en sentido anti paralelo. Este proceso se muestra en la Figura 12. Por lo tanto, el líquido abundante en protones obtiene un momento magnético neto en la dirección del campo magnético total. Su operación se basa en que, al inyectar una corriente a la bobina que circunda el líquido, se crea un campo magnético que supera entre 50 y 100 veces el campo terrestre. Al tener un ángulo recto con respecto a este, los protones se alinean con la nueva dirección magnética. (Reynolds, 2011). Cuando se apaga el campo aplicado, los protones realizan una precesión en torno al campo ambiental ya existente. Dado que los protones son partículas con carga, su presencia provoca un voltaje alterno a la misma frecuencia que el bobinado que envuelve la botella del sensor. La interacción entre protones próximos provoca una disminución de la precesión en 2 o 3 segundos, un periodo adecuado para calcular la frecuencia de la precesión. En la actualidad, los magnetómetros de protones modernos proporcionan una medición directa de la intensidad del campo magnético en nano tesla (nT), y los datos pueden ser transmitidos automáticamente a un registrador de datos para su descarga posterior en un ordenador.

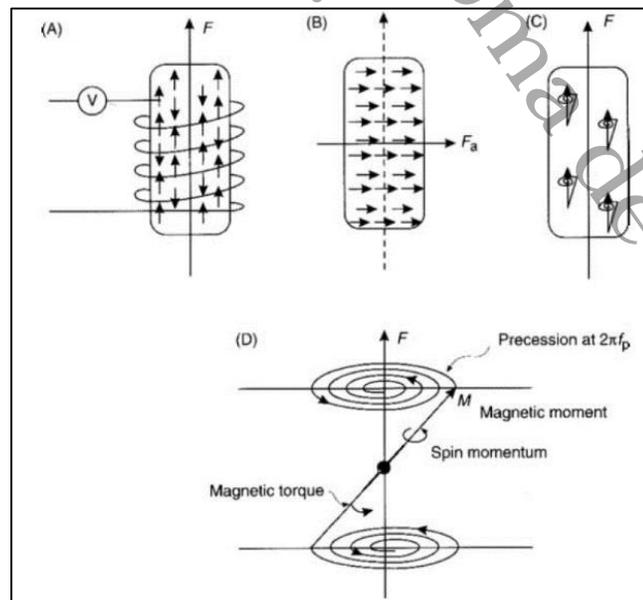


Figura 12. Principios del funcionamiento de un magnetómetro de precesión de protones (Reynolds, 2011).

2.11. Corrección de datos

Al realizar un levantamiento de datos en campo se opta por desarrollar ciertas correcciones, según sea el método geofísico que se esté utilizando. Para el método magnético, todos los conjuntos de datos contienen elementos de ruido y requieren algún tipo de corrección de los datos, para así poder eliminar aquellas contribuciones al campo magnético observado distintas de las causadas por otras fuentes magnéticas. En los levantamientos magnéticos terrestres siempre es recomendable mantener el sensor alejado de cualquier objeto magnético que altere las lecturas de campo y puedan provocar un ruido magnético.

2.11.1. Corrección por variación diurna

Cuando se lleva a cabo un levantamiento magnético, en cualquier parte del planeta se produce un efecto que provoca una alteración en la intensidad del campo geomagnético en la superficie terrestre durante el día. Las fluctuaciones durante el día en el campo geomagnético se originan en la ionosfera, donde se produce una porción del campo magnético terrestre. (Svalgaard & Cliver, 2007), y que en un estudio magnético, durante la toma de datos a lo largo del día tenemos variaciones en la magnitud e intensidad del campo magnético de la tierra que están siendo afectados por la actividad solar (viento solar) u otras contribuciones.

Las variaciones diurnas pueden ser analizadas a través de la instalación de un magnetómetro, como un punto de referencia fijo, que registre de manera constante las lecturas de la intensidad del campo magnético total durante el día o, en caso de ser necesario, mientras se realiza el levantamiento magnético para simplificar la compilación de la deriva diurna.

La finalidad de esta corrección es eliminar y contrarrestar esas variaciones del campo magnético tomado en un punto a lo largo del día. Para obtener la variación diurna aplicamos la siguiente fórmula:

$$V_D = Valor_i B - Valor_n B \quad (6)$$

Dónde:

$Valor_i B$ Es el valor inicial del campo magnético medido en la base.

$Valor_n B$ Es el valor consecutivo medido en la base.

De tal modo que nuestra corrección se entiende matemáticamente de la siguiente manera:

$$Mag_{Diu} = Mag_{Campo} - V_D \quad (7)$$

Dónde:

Mag_{Campo} Es el valor promedio de la magnitud del campo total medido en campo.

V_D es la variación diurna en un punto.

2.11.2. Corrección IGRF

Para crear un mapa de irregularidades magnéticas en una región, también es necesario corregir los datos para considerar los impactos de la latitud y, en menor grado, la longitud. Dado que la intensidad del campo magnético terrestre oscila entre 25000 nT en el ecuador magnético y 69000 nT en los polos, la intensidad del campo magnético terrestre puede variar. (Reynolds, 2011), es necesario tener en cuenta el aumento de magnitud con la latitud. La corrección geomagnética remueve los efectos del campo magnético terrestre de referencia de los datos adquiridos.

El procedimiento de corrección geomagnética exige la utilización del valor del campo teórico IGRF, que representa el campo magnético terrestre sin alteraciones en relación a una amplia gama de armónicos e incluye términos temporales para las correcciones por variaciones seculares. El valor de la magnitud IGRF se puede calcular manualmente para cada punto desde la página web oficial del NOAA. (*National Centers For Environmental Informations/ National Oceanic and Atmospheric Administration*, n.d.) por sus siglas en inglés.

Con este valor, también obtendremos un valor para la inclinación y declinación magnética en un punto de la tierra. Cabe señalar que el valor de IGRF que se tiene que utilizar es el más reciente. Los resultados de la investigación en cualquier lugar específico pueden ser ajustados restando el valor teórico, adquirido del Campo de Referencia Geomagnético Internacional (IGRF) más reciente, del valor obtenido en la medición.

En otras palabras, la magnitud IGRF o el campo magnético que generan las rocas en la corteza, lo obtenemos de la diferencia entre el valor promedio de la magnitud del campo total medido en campo y el modelo IGRF (valor del campo magnético teórico).

Matemáticamente se puede expresar de la siguiente manera:

$$Mag_{IGRF} = Mag_{Campo} - IGRF_{Teórico} \quad (8)$$

Finalmente, es este el dato que nos interesa para realizar nuestros mapas de anomalías magnéticas, al cual podremos aplicarles ciertos filtros para una mejor interpretación y elección de anomalías.

Es crucial señalar que, para elaborar un mapa de anomalía magnética de una zona, los datos magnéticos recolectados deben ser rectificadas considerando las variaciones diurnas del campo magnético, los impactos de la latitud, y en menor medida la longitud, y la sustracción del campo magnético terrestre teórico. (Reynolds, 2011), mismos que en este trabajo se realizarán más adelante.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

CAPÍTULO 3. MARCO GEOLÓGICO

3.1. Geología Regional

La mayor parte de la superficie del estado de Tabasco está compuesta por rocas sedimentarias como las calizas, areniscas y los depósitos evaporíticos. Estas rocas experimentaron fuertes esfuerzos de compresión, provocando que las más plásticas se unieran y las más tenaces se fracturaran, creando así estructuras de tipo horst y graben. Esto resultó en la formación de trampas estructurales donde más adelante se acumularían gas y hidrocarburos. (INEGI, 2001).

Se considera que en el territorio tabasqueño no se encuentran grandes estructuras geológicas superficiales, a excepción de las regiones del sur. (INEGI, 2001). Se han identificado fascinantes estructuras vinculadas a distintas fases tectónicas en el subsuelo del estado (SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO, 2008) (Figura 13), cuya evolución se puede sintetizar en tres sucesos principales: una fase inicial de esfuerzos de compresión que unió las rocas sedimentarias depositadas durante el Periodo Jurásico. (INEGI, 2001), Esto resultó en la creación de geo formas representadas por anticlinales y sinclinales, extendidas con dirección noroeste-sureste, con altitudes que oscilan entre 200 y 900 metros.

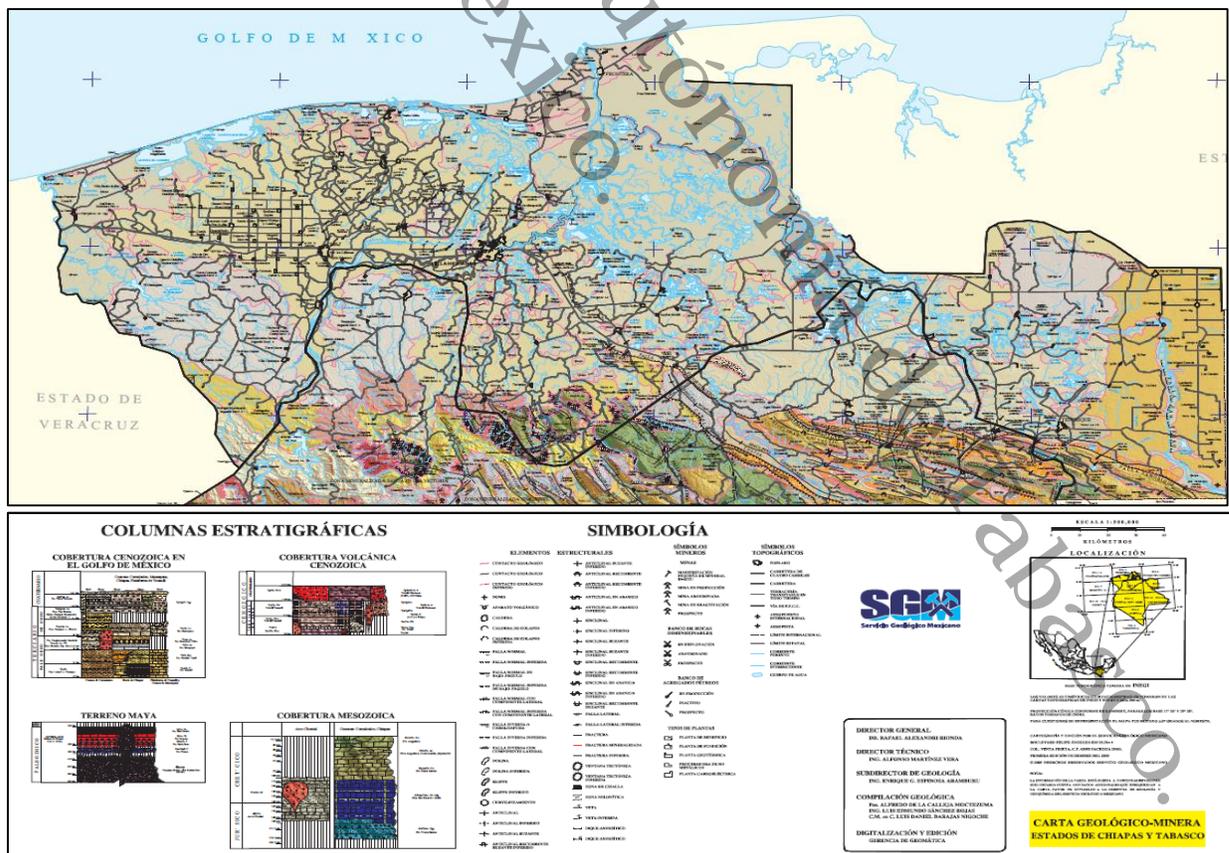


Figura 13. Servicio Geológico Nacional. (2008). Carta geológico-minera estados de Chiapas y Tabasco [Mapa]. 1:500.000. Chiapas y Tabasco. Servicio Geológico Nacional.

Más adelante, ocurrió la infiltración de masas salinas hacia las capas superiores mediante planos de falla y ejes anticlinales, originando deformación dómica distribuida de forma irregular; finalmente, se produjo una fase de relajamiento tectónico durante el Mioceno Superior-Pleistoceno. Esta tectónica distensiva impactó en las geformas ya existentes y provocó desplazamientos laterales vinculados al sistema Polochic-Motagua de la época Mioceno-Plioceno.; por lo que el relieve aparece en bloques que superficialmente definen valles tectónicos, conocidos como grabens (INEGI, 2001). Lo anterior originó la formación de la cuenca de Macuspana y Comalcalco, donde se depositaron potentes espesores de sedimentos terrígenos.

3.2. Geología Local

Dentro del marco geológico local, la zona de estudio forma parte de una porción continental, que ha estado sujeta a inestabilidad tectónica, mínimamente desde el Mesozoico, como resultado de su posición entre elementos paleo geográficos regionales. A partir del Terciario Temprano la región se convirtió en una serie de depresiones de grandes magnitudes que dieron lugar a cuencas y sub cuencas sedimentarias marinas, ahora conocidas como "Cuencas Terciarias del Sureste", las que desde entonces se han estado rellenando principalmente por sedimentos terrígenos (Jiménez Salas, 1990).

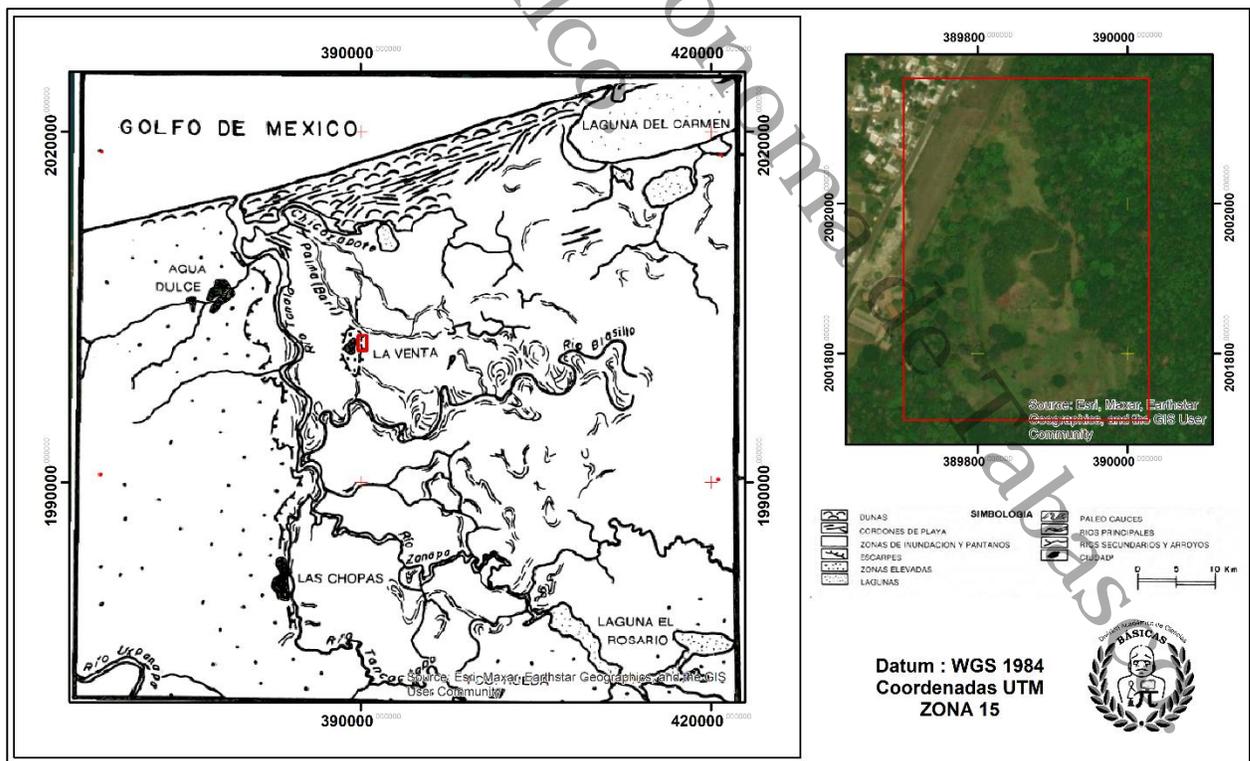


Figura 14. Mapa de localización regional del área de estudio y de la planicie costera tabasqueña (Jiménez Salas, 1990).

En la actualidad y básicamente desde el Cuaternario, dichas cuencas se encuentran en una de sus fases de relleno conformando así la amplia planicie costera que va desde el río Coatzacoalcos, en Veracruz, hasta el río Candelaria, en Campeche y contando con varios sistemas deltaicos interpuestos en asociación directa a los ríos principales que distribuyen grandes volúmenes de sedimentos, como se muestra en la Figura 14. Entonces, se tienen extensas llanuras bajas afectadas no sólo por procesos exógenos sino también por las condiciones geológicas del subsuelo, limitadas al norte por la plataforma marina del Golfo de México, al oriente por la Plataforma Carbonatada de Yucatán, al poniente por la Sierra Volcánica de los Tuxtlas, y al sur por los pliegues y fallas de la Sierra de Chiapas (INEGI, 2001). Las unidades de roca que se depositaron como resultado del proceso anterior y que afloran ampliamente en la mayor parte de la planicie costera, corresponden básicamente con areniscas y lutitas del Mioceno y Plioceno (A. Bost et al., 2012), más los sedimentos continentales granulares y orgánicos del Pleistoceno y Holoceno (Jiménez Salas, 1990).

