



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LAS
ANOMALÍAS GRAVIMÉTRICAS Y
MAGNÉTICAS DE LA PLATAFORMA
CARBONATADA DE YUCATÁN**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Geofísica