Durante el Cuaternario la mayor parte de la planicie costera ha estado sujeta a intensos procesos geomorfológicos, que han resultado en un paisaje de topografía baja y ondulada, a la que han llegado a depositarse agua y materiales sedimentarios procedentes de las partes montañosas a través de las cuencas hidrológicas formadas por los ríos Coatzacoalcos, Mezcalapa-Grijalva y Usumacinta, los cuales han desarrollado una red fluvio-lagunar y deltaica que ha modificado las condiciones ambientales constantemente (Jiménez Salas, 1990). Los depósitos fluvio-lagunares y aluvio-deltaicos han interactuado con los procesos marinos litorales en una secuencia episódicamente regresiva, pero con fases de degradación sedimentaria que ha sido decisiva en las variaciones paleo geográficas, principalmente de las porciones distales de los deltas aluviales y del litoral marino, produciendo ambientes y sub ambientes de depósito. La consecuencia del relleno sedimentario en los pasados milenios ha sido el origen de las mayores planicies fluvio-aluviales cuaternarias y recientes del Golfo de México.

Las zonas urbanas están creciendo sobre suelos del Cuaternario y roca sedimentaria del Neógeno (Figura 15), en llanura aluvial, llanura aluvial costera inundable y lomerío típico (INEGI, 2010). En niveles de escala menor, las unidades rocosas del Mioceno dan origen a zonas elevadas de lomeríos bajos y redondeados, como en la que actualmente se encuentra la Villa La Venta, zona que anteriormente se consideró como una "isla" constituida de materiales del pleistoceno. Estas unidades rocosas han sufrido deformaciones disyuntivas con orientaciones generales noroeste-

sureste y noreste-suroeste, principalmente (Jiménez Salas, 1990). La influencia litológica y estructural sobre las rocas del Mioceno y anteriores a ellas se refleja claramente en la superficie a través de los depósitos cuaternarios superficiales y en la dinámica geomorfológica modificadora del paisaje como repuesta neo tectónica a partir de la intensa actividad durante los últimos milenios.

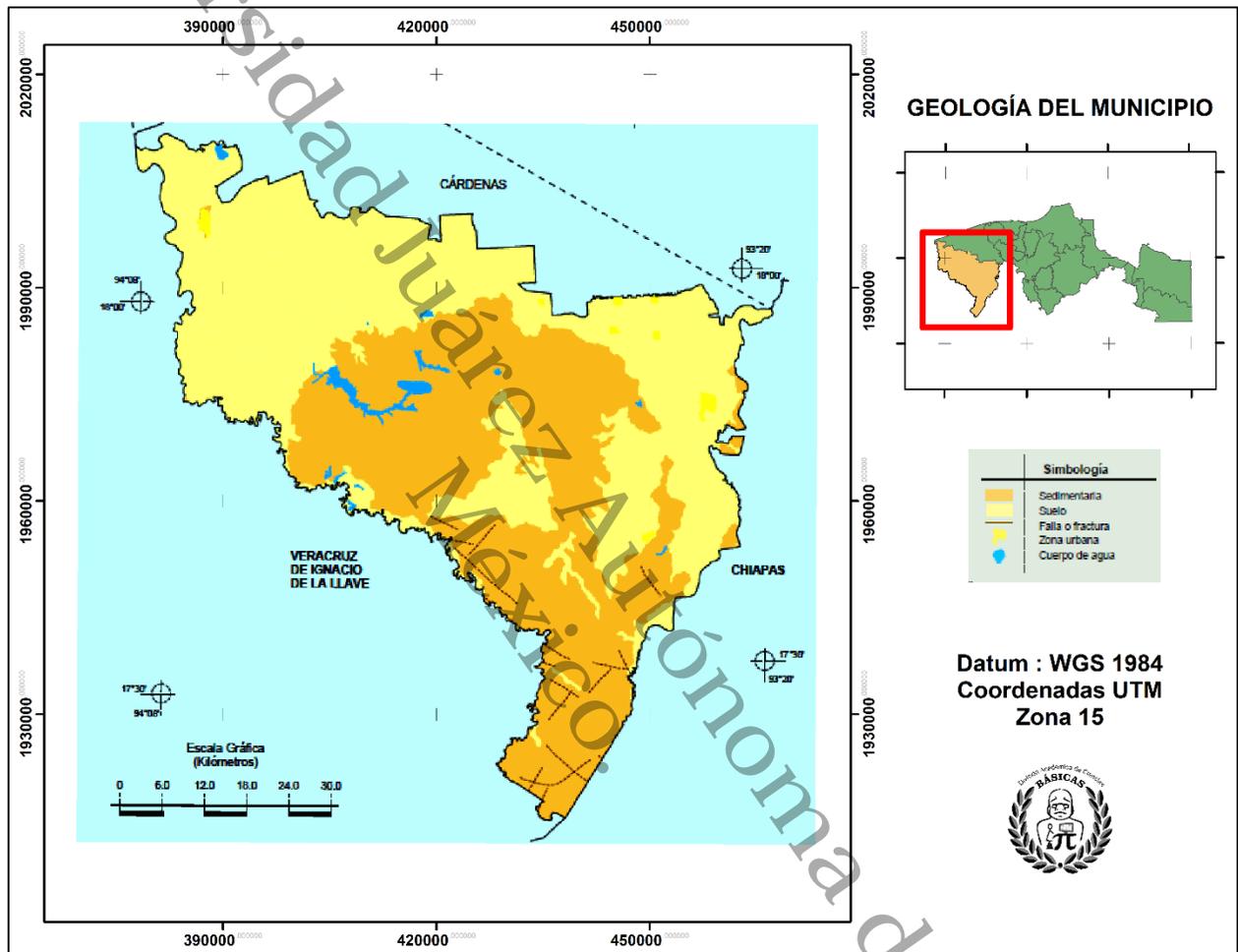


Figura 15. Geología del municipio de Huimanguillo (INEGI, 2010).

Cabe destacar, con respecto a la "isla" de La Venta, que se trata de un cerro testigo o remanente de erosión del terreno con dimensiones promedio de 5 km de largo por 3 km de ancho, con su eje mayor orientado en dirección casi norte y ubicado a escasos 15 km de la actual línea de costa, está constituido principalmente de rocas del Mioceno y alcanza los 35 m de altura sobre el nivel medio de sus alrededores, pero ajusta en promedio los 20 m (Jiménez Salas, 1990).

3.2.1. Estratigrafía

Los materiales predominantes que surgen en la zona son de carácter arcillo-arenoso, areniscas y lutitas, compuestos principalmente por materiales granulares originados de la erosión de la sierra de Chiapas. (Figura 16) (CONAGUA, 2023).

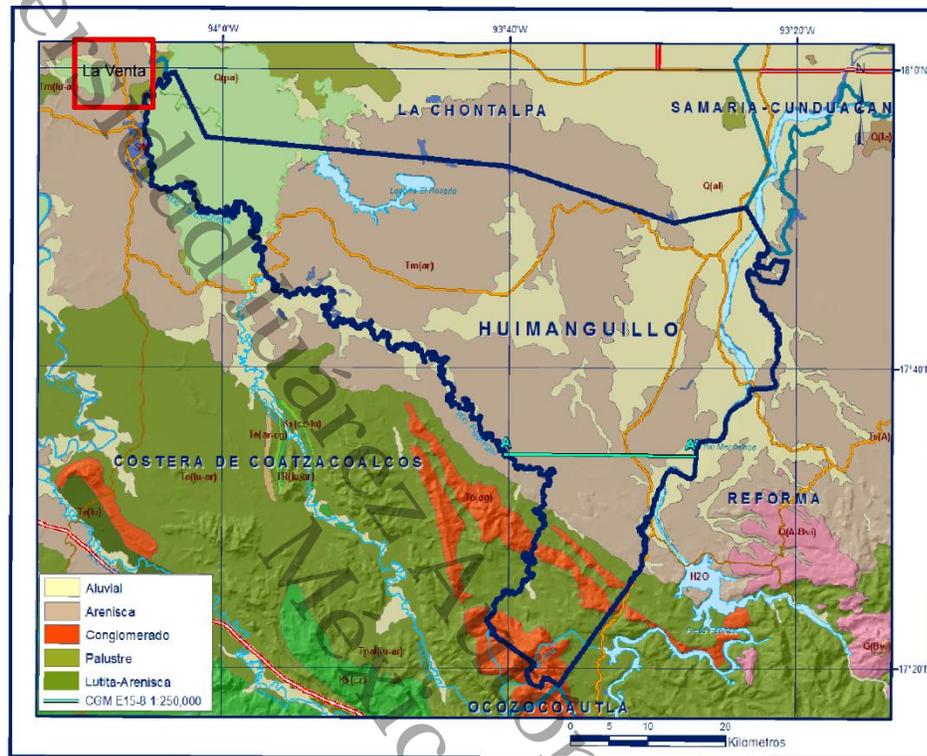


Figura 16. Tipos de rocas en el municipio de Huimanguillo, Tabasco (CONAGUA, 2023).

La Formación Cedral se sitúa en la parte superior de la Unidad de Sedimentos arenosos, mostrando intercalaciones de lentes arcillosos, lechos de gravas y lignito en su espesor, que usualmente es limitado, de aproximadamente 50 metros.

La Formación Agueguexquite es la parte superior que se compone de arena de tonalidad gris clara, de grano grueso a medio y escaso grano fino, con algunas intercalaciones de grava de forma irregular y finas capas de lutita de tonalidad gris a gris verdoso, suave. Estas arenas se incrementan en potencia hacia la base de la formación, reduciendo así las arenas que se presentan en espesores poco potentes, entre 50 y 100 metros. (CONAGUA, 2023).

Se han hallado grandes estructuras subterráneas bajo los sedimentos del sistema Terciario, de la serie del Mioceno y la litología Arenisca, que constituyen las trampas estructurales para los hidrocarburos que se encuentran en la zona acuífera. Estas constituyen las presas estructurales para los hidrocarburos que se extraen en la entidad. (Pérez Rincón, 1959).

3.2.2. Petrología de artefactos en la zona arqueológica de La Venta

Uno de los asuntos de estudio acerca de los Olmecas de la Costa del Golfo es la procedencia de los materiales utilizados en sus creaciones escultóricas y el modo en que los llevaban a su sitio de exposición. La situación de La Venta es especialmente relevante, dado que las rocas volcánicas más próximas a La Venta se encuentran 60 km al oeste, en las proximidades de San Martín Tuxtla, lugar donde se han dado erupciones de lavas basálticas en épocas históricas; en cambio, las rocas metamórficas más próximas se encuentran en las colinas ubicadas al sur de La Venta, a casi 100 km de distancia. (Drucker et al., 1959; González Lauck, 2000).

Las esculturas de La Venta se construyeron utilizando materiales de amplia variedad. Los artistas y arquitectos de La Venta emplearon rocas volcánicas provenientes de diversos sitios lejanos a la región de La Venta. (González Lauck, 2000). Todavía no se conoce con precisión el método que se empleaba para extraer la piedra y su manera de transportarla a los diferentes lugares donde se tallaba. Se podría inferir que se extraía la piedra y se elaboraba una preforma en el mismo sitio. Por ejemplo, es conocido que en Llano del Júcaro, Veracruz, donde se han detectado afloramientos de basalto, se halla un altar Olmeca en etapa de edificación. Esto sugiere que, tras obtener la forma inicial de la escultura, esta se trasladaba a su sitio final donde se le daba su terminación definitiva. (González Lauck, 2000).

Según el Geólogo Garniss H. Curtis, en su análisis de las Excavaciones en la Venta (Drucker et al., 1959), los materiales utilizados para los artefactos y la piedra de construcción en La Venta pueden clasificarse fácilmente en tres tipos principales de roca: metamórfica, ígnea y sedimentaria.

En el grupo metamórfico hay una gran variedad de texturas, pero antes del metamorfismo la mayoría de estas rocas eran de origen ígneo. Algunas de ellas, debido a su tamaño de grano grueso, podrían haber sido rocas intrusivas, la serpentina sin duda lo fue, pero la mayoría son de grano fino y probablemente de origen volcánico extrusivo (Drucker et al., 1959). La mineralogía de estas rocas volcánicas es sencilla, la mayoría están compuestas por agregados de proporciones variables de no más de tres minerales del siguiente grupo: albita, epidota, zoisita, actinolita, ferrotremolita, clorita, moscovita, antigorita y estilpnomelano (Drucker et al., 1959; Filloy Nadal et al., 2013). Este conjunto de minerales es indicativo de metamorfismo dominado bajo condiciones físicas uniformes de baja intensidad. Las rocas que han sido recristalizadas en tales condiciones pertenecen a la facies de esquistos verde, que se forman en condiciones de presión y temperatura específica, asociado a un tipo de metamorfismo regional bajo. La nefrita y la jadeíta,

con las que se fabricaron algunos de los artefactos, indican condiciones de metamorfismo de grado superior o quizá de metasomatismo. Sin embargo, es probable que también procedieran de la misma zona general de rocas metamórficas que los demás especímenes (Drucker et al., 1959).

Las rocas sedimentarias utilizadas son calizas margosas, feldespatos micáceos friables y cuarcitas negras. La mayoría de las rocas examinadas muestran más o menos efectos de la meteorización. En algunos especímenes, la meteorización ha convertido todos los minerales primarios de silicato en minerales de arcilla hasta una profundidad de 1,2mm. Tal alteración superficial es aparentemente posterior a la ocupación de La Venta, es decir, ha ocurrido en los últimos 2 milenios (Drucker et al., 1959). La utilización de los distintos tipos de roca por parte de los habitantes de La Venta no tendría nada de particular si no fuera por el hecho de que dos de ellos, el metamórfico y el volcánico, no se encuentran a muchos kilómetros de La Venta. La caliza y la arenisca locales de edad miocena que afloran en las proximidades de La Venta deberían haber sido satisfactorias para algunas necesidades constructivas, aunque es razonable que los habitantes de La Venta buscaran un material más duradero que la roca local poco consolidada para sus herramientas (Drucker et al., 1959).

En cuanto a por qué los habitantes de La Venta deseaban o necesitaban dos tipos de roca dura y duradera para monumentos y construcciones, no hay razones geológicas evidentes (Drucker et al., 1959). Las rocas metamórficas son algo más fibrosas que los basaltos, por lo que probablemente sean más duras y menos quebradizas. Sin embargo, los basaltos se componen de minerales más duros, lo que para muchos fines podría ser una característica más deseable. Probablemente las razones estéticas dictaron las dos elecciones: los basaltos son equigranulares y de color gris a negro, mientras que las rocas metamórficas suelen tener una textura vetada y son de tonos verdes.

Los objetos manufacturados con distintos tipos de serpentinita han sido identificados en otros sitios arqueológicos Olmecas como El Manatí, El Macayal y La Merced (Robles Camacho, 2006; Robles Camacho et al., 2008). En La Venta, el tipo de roca más abundante es también la serpentinita (Drucker et al., 1959). Los yacimientos de serpentinitas en territorio mexicano se ubican en diferentes localidades: en el estado de Puebla se ubican en Tlachinola, Tecolutla y Tecamatlán; en el estado de Oaxaca se ubican en Concepción Pápalo, Vista Hermosa, El Llanón y Niltepec, y en el estado de Chiapas en San José Ixtepec (Robles Camacho et al., 2008).

Además, en territorio guatemalteco, hay importantes y extensos yacimientos en las sierras de Santa Cruz, Chuacús y de las Minas (Filloy Nadal et al., 2013), en la Figura 17 se muestra la ubicación de estos sitios importantes de serpentinita.



Figura 17. Yacimientos de serpentinita dentro del área de Mesoamérica (Robles Camacho et al., 2008).

Robles Camacho propone como posible fuente de origen los yacimientos de este tipo particular de roca que se encuentran ubicados en la Sierra de Juárez, concretamente en la región que corresponde a la traza de la falla inversa de Vista Hermosa, entre las localidades de Concepción Pápalo y Vista Hermosa, Oaxaca (Robles Camacho et al., 2008) (Figura 17). En virtud de lo anterior, resulta claro que, desde este yacimiento, los pueblos olmecas del Golfo de México habrían transportado a la región costera (desde fechas tan tempranas como 1500 a.C.) estos materiales preciosos de distintas tonalidades del blanco al verde y utilizados principalmente para la construcción de sus centros ceremoniales y plazas (Filloy Nadal et al., 2013).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

CAPITULO 4. METODOLOGÍA

4.1. Instrumentación y equipos

A continuación, se muestran los equipos utilizados en el levantamiento de datos magnéticos de este trabajo, de igual manera la descripción del GPS usado para la ubicación con coordenadas.

4.1.1 Magnetómetro de precesión libre de protones; magnetómetro G-857 (Geometrics)

El magnetómetro G-857 Geometrics®, proporciona una solución confiable y de bajo costo para una variedad de aplicaciones de mapeo y búsqueda magnética (Figura 18). La operación con una sola pulsación significa que el G-857 puede ser operado por personal de campo no técnico y utilizado en entornos de enseñanza (Tabla 3). Utilizando el método de precesión de protones bien establecido, el sistema permite realizar mediciones precisas prácticamente sin depender de variables como la orientación del sensor, la temperatura o la ubicación.

La opción de ciclo automático con cable sensor largo y conexión de alimentación externa permite que el G-857 se utilice como un instrumento de estación base para la medición de cambios diurnos en el campo magnético de la Tierra.



Figura 18. Magnetómetro G-857 Geometrics®.

Tabla 3. Detalles técnicos

Lista de especificaciones	
Resolución	0.01 nT
Sintonización	Automática o manual , rango de 20.000 90.000 nT
Memoria	65.000 lecturas de campo o estación base
Energía	Celda de gel recargable de 12 voltios
Dimensiones del equipo	
Consola	(18 x 27 x 9 cm; peso 2.7 kg) (7 x 10.5 x 3.5 pulgadas; 6 libras).
Sensor	Diámetro: 9 cm, largo: 13 cm, peso: 1.8 kg

Por mencionar algunos de los usos típicos de este tipo de magnetómetro en diferentes áreas del conocimiento, se enumeran las siguientes:

- Ambiental: encuentre rápidamente pozos, tuberías y tanques de almacenamiento abandonados.
- Arqueología: Realiza estudios básicos de arqueología magnética.
- Geología: Estudio de variaciones regionales en el campo magnético para aplicaciones mineras de petróleo y gas.

4.1.2. GPS Garmin eTrex 10

La unidad eTrex 10 dispone de una pantalla de 2,2 monocromo fácil de leer en cualquier situación de iluminación. Duradera y resistente al agua, la unidad eTrex 10 está diseñada para soportar las inclemencias meteorológicas y presenta una autonomía de la batería de 25 horas con 2 pilas AA. En las Tabla 4 y Tabla 5, se muestran algunas especificaciones de dimensiones físicas y de almacenamiento del GPS usado para este trabajo.

Tabla 4. Características físicas y de rendimiento del GPS Garmin eTrex 10.

Dimensiones físicas	2,1" x 4" x 1,3" (5,4 x 10,3 x 3,3 cm)
Tamaño de la pantalla (anchura x altura)	1,4" x 1,7" (3,6 x 4,3 cm); 2,2" en diagonal (5,6 cm)
Resolución de la pantalla (anchura por altura)	128 x 160 píxeles
Tipo de pantalla	transflectiva, monocroma
Peso	5 oz (141,7 g) con pilas
Batería	2 pilas AA (no incluidas); se recomienda NiMH o litio
Autonomía de la batería	25 horas
Interfaz	mini USB

Tabla 5. Mapas y memoria del GPS Garmin eTrex 10

Waypoints	1000
Pistas	100
Track log	10.000 puntos, 100 tracks guardados
Rutas	50

4.2 Levantamiento y adquisición de datos

El levantamiento de datos magnéticos se realizó con ayuda de dos magnetómetros de precisión protónica Geometrics G-857 de sensibilidad 0.1 nT, en un área aproximadamente de 2 km², la cual abarcó delimitadamente la zona arqueológica de La Venta. La toma de datos se llevó a cabo en un área de esas dimensiones para analizar el comportamiento de las anomalías magnéticas entre perfiles y tener un mejor análisis al momento de la interpretación. De igual manera, se hizo uso de un GPS Garmin eTrex 10 de mano, con datum de referencia WGS84, mismo que nos ayudó para marcar cada estación (punto) de los perfiles.

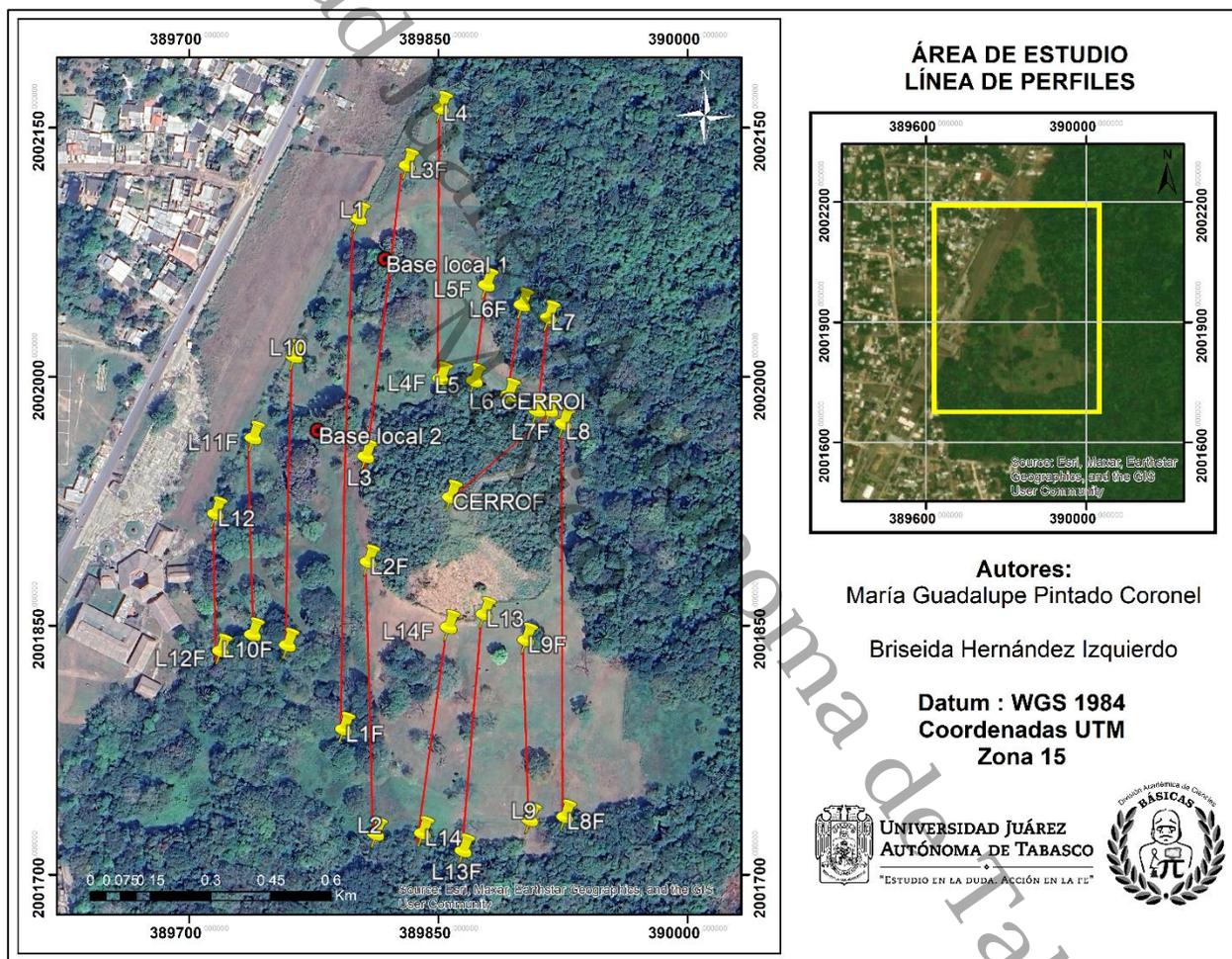


Figura 19. Ubicación de los perfiles en el área de estudio.

Para el primer día de trabajo se estableció una base local, con coordenadas $18^{\circ} 6' 16.51''$ N, $94^{\circ} 2' 28.94''$ O (2002067.79m N, 389817.85m E, para coordenadas UTM respectivamente), donde se tomaron lecturas del campo magnético cada tres minutos, esto por cuestiones de planeación del proyecto, donde se acordó tomar 3 lecturas por estación y realizar el promedio de los valores tomados para una mayor precisión al valor real en ese punto y de esta forma disminuir el error,

además de corroborar aquellas variaciones pronunciadas en algunas zonas del sitio arqueológico. En síntesis, para cada estación se tomó la hora de la medición, coordenadas de ubicación, las 3 lecturas de campo (cada 3 minutos) con un espaciado de 10 metros para obtener una resolución más detallada del estudio y finalmente su respectiva elevación. Posteriormente se guardó para su archivo, teniendo así el levantamiento de datos para 4 perfiles en paralelo al cerro y uno perpendicular a este. Es de importancia mencionar que la toma de datos para cada perfil se realizó en espacios vacíos y con presencia de mucha vegetación en los alrededores, así como algunas pequeñas elevaciones y depresiones.

Para el segundo día se realizó la misma metodología de levantamiento de datos, donde se reubicó la base local, con nuevas coordenadas $18^{\circ} 6' 13.19''$ N, $94^{\circ} 2' 30.25''$ O (2001966.02m N, 389778.77m E, para coordenadas UTM respectivamente). Se realizó el levantamiento de datos para 2 perfiles perpendiculares al cerro principal de la Zona Arqueológica de La Venta. Repetidamente se medía la intensidad del campo magnético por cada estación con ayuda del magnetómetro y así mismo se tomaban las coordenadas geográficas y la elevación para cada uno de los puntos del perfil, posteriormente se guardaron para su archivo.

En la Figura 19, se muestra la distribución de las 14 líneas de levantamiento de datos magnético, mismas que se agruparon en 7 perfiles para una mejor corrección de datos al momento de realizar el procesamiento.

4.3 Procesamiento de datos

Posteriormente de haber realizado el levantamiento de los datos en la Zona Arqueológica de La Venta, se continuo con el procesado de los datos adquiridos en campo, aplicando las debidas correcciones para poder obtener un mapa de anomalías magnéticas, mismo, que sirvió para elegir un perfil donde se encontrara una anomalía de interés que se pudiera estudiar y definir a través de un modelado geológico.

Para realizar las primeras correcciones de los datos obtenidos en campo, se utilizó el programa Microsoft Excel de la paquetería Office para ordenar la base de datos donde se pudo disponer de los perfiles, promediar los valores del campo magnético total, así como realizar las correcciones de variación diurna e IGRF (previamente mencionadas en el capítulo 2). En la Tabla 6, se muestra como ejemplo un conjunto de los datos, previamente corregidos y ordenados de un perfil tomado en campo, al cual llamaremos “L1” (Línea 1).

Tabla 6. Ejemplo de conjunto de datos en Excel de un perfil tomado en campo, datos procesados en Excel.

Line	Point	Latitud	Longitud	Topografía	Elevación	Mag_Campo	Mag_Diu	IGRF	Inc	Dec	Mag_IGRF
L1	448	18.104811	-94.041522	31.8	34.3	39132.86667	39132.8667	39191.5	46.0740	1.9031	-58.6333
L1	449	18.104669	-94.041525	32.2	34.7	39115.86667	39111.2000	39191.4	46.0738	1.9031	-75.5333
L1	450	18.104585	-94.04156	32.8	35.3	39128.66667	39126.3333	39191.4	46.0737	1.9031	-62.7333
L1	451	18.104487	-94.041571	33.4	35.9	39134.2	39131.8667	39191.3	46.0736	1.9031	-57.1000
L1	452	18.104361	-94.041595	34.0	36.5	39128.93333	39125.6000	39191.2	46.0734	1.9032	-62.2667
L1	453	18.104261	-94.041624	34.6	37.1	39124	39118.0000	39191.1	46.0733	1.9032	-67.1000
L1	454	18.104114	-94.041619	35.2	37.7	39061.06667	39055.0667	39191	46.0731	1.9032	-129.9333
L1	455	18.104016	-94.041647	35.8	38.3	39150.96667	39144.6333	39191	46.0730	1.9032	-40.0333
L1	456	18.103917	-94.041659	36.5	39.0	39125.1	39119.4333	39190.9	46.0729	1.9032	-65.8000
L1	457	18.103839	-94.04162	37.1	39.6	39118.66667	39110.3333	39190.8	46.0728	1.9032	-72.1333
L1	458	18.103742	-94.041597	37.8	40.3	39120.56667	39112.2333	39190.7	46.0726	1.9032	-70.1333
L1	459	18.103637	-94.041588	38.4	40.9	39115.03333	39108.7000	39190.7	46.0725	1.9032	-75.6667
L1	460	18.103551	-94.041597	39.0	41.5	39108.23333	39101.9000	39190.6	46.0724	1.9032	-82.3667
L1	461	18.103399	-94.041582	39.6	42.1	39117.8	39106.1333	39190.5	46.0722	1.9032	-72.7000
L1	462	18.103302	-94.041607	39.3	41.8	39121.66667	39110.0000	39190.4	46.0721	1.9033	-68.7333
L1	463	18.10323	-94.041632	38.8	41.3	39127.83333	39118.1667	39190.4	46.0720	1.9033	-62.5667
L1	464	18.103109	-94.041601	38.3	40.8	39125.7	39116.3667	39190.3	46.0719	1.9033	-64.6000
L1	465	18.103046	-94.04161	37.8	40.3	39161.23333	39148.2333	39190.3	46.0718	1.9033	-29.0667
L1	466	18.102949	-94.041586	37.4	39.9	39134.13333	39121.1333	39190.3	46.0717	1.9033	-56.1667
L1	467	18.102851	-94.041577	37.0	39.5	39143.96667	39129.3000	39190.2	46.0716	1.9033	-46.2333
L1	468	18.102744	-94.041573	36.6	39.1	39148	39143.6667	39190.2	46.0714	1.9033	-42.2000
L1	469	18.102657	-94.041603	36.2	38.7	39129.66667	39120.6667	39190.1	46.0713	1.9033	-60.4333
L1	470	18.102561	-94.041568	35.9	38.4	39115.03333	39105.0333	39190.1	46.0712	1.9033	-75.0667
L1	471	18.102409	-94.041604	35.6	38.1	39115.23333	39104.5667	39190	46.0710	1.9033	-74.7667
L1	472	18.10234	-94.041572	35.3	37.8	39127.8	39115.1333	39189.9	46.0709	1.9033	-62.1000
L1	473	18.102217	-94.041567	34.9	37.4	39128.33333	39115.6667	39189.9	46.0708	1.9033	-61.5667
L1	474	18.102066	-94.041574	34.6	37.1	39126	39115.0000	39189.8	46.0706	1.9034	-63.8000

Como se mencionó en el capítulo 2, para obtener el valor de la magnitud del campo tenemos que utilizar el modelo de Campo de Referencia Geomagnético Internacional (IGRF) más reciente.

Este proceso pudo haberse realizado en el programa Oasis Montaj[®], ya que este software tiene precargados los modelos de IGRF más recientes, pero para la versión utilizada en este trabajo solo se encontró disponible el modelo de IGRF hasta el año 2010. Sin embargo, se realizó el proceso de manera manual desde la página oficial del NOAA (*National Centers For Environmental Informations/ National Oceanic and Atmospheric Administration*, n.d.), donde obtuvimos por cada punto un valor de IGRF, además de un valor de inclinación y declinación que más adelante fue de ayuda para realizar algunos filtros. Una vez corregidos los datos en Excel, se utilizó el software Oasis Montaj[®] donde se terminaron de procesar los datos y se generaron mapas de anomalías magnéticas.

4.3.1 Generación de mapas de anomalías magnéticas

Una vez que los datos magnéticos han sido completamente corregidos y reducidos a su forma final, generalmente se muestran como grids y mapas, con el fin de ver e interpretar de una mejor manera las anomalías magnéticas que se pudieran presentar.

Los datos corregidos y reducidos fueron trasladados al software Oasis Montaj[®], donde se crearon los grids necesarios para aplicar algunos filtros que ayudaron a tener con más certeza las interpretaciones de los mapas. El proceso se llevó a cabo primeramente reordenando la base de datos desde el mismo programa donde se asignaron los canales correspondientes, además de convertir las coordenadas geográficas a proyectadas es decir a coordenadas UTM.

Antes de generar los primeros mapas en Oasis Montaj[®] con los datos magnéticos, se realizó un mapa topográfico de la Zona Arqueológica La Venta para complementar el trabajo de investigación aprovechando la toma de datos con el GPS Garmin eTrex 10, ya que no existe un mapa topográfico reciente de la zona de estudio. La Figura 20 muestra el mapa topográfico que se generó a partir de los puntos señalados en el mapa (triángulos color negro) y que ilustra el punto donde se tomó cada valor, también se pudo observar que hacia las esquinas del grid hay espacios en blanco, estos espacios son puntos donde no se tomaron datos, rellenarlos sería como poner datos falsos en esas áreas de los grids.

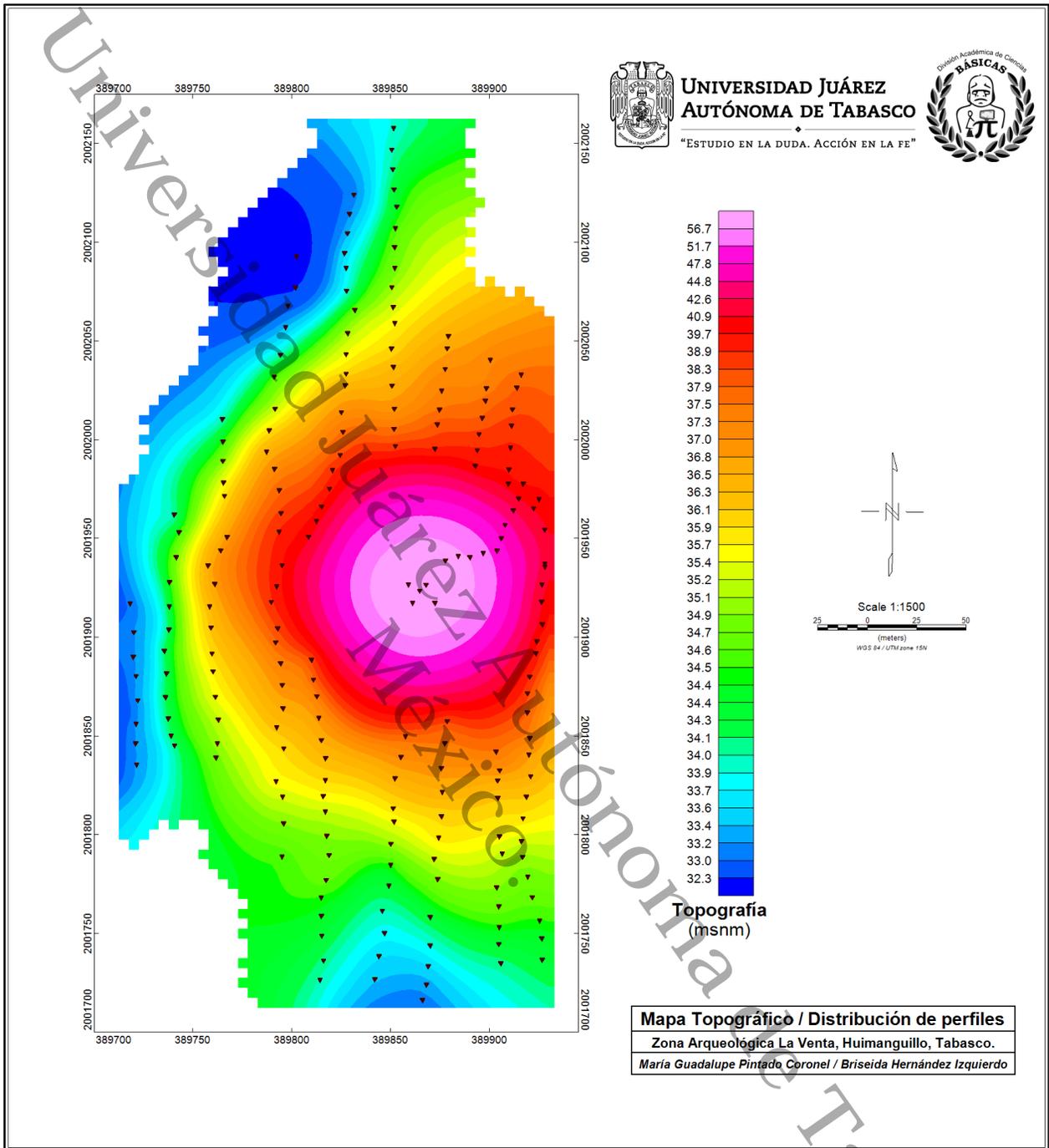


Figura 20. Distribución del levantamiento de los perfiles magnéticos en mapa topográfico.

A partir de la base de datos construida para el área de estudio se generó el grid de los datos crudos, es decir, un grid sin utilizar los valores de campo total corregidos y sin aplicar algún filtro que suavice las alteraciones presentes por algunos cuerpos anómalos (Figura 21).

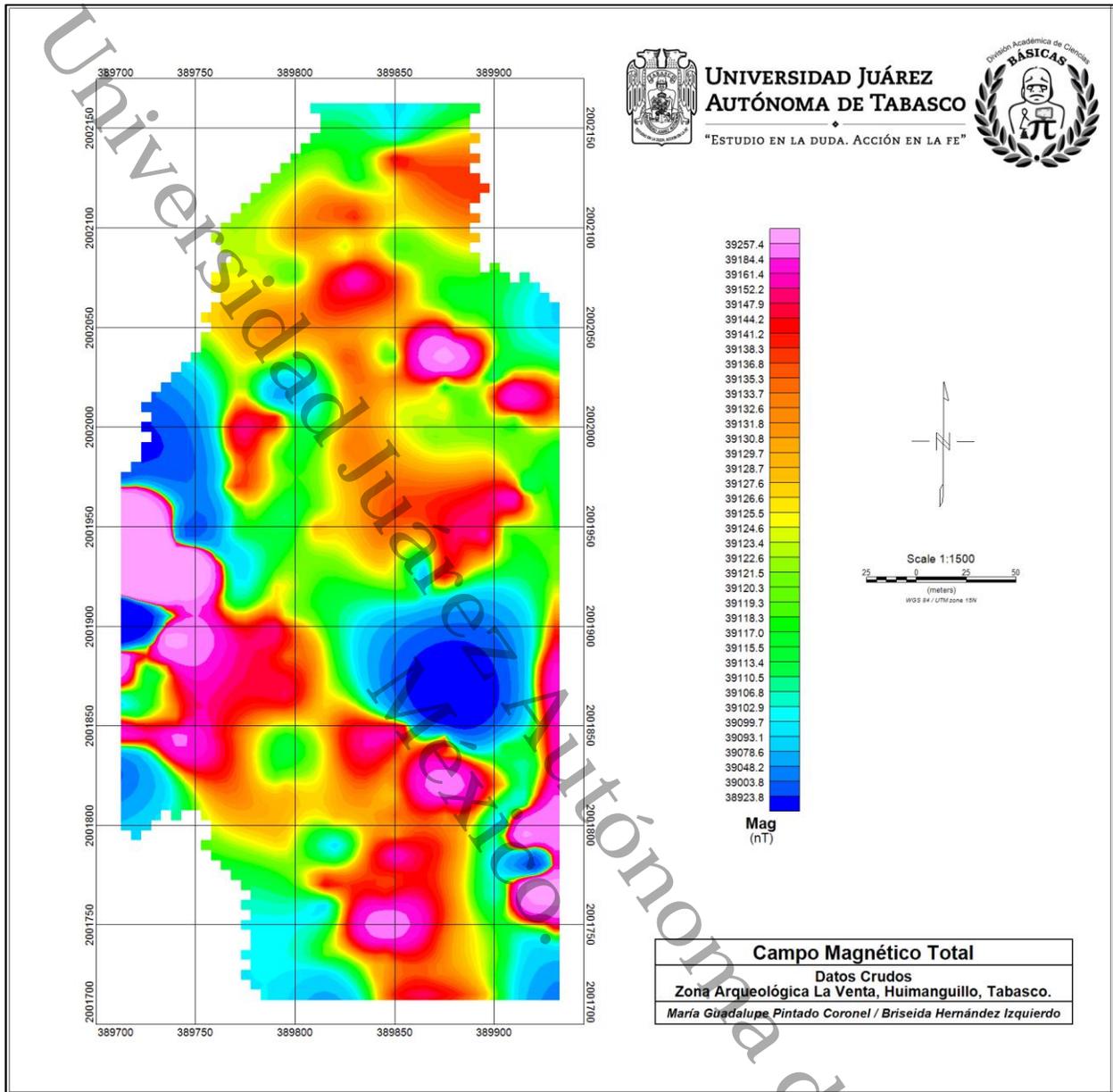


Figura 21. Mapa de campo magnético total (Datos crudos).

Siempre es útil usar otros métodos geofísicos en la misma zona para ayudar a delimitar interpretaciones. Si ya existe alguna información geológica para el área, entonces esta debería usarse para ayudar con las interpretaciones geofísicas (Reynolds, 2011). Para este trabajo fue de mucha utilidad información preexistente de diferentes autores, ya que a pesar de que en su momento aportaron los primeros mapas magnéticos e información del suelo, la información fue tomada con equipos menos actualizados, lo que pudo generar alguna carencia en su investigación. Parte del aporte en esta investigación es generar información reciente de la zona arqueológica de La Venta como los mapas presentados que puedan ser de interés para futuras investigaciones.

Al realizar el procesamiento de los datos y obtener los valores de campo magnético total corregidos, es decir habiendo realizado las correcciones por variación diurna e IGRF, los datos de campo magnético total se encuentran listos para que sean presentados a través de un mapa. La Figura 22, muestra el mapa de campo magnético total corregido, el cual se usa para aplicar filtros y ubicar anomalías presentes en la zona de estudio.

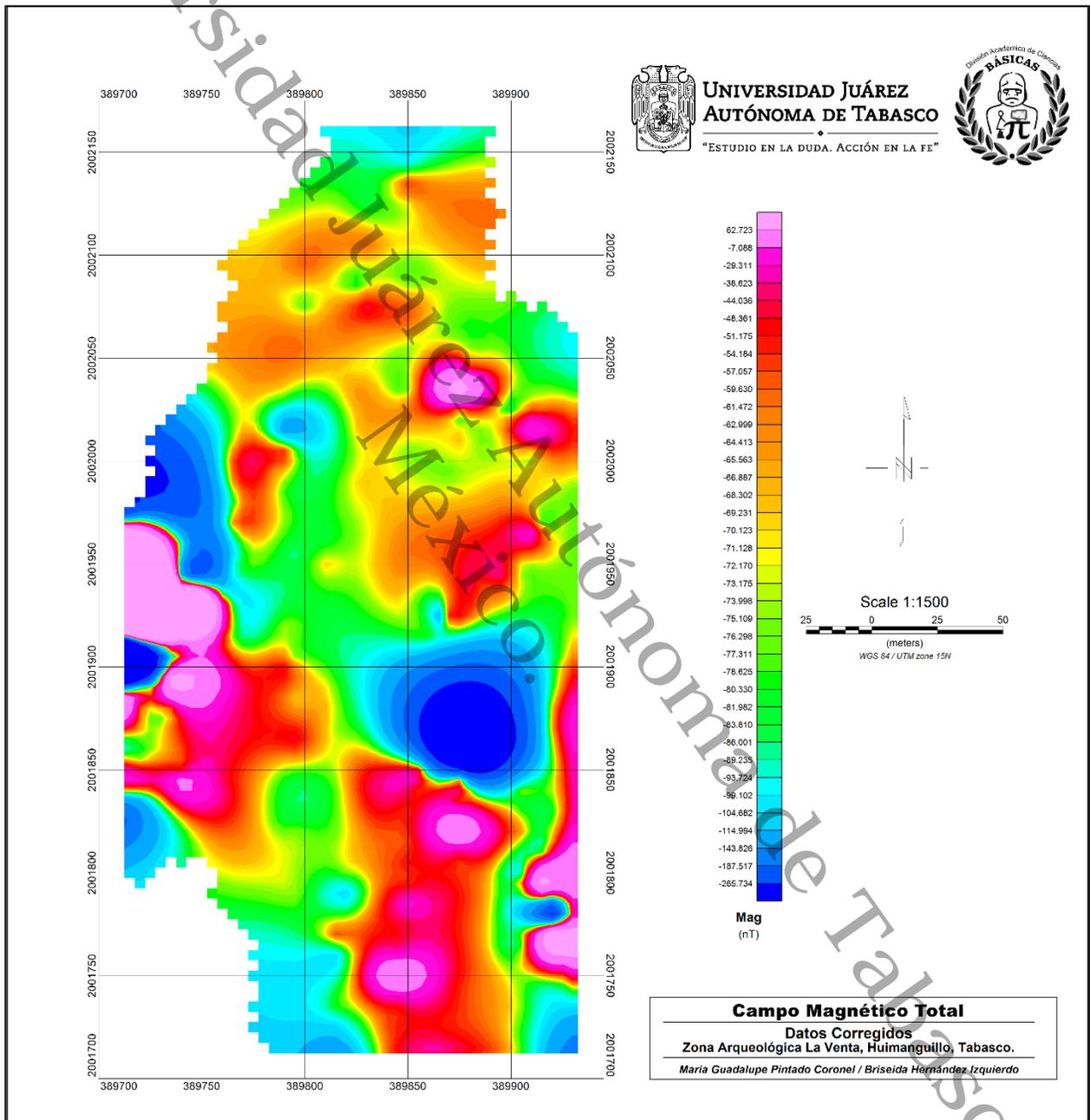


Figura 22. Mapa de campo magnético total corregido.

4.4 Análisis de filtros

Las estrategias de suavizado, filtrado y realce de irregularidades empleadas en el manejo de datos magnéticos son similares al procesado gravimétrico, a excepción del filtro de reducción al polo, que es específico para los datos magnéticos. (Reynolds, 2011). Los filtros utilizados también se encuentran en el dominio de la frecuencia, por lo que, también se hace uso de la transformada de Fourier en casi todos los filtros (Reynolds, 2011). La aplicación de estos filtros a los datos magnéticos es a través de la extensión MAGMAP Filtering del programa Oasis Montaj® y es importante señalar que para aplicar cualquiera de estos filtros se estará usando los valores de la magnitud IGRF, es decir, los valores de respuestas que tienen las anomalías y rocas en la corteza; y dependiendo de los objetivos que se quieran lograr en el mapa se pueden aplicar distintos tipos de filtros.

Para el presente trabajo se eligieron los filtros de Reducción al Polo (RTP), Señal Analítica (SA), Filtro de Pasa Altas (PA) y Derivada Vertical (DV). Para definir mejor las anomalías, se aplicó filtros sobre filtros, con el fin de aprovechar lo que cada filtro nos ofrece para una mejor interpretación de los mapas, según sea el caso.

4.4.1. Reducción al polo (RTP)

Está claro que la forma y amplitud de los perfiles magnéticos sobre una característica magnetizada determinada varía dependiendo de la latitud magnética en la que se encuentra la fuente. Esto puede generar dificultades a la hora de interpretar directamente mapas de anomalías de la intensidad magnética total (TMI). Una forma de simplificar la interpretación es eliminar los efectos de la latitud geomagnética aplicando un filtro matemático a los datos de intensidad magnética total en cuadrícula (grid) para producir un mapa de anomalías que habría resultado si el área de interés se hubiera estudiado en el polo norte magnético, es decir, aplicar una conversión de las anomalías observadas a su forma equivalente en el polo norte magnético (Reynolds, 2011). Este proceso se conoce como Reducción al Polo (RTP) y fue desarrollado originalmente por Baranov (1957) y Baranov y Naudy (1964).

Suponiendo que todo el campo magnético medido en un área de estudio se debe a la inducción magnética, la reducción de los polos se puede calcular en el dominio de la frecuencia utilizando un operador matemático de reducción al polo propuesto por Grant y Dodds (1972).

$$\text{Operador RTP } L(\theta) = \frac{1}{[\sin(I) + i \cos(I) \cos(D - \theta)]^2} \quad (9)$$

Donde:

Θ , es la dirección del número de onda

I, es la inclinación magnética

D, es la declinación magnética

La herramienta MAGMAP está disponible en el programa de Oasis Montaj® para utilizar este filtro matemático directamente en una retícula con una intensidad total de campo magnético. El filtro se utiliza en el dominio de Fourier con el objetivo de trasladar el campo observado a partir de la inclinación y declinación magnética detectadas, de tal forma que el campo magnético se pueda percibir como si estuviese en el polo norte magnético.

La disminución al polo facilita la comprensión de irregularidades magnéticas, dado que cualquier anomalía en el campo disminuido al polo puede ser atribuida a la geometría y características magnéticas de la fuente (Argote Espino, 2002). Una restricción de la utilización del filtro de reducción al polo es que puede generar ruido en la retícula resultante si esta presenta anomalías de alta frecuencia y amplitud elevadas. El método de reducción al polo amplifica el ruido especialmente dentro de los datos de anomalías de la intensidad magnética total (TMI) en áreas de estudio en latitudes magnéticas bajas, y también se ve afectado por la presencia de magnetización remanente dentro de los cuerpos fuente (Argote Espino, 2008).

En la Figura 23 se muestra el mapa de reducción al polo, donde se observa e identifican algunas anomalías magnéticas provocadas por diversas fuentes que aún desconocemos. La finalidad de este mapa es comenzar a demarcar y puntualizar zonas con posibles fuentes anómalas.

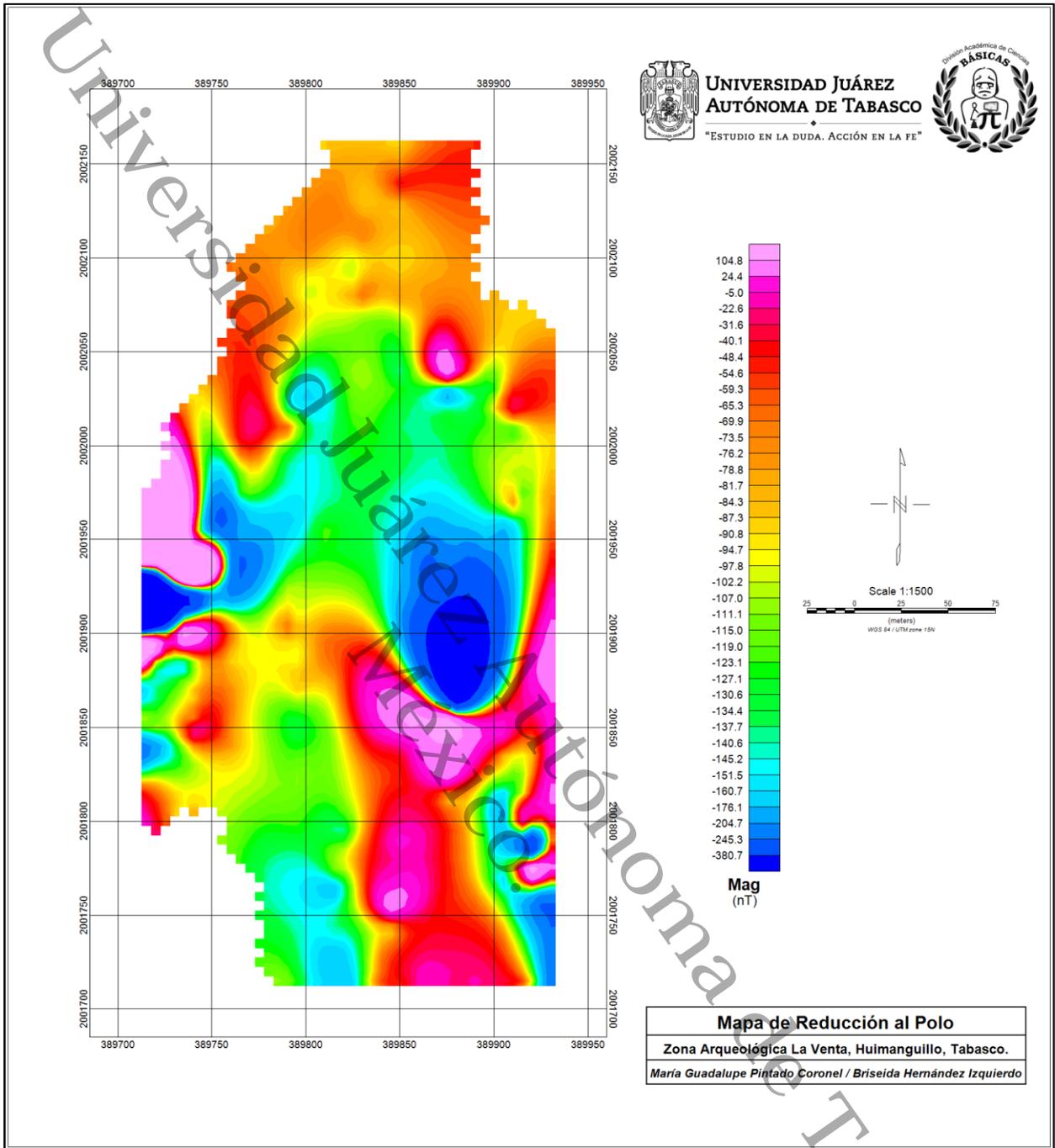


Figura 23. Mapa de reducción al polo aplicado a los datos magnéticos corregidos.

4.4.2. Filtro de señal analítica

La amplitud de la señal analítica está relacionada con la amplitud de la magnetización (ver ecuación 10). Cabe destacar que es una función simétrica en forma de campana cuyo máximo se ubica encima del contacto entre cuerpos, siendo el ancho de la curva de amplitud proporcional a la profundidad del mismo (Fantón et al., 2014).

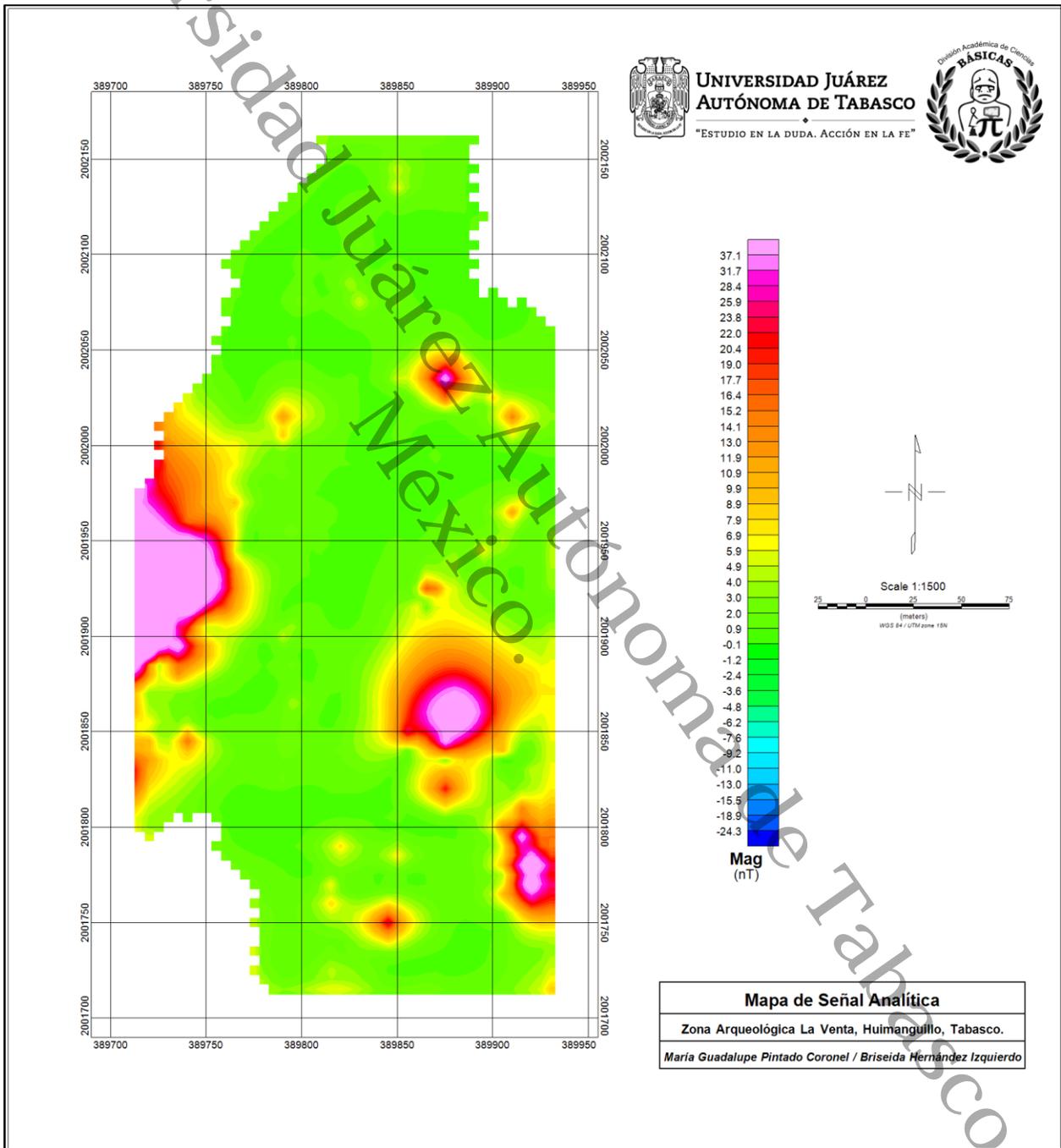


Figura 24. Mapa de Señal Analítica aplicado a los datos magnéticos corregidos.

Matemáticamente, el filtro de señal analítica se puede llegar a expresar de la siguiente manera:

$$A(X, Y) = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial Y}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial Z}\right)^2} \quad (10)$$

A: es la amplitud de la señal analítica.

M: es el campo magnético anómalo observado en x, y.

En la Figura 24, se muestra la aplicación del filtro de señal analítica al mapa de intensidad magnética, en el cual se puede analizar con mucha facilidad la ubicación de varias fuentes anómalas y con una mejor definición para tener puntos de interés. Esta primer observación se logra gracias a que este filtro permite resaltar las anomalías magnéticas producidas por discontinuidades geológicas de mediana a corta longitud de onda (Fantón et al., 2014).

El mapa de señal analítica fue de mucha utilidad para elegir los perfiles que se tomaron para generar el modelado geológico de las anomalías causadas por cuerpos desconocidos.

4.4.3. Filtro pasa altas

Es posible suprimir ciertas frecuencias de la información magnética, simplemente suprimiendo un rango específico del espectro total de frecuencias de los datos. Si el conjunto de datos magnéticos contiene una serie de anomalías de alta frecuencia vinculadas a fuentes superficiales y la alta frecuencia es especialmente importante (como en este caso de estudio), es posible eliminar las anomalías profundas, que se asocian con las frecuencias bajas a través del uso del proceso de filtrado de pasa alta. (Fantón et al., 2014).

El programa Oasis Montaj® contiene diferentes tipos de filtros, donde se aplica Transformada rápida de Fourier, según sea el caso. Para el filtro de pasa altas se ingresó el grid de campo magnético corregido realizado previamente, generándose un nuevo grid con el filtro aplicado. La mayoría de los filtros consiguen los resultados más favorables cuando las fuentes emisoras de superficie y profundidad proporcionan señales que no posean frecuencias habituales.

En la Figura 25, se puede observar como el filtro de pasa altas resalta las anomalías mostrando claramente algunos picos de frecuencias altas donde se pueda encontrar la alteración por algún cuerpo anómalo. Sin embargo, no se puede apreciar con claridad algún conjunto de puntos el cual sirva para definir los perfiles que se elegirán para ser modelado.

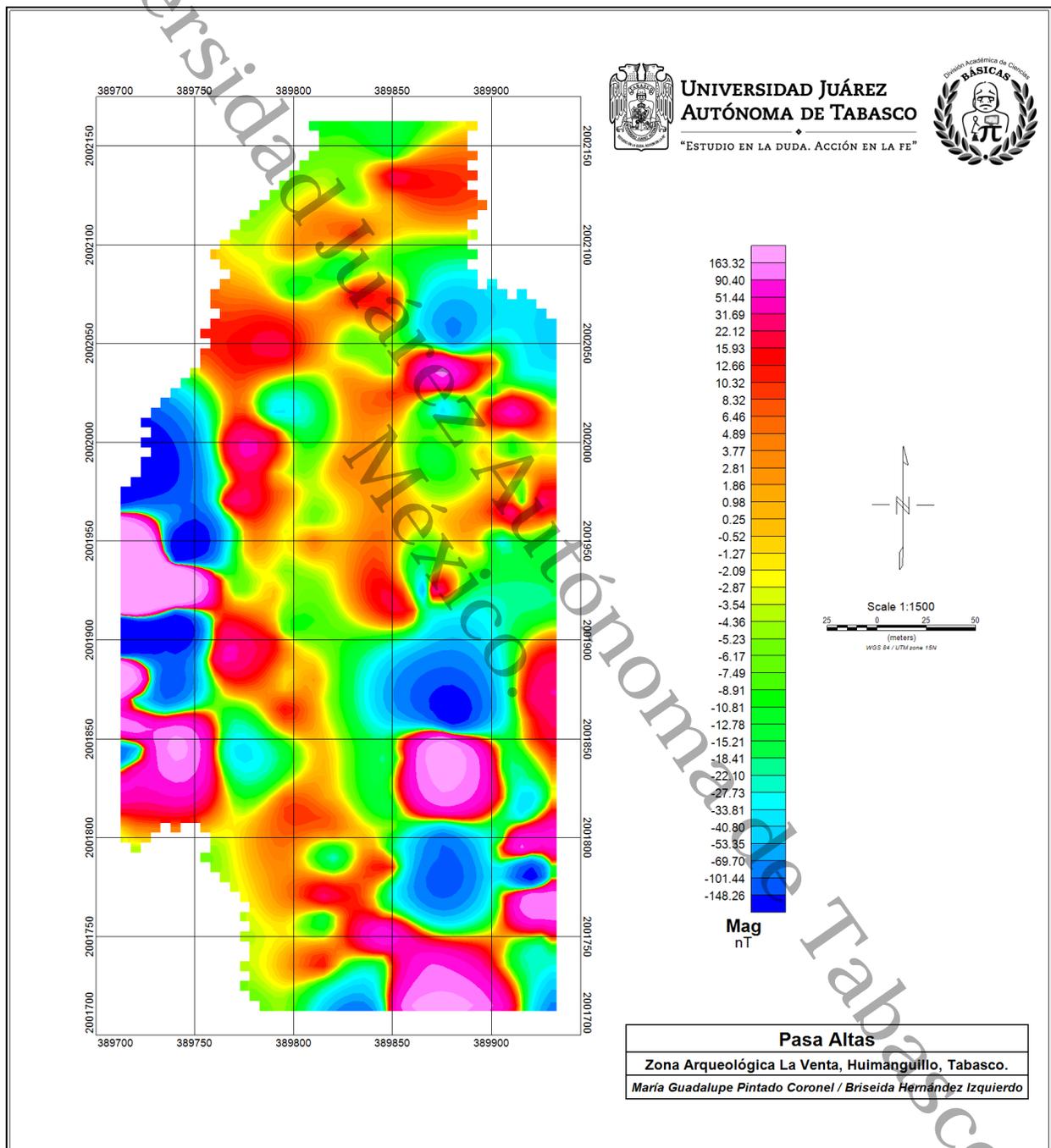


Figura 25. Mapa de filtro pasa altas aplicado al grid de campo magnético corregido.

4.4.4. Primera derivada vertical

Diversas derivadas verticales del campo magnético pueden ser calculadas multiplicando el espectro de amplitud del campo por un factor de forma:

$$DV = \frac{1}{n} [(\mu^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}]^n \quad (11)$$

Donde:

DV, es la derivada vertical.

n, es el orden de la derivada vertical.

μ y v : son los números de onda según la dirección x e y (respectivamente).

La primera derivada vertical (gradiente vertical) equivale físicamente a cuantificar el campo magnético al mismo tiempo en dos puntos verticales, uno por encima del otro, restando los valores correspondientes y dividiendo el resultado por la separación vertical espacial entre ambos puntos de medición.

La ecuación de la frecuencia de respuesta de estas operaciones indica que el proceso incrementa las frecuencias en comparación con las bajas. Esta característica constituye el fundamento para la implementación del proceso de derivación, que elimina los efectos regionales de alta longitud de onda y soluciona los efectos de anomalías someras. (Fantón et al., 2014).

Como se muestra en la Figura 26, se realiza un análisis visual de varias anomalías someras que afectan el mapa, identificada como aquellos puntos con colores cálidos (rojos y rosa) donde se realzan las frecuencias altas en el mapa, en términos simples la primera derivada vertical nos ayuda a delimitar los bordes de la fuente. Este mapa se generó usando el grid de campo magnético corregido, donde el programa aplica la correspondiente Transformada de Fourier, y se puede elegir el orden de la derivada vertical, ya sea de primer, segundo o tercer orden.

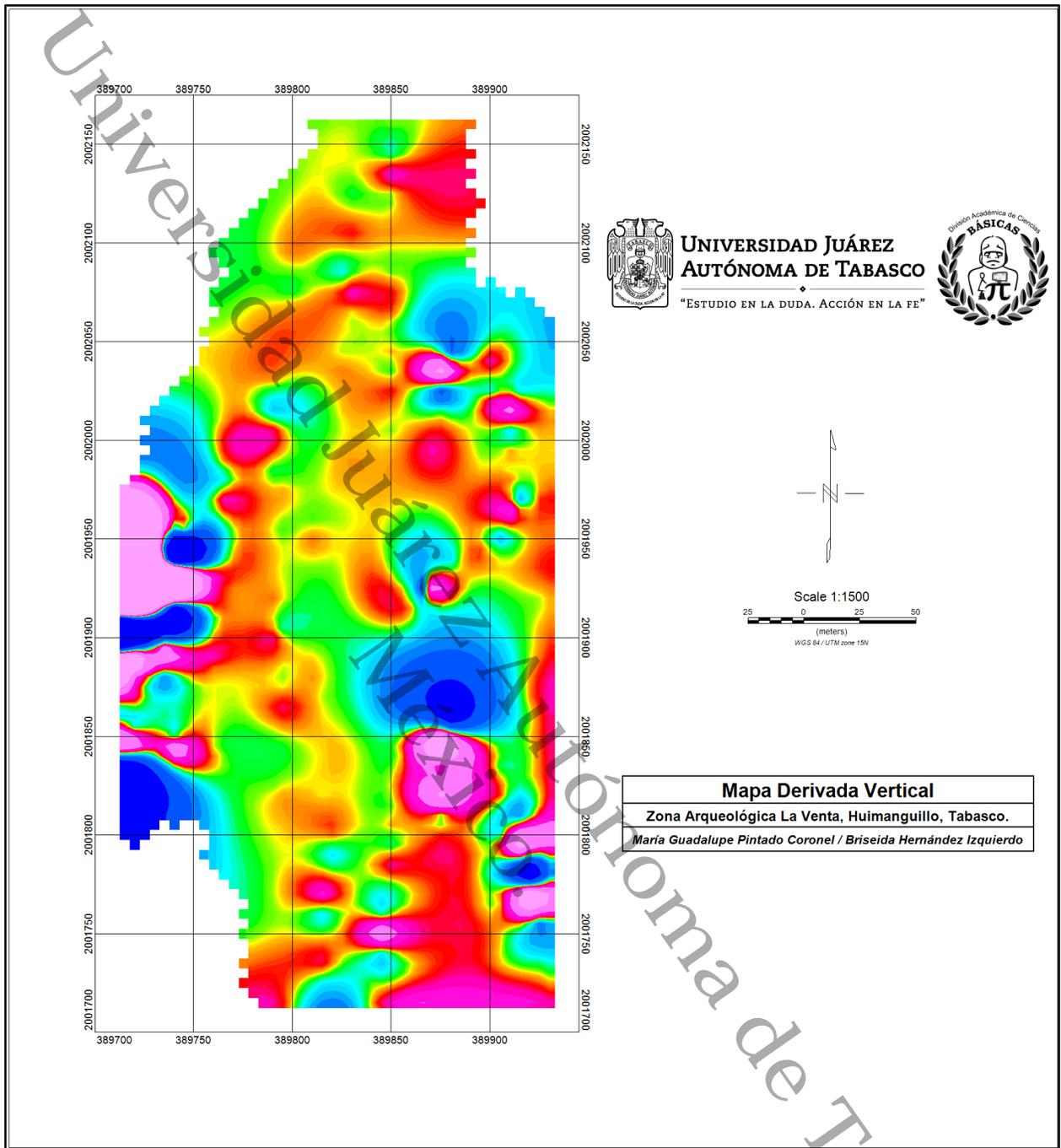


Figura 26. Mapa de derivada vertical aplicada al grid de campo magnético corregido.

4.5. Deconvolución de Euler localizada

En la década de 1980 se desarrolló una técnica, conocida como método de deconvolución de Euler, para procesar datos magnéticos y convertirlos en una fuente puntual en profundidad (Fantón et al., 2014). El método opera sobre los datos directamente y proporciona una solución matemática sin recurrir a ninguna limitación geológica (Reynolds JM, 2011). Esto tiene la ventaja que la interpretación derivada de Euler no está limitada por ninguna idea geológica preconcebida y, por lo tanto, puede usarse críticamente para evaluar interpretaciones geológicas y particularmente estructurales.

El método de Euler utiliza la intensidad del campo magnético en cualquier punto, en términos del gradiente del campo magnético total, expresado en coordenadas cartesianas (Reynolds, 2011). Además, estos gradientes están relacionados con diferentes fuentes magnéticas, mediante una función denominada *Índice Estructural*, n . La ecuación de Euler se presenta de la siguiente forma:

$$(x - x_o) \frac{\delta T}{\delta x} + (y - y_o) \frac{\delta T}{\delta y} - z_o \frac{\delta T}{\delta z} = N(B - T) \quad (12)$$

Donde x_o , y_o , z_o son las coordenadas de una fuente magnética cuya intensidad de campo total T y valor regional B se miden en un punto (x, y, z) ; N es el grado de homogeneidad y se conoce como el *índice estructural*. Para dos dimensiones (x, y) , la ecuación de Euler se reduce a:

$$x_o \frac{\delta T}{\delta x} + z_o \frac{\delta T}{\delta z} + NB = x \frac{\delta T}{\delta x} = NT \quad (13)$$

Las únicas incógnitas son x_o , y_o y N ; gradiente de T con respecto a x y k pueden derivarse de los datos magnéticos medidos, esta expresión se asume que es igual a cero.

$$\frac{\delta T}{\delta y}$$

El principal beneficio de utilizar el método de Euler, es que ayuda a delimitar lineamientos debido a fallas o intrusiones lineales importantes y estas características se visualizan mejor con las soluciones de Euler si son inclinadas, en lugar de verticales.

La técnica ofrece un método de interpretación independiente que puede utilizarse para evaluar los modelos geológicos existentes (Reynolds, 2011). El programa Oasis Montaj® cuenta con la extensión “Euler3D” computarizada del proceso de Deconvolución de Euler, a través de la cual permite evaluar mapas de intensidad magnética mostrando valores de profundidad localizada y finalmente generar las soluciones para todo el mapa de intensidad magnética con ayuda de los valores de índice estructural. Para esta extensión se cuentan con los siguientes procesos:

1. **Standard Euler Deconvolution.** Para el proceso de Deconvolución Estándar de Euler, es necesario ingresar las derivadas en x, y, z del grid que se desea evaluar (este proceso lo realiza el software previamente) y es necesario definirle al software un tamaño de ventana (que va en función del tamaño de la anomalía) y un valor de índice estructural. Para este último, el software solo maneja números enteros, los cuales se definen como se muestra en la siguiente Tabla 7.

Tabla 7. Valores de índice estructural definidos por Oasis Montaj®.

Indice Estructural	Geometría sugerida por Oasis Montaj®
0	Contacto
1	Dique
2	Cilindro
3	Esfera

2. **Located Euler Deconvolution.** Para el proceso de Deconvolución de Euler Localizada también es necesario contar con las derivadas en x, y, z del grid que se desea evaluar. En este mismo proceso el programa necesita aplicar Señal Analítica sobre el grid que se desea evaluar, para bordear fuentes y centralizar anomalías existentes. Posterior a estos pasos el programa solo nos pedirá definir el valor de índice estructural con el cual se necesita evaluar el grid. Para el tamaño de ventana el software tiene datos variables a partir de las anomalías encontradas.
 - a. **Located An-Euler Solutions.** Para obtener las Soluciones de Euler Localizadas es necesario realizar los pasos del punto 2, previamente explicados. Con esta opción, ya no es necesario definir al software un tamaño de ventana y un valor de índice estructural, puesto que, al procesar los datos variables a partir de las anomalías encontradas, automáticamente nos proporciona estos valores.

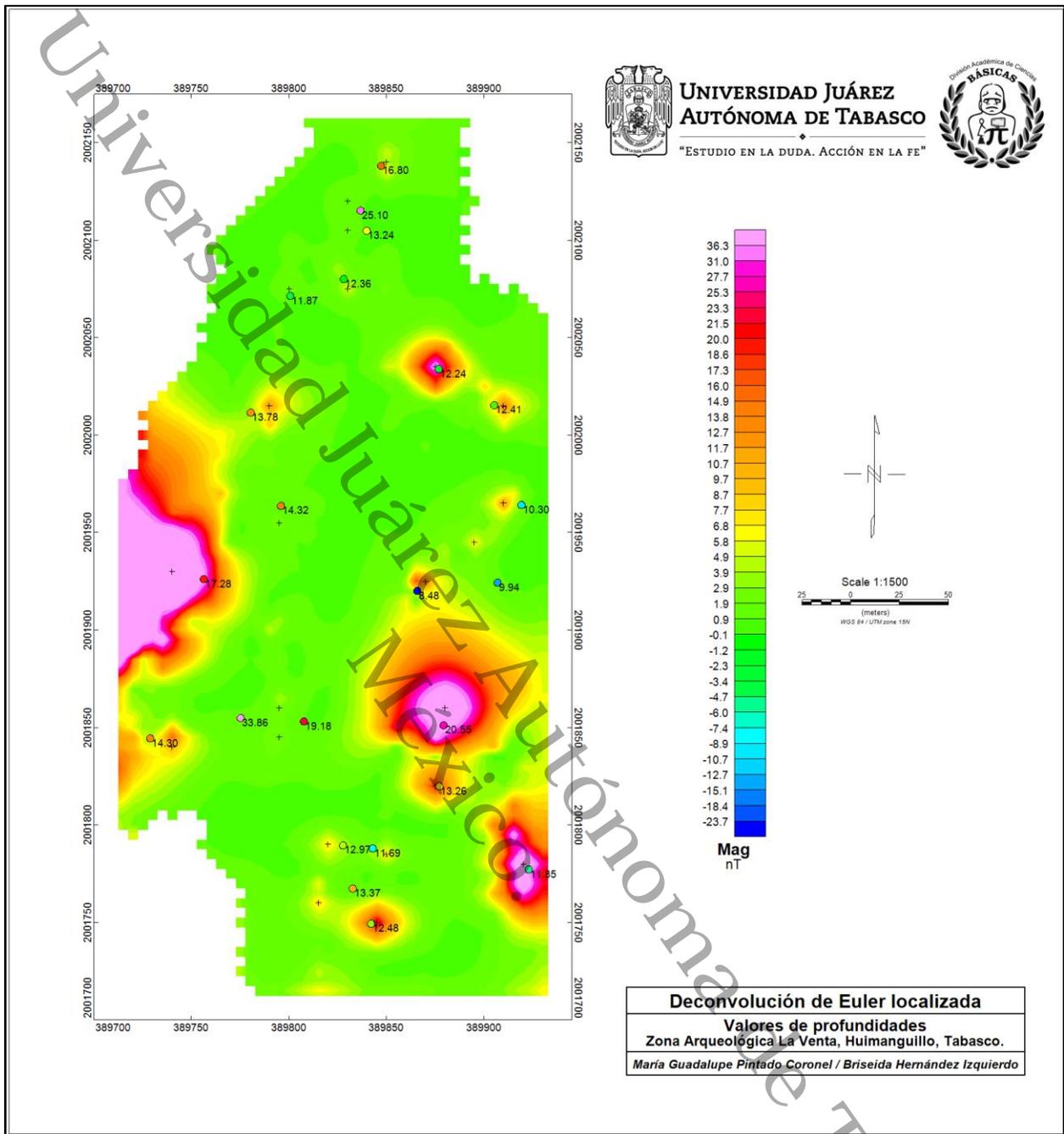


Figura 27. Mapa de Deconvolución de Euler con valores de profundidades.

En Oasis Montaj®, cargamos el menú “Euler 3D”, eligiendo la opción “Process Grid” donde procesamos el grid de intensidad magnética obteniendo matemáticamente las derivadas en las tres componentes x , y , z .

Seguidamente continuamos con la opción “Located Euler Decon”, donde se realizó paso a paso el proceso; obtener un nuevo mapa de señal analítica a partir de las derivadas en las tres componentes de todo el mapa, generar los picos de anomalías y aplicar deconvolución de Euler.

Para este caso, se decidió evaluar todo el mapa con los tres valores de índice estructural que el programa permite (1, 2, y 3) y se optó por elegir el mapa evaluado con el valor de índice estructural 3, tomando en cuenta la referencia de las geometrías sugeridas de los valores de índice estructural en la Tabla 8.

En la figura 27 se muestra el mapa con las soluciones y profundidades de todo el grid de intensidad magnética, evaluado con el índice estructural 3. Desde aquí comenzamos a analizar y considerar el perfil a elegir para modelar en 2D.

En la Tabla 8, se muestran valores de índice estructural, los cuales al momento de interpretar resultados nos ayudaron a determinar la posible geometría de las anomalías encontradas en la zona de estudio.

Tabla 8. Valores de índice estructural (Reynolds, 2011).

Índice Estructurales		
Contacto geológico vertical	Bordes de figuras	0 a menos de 0.5
Hoja infinita		0
Paso grueso		0.5
Figura irregular	Lamina de metal	1
Cilindro vertical	Pozo / tambor	2 - 2.25
Cilindro con orientación desconocida	Tambor	2.5
Cilindro horizontal	Tubería / tambor	2 - 2.75
Dipolo puntual		3
Esfera	Tanque	3

En la Figura 28 una vez aplicada la “Deconvolución de Euler Localizada” se obtuvieron los valores de índice estructural sugeridos por el programa para cada anomalía, mismos que más adelante fueron comparados con los valores de la Tabla 8, donde tendríamos en cuenta cual sería la forma geométrica del cuerpo que está produciendo la anomalía.

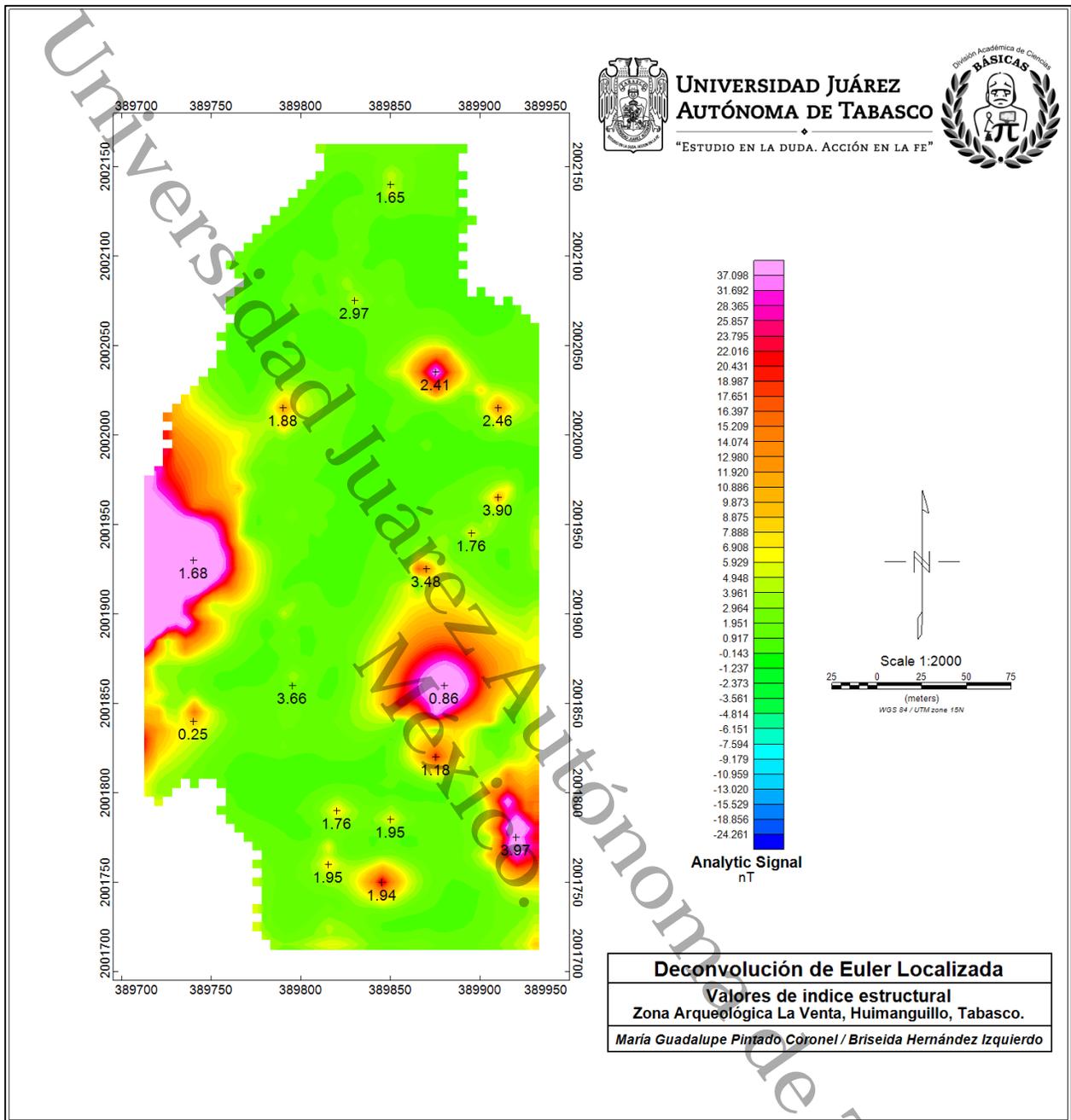


Figura 28. Mapa de Deconvolución de Euler con valores de índice estructural.

4.6. Perfiles de interés

Una vez analizado el mapa de anomalía magnética con el filtro de señal analítica, se observa que existen varias anomalías puntuales, de las cuales, se consideró trazar dos perfiles donde se atravesara la anomalía para obtener un perfil de anomalía más oportuno de modelar. Con base en el análisis de las anomalías presentes en el área de estudio, se proponen los siguientes perfiles “S-A1” y “S-B1” (Figura 29), los cuales, con ayuda de las anotaciones realizadas en campo, se eligieron donde algún material u objeto no estuviera afectando en gran medida la toma de datos y en consecuencia la interpretación del mapa.

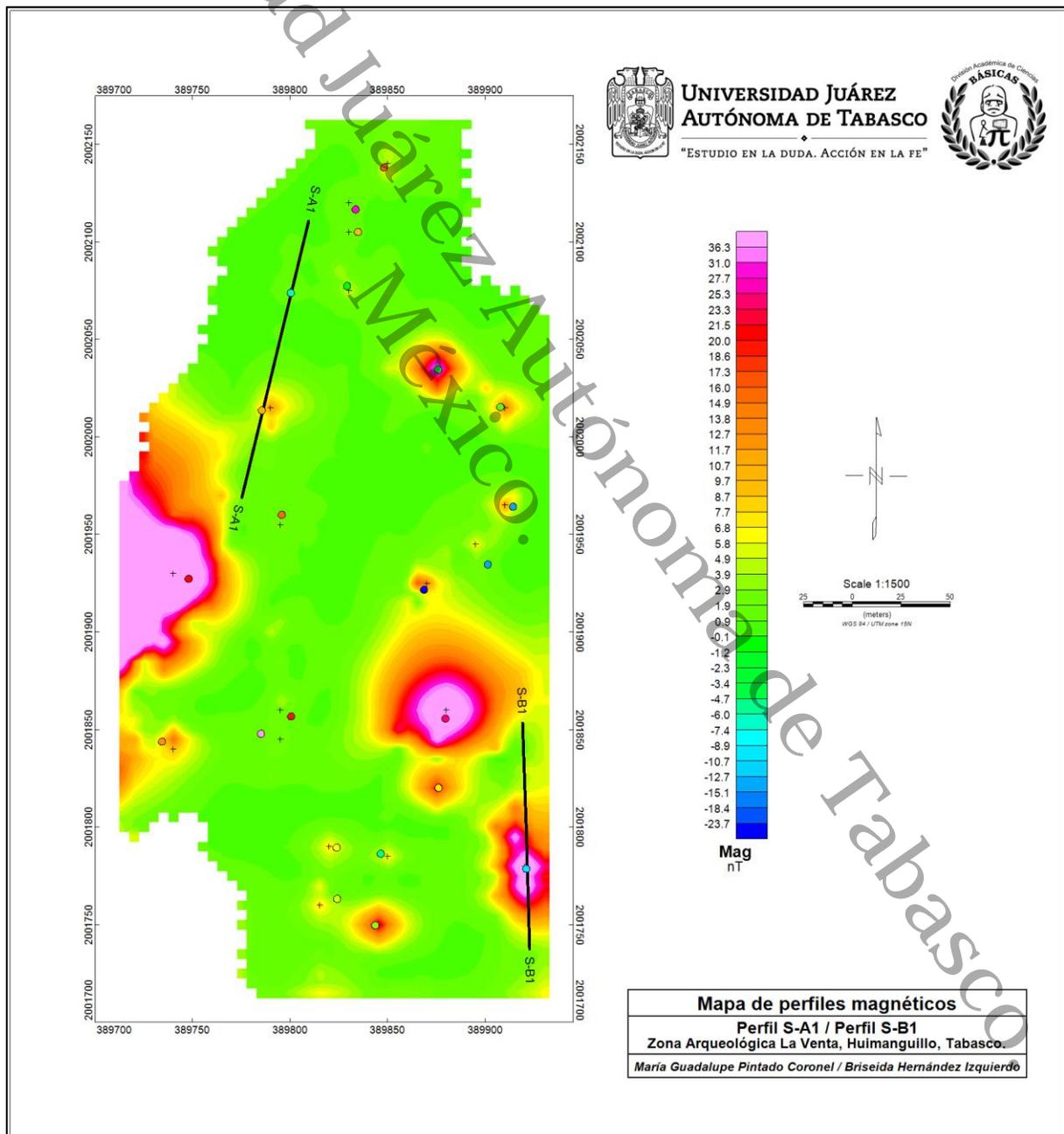


Figura 29. Mapa de perfiles magnéticos sobre puestos sobre el grid de señal analítica.

El perfil S-A1 se encuentra trazado en la parte Norte (N) del mapa de intensidad magnética (Figura 29) con una dirección noreste-suroeste de la zona de estudio y una distancia de 145 metros, caracterizándose por pasar entre una anomalía magnética con una profundidad aproximada de 13 metros y un valor de índice estructural de 2 obtenido con el proceso de deconvolución de Euler explicado anteriormente.

El perfil S-B1 se encuentra trazado en la parte Este (E) del mapa de intensidad magnética (Figura 29) con una dirección norte-sur de la zona de estudio y una distancia de 117 metros, esta se caracteriza principalmente por atravesar entre lo que parecieran ser 2 anomalías magnéticas con una profundidad aproximada de 12 metros y un valor de índice estructural de 3.9 obtenido con el proceso de deconvolución de Euler explicado anteriormente.

Una vez que se trazaron los perfiles se realizó un modelado por cada perfil mencionado (S-A1 y S-B1) en 2D con la herramienta GM-SYS en Oasis Montaj[®], que más adelante se explica y discute.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

CAPITULO 5. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

5.1. Análisis de anomalías y Deconvolución de Euler localizada

Como bien se presentó con anterioridad en este trabajo, se logró hacer el análisis de anomalías magnéticas y modelado de los perfiles, el cual se desarrolló con ayuda del procesado de los datos en Oasis Montaj[®].

En un primer momento se realizó el mapa de campo magnético total, del cual partimos para realizar un mapa de campo magnético corregido. Es importante señalar que en el programa Oasis Montaj[®], los filtros aplicados se realizaron usando el grid con los valores de la magnitud IGRF, es decir, los valores de respuestas que tienen las anomalías y rocas en la corteza, de los cuales el uso dependió de los objetivos que logramos de los mapas. Para este caso, el filtro que más favoreció para fines prácticos del procesado y análisis fue el filtro de señal analítica, puesto que permitió resaltar anomalías magnéticas de manera más puntual, cuyos valores máximos se ubicaron encima del contacto entre cuerpos.

Seguidamente, partiendo de los datos con el filtro de señal analítica, se generó para todo el grid los “picks” o puntos de las soluciones propuestas por el software para todo el mapa y aplicamos la “Deconvolución de Euler” que fue de utilidad para obtener valores de profundidad (Figura 27), abriendo de esta forma el panorama para analizar los mapas e ir eligiendo un posible perfil, ya sea trazado manualmente o utilizando de los existentes al momento del levantamiento en campo.

Posteriormente se aplicó la “Deconvolución de Euler Localizada”, donde ahora no solo contábamos con datos de profundidades si no que el programa aplicaba de manera matemática la ecuación de Euler (ver ecuación 12) , y como resultado tuvimos valores de índice estructural sobre los “picks” (Figura 28), que más adelante fue de mucha ayuda para hacer la comparación con la Tabla 8 (Capítulo 4.5) y determinar aproximadamente la forma del cuerpo que está generando la anomalía en el punto elegido y proponer esa forma en nuestro modelo.

5.2. Modelado Magnético en 2D (GM-SYS)

GM-SYS es una herramienta de extensión para interpretar datos de perfiles gravimétricos y magnetométricos del programa Oasis Montaj[®] que ayuda a crear un modelo geológico del subsuelo comparando las respuestas gravitatorias y magnéticas del modelo con las mediciones observadas, además de que se pueden integrar datos de sísmica, topografía, geología, entre otras. GM-SYS permite realizar un modelaje directo e inverso, donde la profundidad es positiva hacia abajo (debajo del nivel del mar) y negativa hacia arriba (arriba del nivel del mar), además de presentar un prototipo de modelo con espacio “semi infinito”, ya que puede presentar horizontes de hasta 30,000km con profundidades de 50km (GEOSOFT, 2012).

5.2.1. Perfil S-A1 y modelo geológico

El perfil S-A1 se encuentra trazado en la parte Norte de nuestro mapa de intensidad magnética (Figura 29) con una dirección noreste-suroeste de la zona de estudio y una distancia de 145 metros de perfil, caracterizándose por pasar entre una anomalía magnética con una profundidad aproximada de 13 metros y un valor de índice estructural de 2 obtenido con el proceso de deconvolución de Euler explicado anteriormente.

Para el modelado de los perfiles, GM-SYS utiliza el procedimiento de “Chi cuadrado”, para determinar si existe una diferencia significativa entre los resultados esperados y los observados. “Chi cuadrado” tomará un valor igual a 0 si existe concordancia perfecta entre las frecuencias observadas y las esperadas, de lo contrario el estadístico tomará un valor grande si existe una gran discrepancia entre las frecuencias, y consecuentemente se rechazará la hipótesis. Dicho de otra manera, cuanto más ajustemos el modelo propuesto a la anomalía observada y nuestro error sea igual a 0, tendremos más concordancia y credibilidad en el modelo final.

Para el primer modelo propuesto se obtuvo un error inicial de 5.08 mismo que fue reducido con las susceptibilidades magnéticas agregadas a las capas y el cuerpo propuesto, hasta que se llegó a reducir el error a 1.069 (Figura 30). Para la presentación del modelo se tomó en cuenta información geológica relacionada a la geología local de la zona como se mencionó en el apartado 3.2, donde específicamente se muestra información de las formaciones que afloran en la zona de La Venta, como lo son la formación Cedral y Agueguexquite (ver apartado 3.2.1 Estratigrafía).

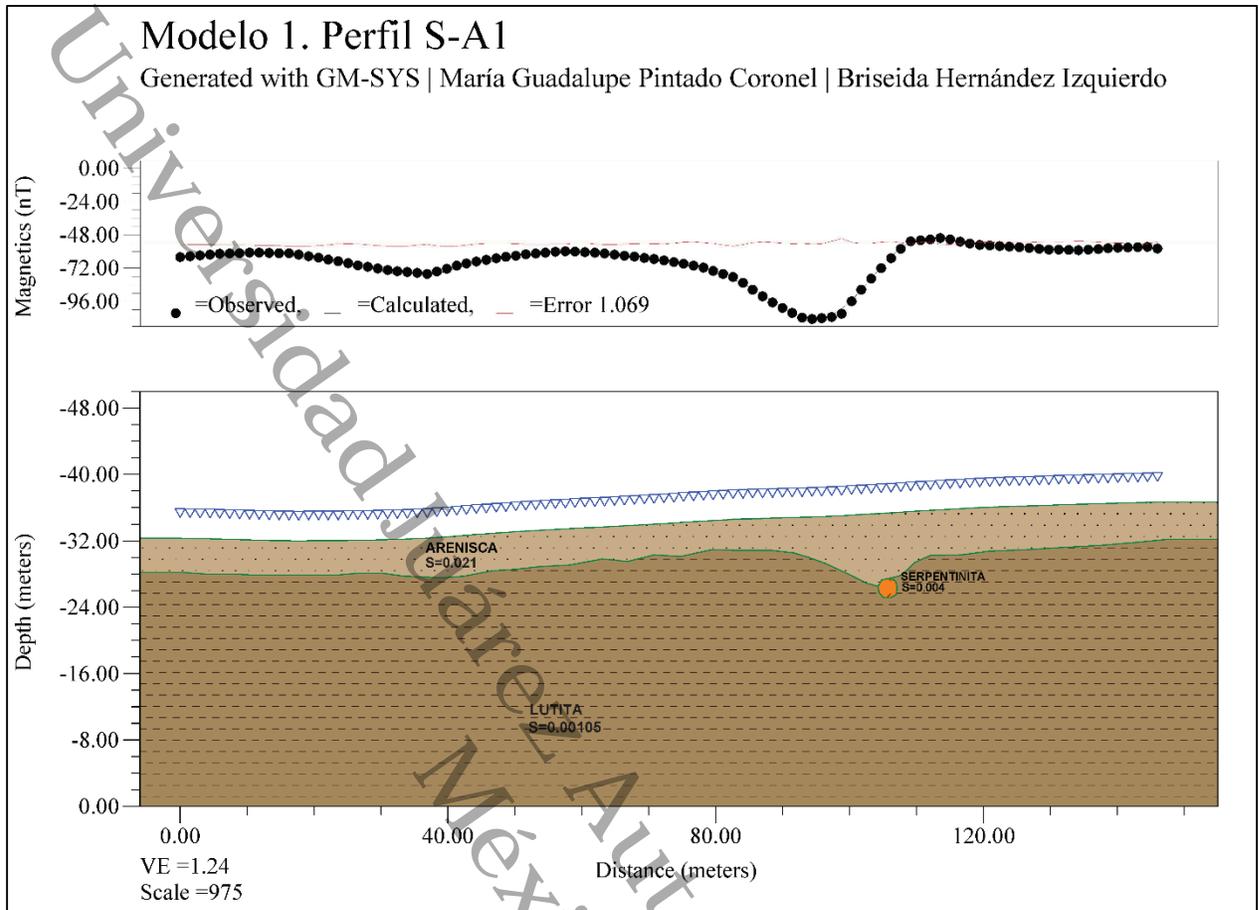


Figura 30. Modelo 1. Perfil S-A1

Para las variaciones de los valores de susceptibilidad magnética se tomó en cuenta la información proporcionada en el capítulo 2.9, del marco teórico, Tabla 2. Con base a la información geológica del área, la zona de estudio se encuentra entre sedimentos arenosos, arcillo-arenosos y capas de lutita, que han sido señaladas en estratos del modelo presentado. Para ello se colocó primeramente una capa de lutita con valores de susceptibilidad magnética de 0.00105 donde no disminuyó en gran medida el error en el modelo, a lo que decidimos agregar una capa más, pero en este caso de arenisca, con valor de susceptibilidad magnética de 0.021. Con estas dos capas el error disminuyó considerablemente teniendo un mejor ajuste de nuestra línea de respuesta al modelo observado, sin embargo, todavía no se agregaba el cuerpo u objeto que estaba provocando la anomalía. Teniendo en cuenta que el valor de índice estructural estaba siendo considerado en 2, según la Tabla 8 del capítulo 4.5, se muestra que las formas posibles para este valor puede ser de un cilindro o tambor.

Con este dato se optó por agregar al modelo una forma esférica irregular con valor de susceptibilidad magnética semejante al de la serpentinita, un tipo de roca volcánica presente en la isla por intervención de la propia cultura Olmeca, ya que este y otros tipos de rocas volcánicas eran traídas de distintas zonas culturales de Mesoamérica (Drucker et al., 1959; Filloy Nadal et al., 2013; González Lauck, 2000) (revisar apartado 3.2.2 del marco geológico). De esta forma se obtuvo un ajuste más apropiado del modelo propuesto, quedando el cuerpo con un diámetro propuesto de aproximado 3 metros, un valor considerable para un objeto que se encuentre enterrado y que pueda ser de interés arqueológico. Nótese que inferimos esta forma ya que proponemos que el cuerpo se encuentra acostado, donde solo estamos viendo una cara del cilindro propuesto por el índice estructural obtenido y que se trabajó un modelo en 2D.

Como se puede observar, en la Figura 30 se muestra el modelo del perfil S-A1, donde se ubican las capas utilizadas con diferentes valores de susceptibilidad magnéticas acorde al tipo de rocas y sedimentos predominantes en la zona de estudio. Esto robustece nuestro estudio al coincidir en gran medida con lo antes mencionado en la geología local. Para este modelo se resumen los datos en la Tabla 9.

Tabla 9. Litología y susceptibilidades magnéticas usadas en el modelo del perfil S-A1.

Perfil S-A1	
<i>Capa o forma</i>	<i>Susceptibilidad Magnética</i>
Arenisca	0.021
Lutita	0.00105
Forma cilíndrica de serpentinita	0.004

5.2.2. Perfil S-B1 y modelo geológico

El perfil S-B1 se encuentra trazado en la parte Sur del mapa de intensidad magnética (Figura 26) con una dirección Norte-Sur de la zona de estudio y una distancia de 117 metros, se distingue por intersectar dos anomalías magnéticas con una profundidad aproximada de 12 metros y un valor de índice estructural de 3.9 obtenido con el proceso de Deconvolución de Euler explicado en el capítulo anterior.

Para el segundo modelo propuesto se obtuvo un error inicial de 35, este se redujo considerablemente al agregar las dos capas de suelo que lo conforman y los cuerpos propuestos, reduciendo el error hasta 13.71 como se observa en la Figura 28. Para la formación del modelo se tomó en cuenta como en el perfil anterior la geología local que tenemos en la zona como lo son la formación Cedral y Agueguexquite (ver apartado 3.2.1 Estratigrafía).

Para las variaciones de los valores de susceptibilidad magnética se consideró la información proporcionada en el capítulo 2.9, del marco teórico, Tabla 2 y la información del apartado 3.2. del marco geológico. De acuerdo a la información geológica del área, sabemos que en esta zona predominan sedimentos arenosos, arcilla con intercalaciones de arena, capas de lutita y arenas de grano grueso y medio, que han sido señaladas en estratos de nuestro modelo presentado.

Para ello se colocó primeramente una capa de lutita con valores de susceptibilidad magnética de 0.0015 y posteriormente se agregó una capa de Arenisca con una susceptibilidad de 0.004, después de haber agregado estas dos capas el error disminuyó. Sin embargo, para este modelo el perfil atravesaba lo que pudieran ser 2 anomalías. Tomando en cuenta el valor de índice estructural de 3.9 y de acuerdo a la Tabla 8 del capítulo 4.5 se muestra que las formas posibles para estos objetos puede ser una esfera. Con este dato se optó por agregar al modelo dos formas semiesféricas irregulares con valor de susceptibilidad magnética semejante al del basalto, un tipo de roca volcánica presente en la isla por intervención de la propia cultura Olmeca, ya que este y otros tipos de rocas volcánicas eran traídas de distintas zonas culturales de Mesoamérica (Drucker et al., 1959; Filloy Nadal et al., 2013; González Lauck, 2000) (revisar apartado 3.2.2 del marco geológico). De esta forma se obtuvo un ajuste más apropiado del modelo propuesto, quedando los cuerpos con un diámetro propuesto de aproximado 6 y 10 metros respectivamente.

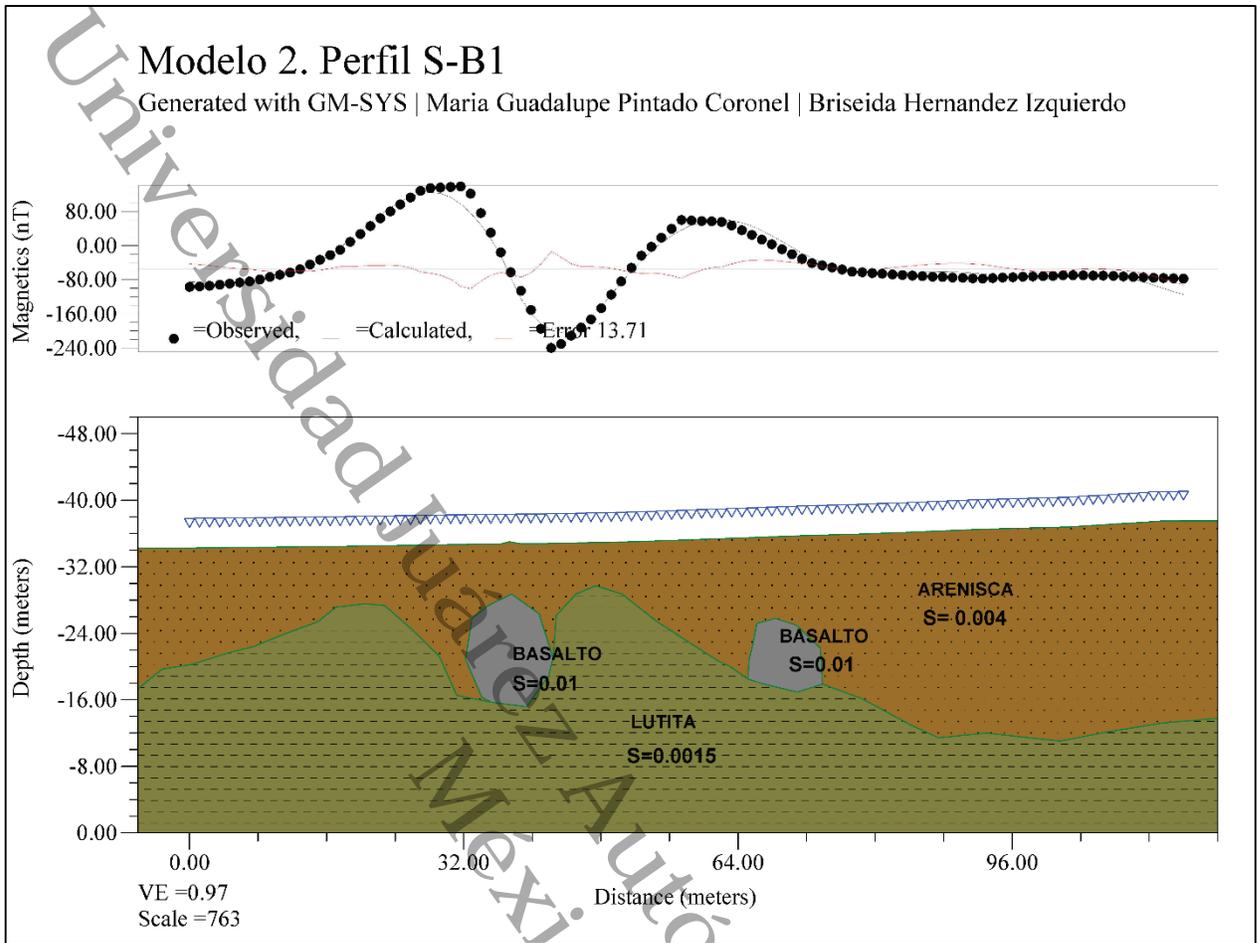


Figura 31. Modelo 2. Perfil S-B1

De esta manera quedaron constituidas las capas del modelo geológico S-B1 como se puede observar en la Figura 31, donde se aprecian las diferentes capas con sus valores de susceptibilidad magnética esto de acuerdo al tipo de roca encontrados en la zona arqueológica de La Venta. Para este modelo se resumen los datos en la Tabla 10.

Tabla 10. Litología y susceptibilidades magnéticas usadas en el modelo del perfil S-B1.

Perfil S-B1	
Capa o forma	Susceptibilidad Magnética
Arenisca	0.004
Lutita	0.0015
Forma semiesferica de Basalto	0.01

CAPITULO 6. CONCLUSIONES

Conforme a los resultados planteados en el capítulo anterior se llegó a las siguientes conclusiones:

- De acuerdo con el análisis magnético realizado en la zona de estudio y con la ayuda del programa Oasis Montaj®, se logró generar un mapa de campo magnético total y un mapa de campo magnético corregido de la Zona Arqueológica de La Venta, donde se pueden observar variaciones de anomalías magnéticas de interés. Gracias a la aplicación del filtro de señal analítica, pudimos identificar anomalías puntuales dentro del área de estudio. Esto resultó muy útil, ya que al aplicar la deconvolución de Euler localizada obtuvimos valores aproximados de las profundidades e índice estructural de los posibles cuerpos geométricos que están produciendo estas variaciones del campo magnético.
- Se demostró que el mapa de reducción al polo es crucial para la interpretación magnética de cualquier estudio de esta naturaleza, dado que es un mapa que se utiliza en la mayoría de los trabajos de magnetometría actuales. Este mapa permitió identificar las anomalías más relevantes debido a su intensidad. Por el contrario, el mapa de señal analítica permitió identificar las áreas donde la variación del campo magnético es más notable, lo que facilitó la detección de las irregularidades más significativas y marcadas de toda la región de análisis. Estos mapas, junto con el de reducción al polo, son resultados esenciales de la exploración magnética en la fase de interpretación de datos magnéticos.
- Con base a el filtro de señal analítica, se logró ubicar y calcular la profundidad de las fuentes magnéticas a través del método de Deconvolución Localizada de Euler en 2D, uno de los múltiples métodos disponibles para respaldar la interpretación de datos magnéticos en Oasis Montaj®.
- Como resultado de las interpretaciones, se eligieron dos perfiles magnéticos S-A1 y S-B1, de los cuales se obtuvieron modelos simples en 2D, mediante el modelado directo de esos perfiles que cortan aquellas zonas identificadas como de interés y los cuales se eligieron de acuerdo al comportamiento de los valores magnéticos y si estos estaban siendo o no alterados por agentes externos.

- A diferencia de otras técnicas de procesamiento e interpretación de datos magnéticos, el método de deconvolución de Euler es un procedimiento que todavía está siendo reconocido. En este estudio se demostró su eficacia para identificar anomalías puntuales con una respuesta magnética positiva. Su contribución es crucial para ayudarnos a resolver uno de los misterios más profundos que la prospección magnética intenta resolver; la profundidad a la que se encuentra la fuente que provoca fluctuaciones en el campo magnético.
- Otro punto que hace atractivo a este método y que se ha abordado en este trabajo es la posibilidad de identificar la geometría de la fuente a través del valor del índice estructural que también nos proporciona el proceso de deconvolución de Euler localizada, al compararlo con valores de índice estructural conocidos que se abordaron en este trabajo y que se obtuvieron de diversas bibliografías. Esto incrementa su utilidad en la interpretación magnética.
- Para el perfil S-A1 que se encuentra trazado en la parte Norte del mapa de intensidad magnética, con una dirección noreste-suroeste de nuestra zona de estudio y una distancia de 145 metros de perfil, se caracterizó por pasar entre una anomalía magnética con una profundidad aproximada de 13 metros y un valor de índice estructural de 2. Con base en el modelado geofísico-geológico, el modelo obtuvo un error reducido de 1.069 y donde se concluyó que la zona está constituida por una capa de arcillo-arenosa y arenisca con un valor de susceptibilidad magnética de 0.021, una capa de lutita con valores de susceptibilidad magnética de 0.00105 y un cuerpo de aproximadamente 3 metros de diámetro constituido de serpentinita y con un valor de susceptibilidad magnética de 0.004 que está produciendo esta anomalía. La presencia de este tipo de roca, como se menciona en el apartado 3.3.2 del marco geológico es congruente al coincidir con los valores de susceptibilidad conocidos para la serpentinita.
- Para el perfil S-B1, trazado en la parte sur del mapa de intensidad magnética, con una dirección norte-sur de nuestra zona de estudio y una distancia de 117 metros, se caracterizó por atravesar dos anomalías magnéticas con una profundidad aproximada de 12 metros y un valor de índice estructural de 3,9. A partir del modelado geofísico-geológico, se concluyó que esta zona está constituida por una capa de arenisca con un valor de susceptibilidad magnética de 0.004, una capa de lutita con valores de susceptibilidad magnética de 0.0015 y dos fuentes

de aproximadamente 6 a 10 metros de diámetro constituidas por basalto con una susceptibilidad magnética de 0.01, que se infiere que es la causante de las anomalías presentes en esa zona. La presencia de este tipo de roca, como se menciona en el apartado 3.3.2 del marco geológico, es congruente con los valores de susceptibilidad conocidos para el basalto.

- Uno de los objetivos importantes de esta investigación fue analizar la posible presencia de vestigios arqueológicos de interés para el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), y se ha llegado a la conclusión de que sí hay presencia de algunos cuerpos enterrados a partir del análisis de los modelos geofísico-geológicos propuestos en esta tesis. Cabe señalar que este es un proyecto de investigación en el que se dispone de información sobre la zona arqueológica de La Venta, obtenida gracias a distintas excavaciones en el área de estudio realizadas hace más de 50 años. La diferencia con nuestro estudio es que se utilizó un método geofísico no invasivo y hemos generado información más actualizada que seguirá siendo de interés para otros estudios. Por mencionar algunos, este trabajo se podría complementar con otro método geofísico, como la gravimetría o el análisis de DRX (si el instituto autorizara la extracción de ciertas muestras de suelo), pero, para este caso, solo se ha trabajado con lo que se pudo obtener en campo sin tener que dañar la zona de estudio.

Referencias

- A. Boxt, M., Mark Raab, L., & González Lauck, R. B. (2012). Isla Alor: Contacto olmeca en el interior de La Venta. *ACADEMIA*, 55–91.
- Argote Espino, D. (2002). *Caracterización geofísica de sitios arqueológicos: medio rural y urbano*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Argote Espino, D. (2008). Modelación en 3D de datos magnéticos para caracterizar estructuras arqueológicas. In *ResearchGate* (Issue Marzo). <https://www.researchgate.net/publication/273886827%0AMODELACION>
- Barba Pingarrón, L. A. (1988). *Trabajos de prospección realizados en el sitio arqueológico La Venta, Tabasco*.
- Breiner, S., & Coe, M. D. (1972). Magnetic Exploration of the Olmec Civilization. *American Heritage*, 60, 1–6.
- Campbell Wallace, H. (1997). *Introduction to Geomagnetic Fields* (Second Edi). Cambridge University Press.
- Chapman, S., & Lindzen, R. S. (1970). *Mareas Atmosféricas: Térmicas y Gravitacionales*.
- CONAGUA. (2023). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Huimanguillo*.
- Drucker, P., Heizer, R. F., & Squier, R. J. (1959). Excavations at La Venta Tabasco, 1955. *Smithsonian Institution Bureau Of American Ethenology*, 170, 1–436.
- Fanton, G., Martinez, P., & Gimenez, M. (2014). Procesamiento y análisis cualitativo de datos aeromagnéticos con vistas a la exploración de yacimientos hidrotermales tipo lode gold - provincia de La rioja, Argentina. *Scielo*, 39.
- Filloy Nadal, L., Magaloni Kerpel, D., Ruvalcaba Sil, J. L., & Sánchez Hernández, R. (2013). Las materias primas utilizadas para la manufactura de las figurillas y las hachas de la Ofrenda 4 de La Venta: caracterización y fuentes de origen. *La Ofrenda 4 de La Venta, Un Tesoro Olmeca Reunido En El Museo Nacional de Antropología. Estudios y Catálogo Razonado*, 103–127.

- GEOSOFT. (2012). *GM-SYS Profile Modelling*.
- González-Lauck, R. (2000). La zona del Golfo en el Preclásico: la etapa olmeca. *Historia Antigua de México, Volúmen I: El México Antiguo, Sus Areas Culturales, Los Orígenes y El Horizonte Preclásico., I*, 363–406.
- INEGI. (2001). *Síntesis de Información geográfica del estado de Tabasco*. 25–32.
- INEGI. (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010, Huimanguillo, Tabasco*. 3, 1–10.
- Jiménez Salas, O. H. (1990). La geomorfología de la región de La Venta Tabasco: Un sistema fluvio- lagunar costero del cuaternario. In *Arqueología* (Vol. 3, pp. 5–16).
- Limón, M., & Barba Pingarrón, L. (1981). *Prospección arqueológica en San José Ixtapa*. 151–171.
- Maps of Mexico. (2006). *Plano del sitio Arqueológico La Venta, Huimanguillo*.
- McElhinny, M. W. (2000). El campo magnético de la Tierra. *EOS*, 81(17), 187–188.
- Muñiz Barreto, L. (1997). *El Geomagnetismo* (Plaza y Valdés Editores. (Ed.); UNA de Méx).
- National Centers For Environmental Informations/ National Oceanic and Atmospheric Administration*. (n.d.).
<https://ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml?useFullSite=true#igrfwmm>
- Pérez Rincón, H. (1959). Estudio geológico del campo petrolero Rodolfo Ogarrio. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 22(3), 33.
- Rainey, A. (1968). Israel Exploration Journal. *Israel Exploration Society*, 18, 1–14.
- Reynolds, J. M. (2011). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. In *European Space Agency, (Special Publication) ESA SP* (Second Edi, Issue 606).
- Reynolds JM. (2011). *An Introduction to applied and Enviromental Geophysics* (Second).
- Robinson, E. S., & Coruh, C. (1988). Basic Exploration Geophysics. In *Wiley & Sons*.
- Robles Camacho, J. (2006). *Uso de técnicas petrológicas para identificar la procedencia de la materia prima de piezas arqueológicas del sitio olmeca de La Merced, elaboradas con*

serpentinita. Universidad Nacional Autónoma de México.

Robles Camacho, J., Hermann Köhler, P. S., & Sánchez Hernández, R. (2008). Serpentinitas olmecas. Petrología aplicada a la arqueometría. *Monografías Del Instituto de Geofísica* 13.

SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO. (2008). Carta Geológico-Minera Estados de Chiapas y Tabasco. *INEGI*.

Svalgaard, L., & Cliver, E. W. (2007). A Floor in the Solar Wind Magnetic Field. *The Astrophysical Journal*, 661(2), 203–206. <https://doi.org/10.1086/518786>

Villalaín Santamaría, J. J. (2016). La historia del campo magnético terrestre registrada en las rocas. Fundamentos del Paleomagnetismo. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 24(3), 261–274.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Anexos

Para este trabajo se contó con una pequeña brigada de alumnos y profesores de la UJAT, que apoyaron guiando el procedimiento de la adquisición de los datos durante los dos días de trabajo en la zona arqueológica de La Venta (Figura 32 y Figura 33).



Figura 32. Toma de datos en la Zona Arqueológica de La Venta, Huimanguillo, Tabasco.



Figura 33. Brigada de trabajo para el levantamiento de los datos Magnéticos, Organización de equipos y preparación de instrumentos de medición.

Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional

Título de Tesis:	Estudio magnético para análisis y caracterización en la zona arqueológica de la venta, Huimanguillo, Tabasco
Autoras de la Tesis:	María Guadalupe Pintado Coronel Briseida Hernández Izquierdo
ORCID:	0009-0001-2549-4225 0009-0005-9839-7396
Resumen de la Tesis:	<p>El presente estudio consistió en realizar una serie de levantamientos de datos magnéticos en la zona arqueológica de La Venta, en el municipio de Huimanguillo, Tabasco empleando dos magnetómetros de precisión protónica Geometrics G-857 con una sensibilidad de 0.1 nT, dentro de un área aproximada de 2 km². Los datos magnéticos se adquirieron en modalidad de perfil, obteniendo en total 7 perfiles que cubrieron las principales zonas de interés en el área. Se analizó la variación del campo magnético a partir del procesamiento de los datos y se usó el método de Deconvolución de Euler Localizada para estimar valores de profundidad e índice estructural de cuerpos u objetos a partir del filtro de señal analítica aplicado a los datos de campo magnético corregido.</p> <p>Con los valores obtenidos se proyectó la creación de dos perfiles y se obtuvieron dos modelos de tipo geofísico-geológico, donde se comprobó que están constituidos por dos capas principales de suelo arcillo-arenoso, lutita y arenisca. Así mismo, se encontraron cuerpos esféricos irregulares constituidos de basalto y serpentinita que, en su época de apogeo fueron transportados desde las ubicaciones de otras culturas prehispánicas, cerros y yacimientos para utilizarlos en esculturas, provocando así algunas de las anomalías magnéticas presentes en la zona de estudio.</p>

Palabras claves de la Tesis:	Magnético, caracterización, geología, arqueológica, La Venta.
Referencias citadas:	<p>A. Boxt, M., Mark Raab, L., & González Lauck, R. B. (2012). Isla Alor: Contacto olmeca en el interior de La Venta. <i>ACADEMIA</i>, 55–91.</p> <p>Argote Espino, D. (2002). <i>Caracterización geofísica de sitios arqueológicos: medio rural y urbano</i>. Universidad Nacional Autónoma de México.</p> <p>Argote Espino, D. (2008). Modelación en 3D de datos magnéticos para caracterizar estructuras arqueológicas. In <i>ResearchGate</i> (Issue Marzo). https://www.researchgate.net/publication/273886827%0AMODELACION</p> <p>Barba Pingarrón, L. A. (1988). <i>Trabajos de prospección realizados en el sitio arqueológico La Venta, Tabasco</i>.</p> <p>Breiner, S., & Coe, M. D. (1972). Magnetic Exploration of the Olmec Civilization. <i>American Heritage</i>, 60, 1–6.</p> <p>Campbell Wallace, H. (1997). <i>Introduction to Geomagnetic Fields</i> (Second Edi). Cambridge University Press.</p> <p>Chapman, S., & Lindzen, R. S. (1970). <i>Mareas Atmosféricas: Térmicas y Gravitacionales</i>.</p> <p>CONAGUA. (2023). <i>Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Huimanguillo</i>.</p> <p>Drucker, P., Heizer, R. F., & Squier, R. J. (1959). Excavations at La Venta Tabasco, 1955. <i>Smithsonian Institution Bureau Of American Ethnology</i>, 170, 1–436.</p> <p>Fanton, G., Martinez, P., & Gimenez, M. (2014). Procesamiento y análisis cualitativo de datos aeromagnéticos con vistas a la exploración de yacimientos hidrotermales tipo lode gold - provincia de La rioja, Argentina. <i>Scielo</i>, 39.</p> <p>Filloy Nadal, L., Magaloni Kerpel, D., Ruvalcaba Sil, J. L., & Sánchez Hernández, R. (2013). Las materias primas utilizadas para la manufactura de las figurillas y las hachas de la Ofrenda 4 de La Venta: caracterización y fuentes de origen. <i>La Ofrenda 4 de La Venta, Un Tesoro Olmeca Reunido En El Museo Nacional de Antropología. Estudios y Catálogo Razonado</i>, 103–127.</p> <p>GEOSOFT. (2012). <i>GM-SYS Profile Modelling</i>.</p> <p>González Lauck, R. (2000). La zona del Golfo en el Preclásico: la etapa olmeca. <i>Historia Antigua de México, Volúmen I: El México Antiguo, Sus Areas Culturales, Los Orígenes y El Horizonte Preclásico.</i>, I, 363–406.</p> <p>INEGI. (2001). <i>Síntesis de Información geográfica del estado de Tabasco</i>. 25–32.</p>

- INEGI. (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010, Huimanguillo, Tabasco*. 3, 1–10.
- Jiménez Salas, O. H. (1990). La geomorfología de la región de La Venta Tabasco: Un sistema fluvio- lagunar costero del cuaternario. In *Arqueología* (Vol. 3, pp. 5–16).
- Limón, M., & Barba Pingarrón, L. (1981). *Prospección arqueológica en San José Ixtapa*. 151–171.
- Maps of Mexico. (2006). *Plano del sitio Arqueológico La Venta, Huimanguillo*.
- McElhinny, M. W. (2000). El campo magnético de la Tierra. *EOS*, 81(17), 187–188.
- Muñiz Barreto, L. (1997). *El Geomagnetismo* (Plaza y Valdés Editores. (Ed.); UNA de Méx).
- National Centers For Environmental Informations/ National Oceanic and Atmospheric Administration*. (n.d.).
<https://ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml?useFullSite=true#igrfwmm>
- Pérez Rincón, H. (1959). Estudio geológico del campo petrolero Rodolfo Ogarrío. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 22(3), 33.
- Rainey, A. (1968). Israel Exploration Journal. *Israel Exploration Society*, 18, 1–14.
- Reynolds, J. M. (2011). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. In *European Space Agency, (Special Publication) ESA SP* (Second Edi, Issue 606).
- Reynolds JM. (2011). *An Introduction to applied and Enviromental Geophysics* (Second).
- Robinson, E. S., & Coruh, C. (1988). Basic Exploration Geophysics. In *Wiley & Sons*.
- Robles Camacho, J. (2006). *Uso de técnicas petrológicas para identificar la procedencia de la materia prima de piezas arqueológicas del sitio olmeca de La Merced, elaboradas con serpentinita*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Robles Camacho, J., Hermann Köhler, P. S., & Sánchez Hernández, R. (2008). Serpentinitas olmecas. Petrología aplicada a la arqueometría. *Monografías Del Instituto de Geofísica 13*.
- SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO. (2008). Carta Geológico-Minera Estados de Chiapas y Tabasco. *INEGI*.
- Svalgaard, L., & Cliver, E. W. (2007). A Floor in the Solar Wind Magnetic Field. *The Astrophysical Journal*, 661(2), 203–206. <https://doi.org/10.1086/518786>
- Villalaín Santamaría, J. J. (2016). La historia del campo magnético terrestre registrada en las rocas. Fundamentos del Paleomagnetismo. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 24(3), 261–274.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.



“Donde hacer ciencia, es Básico”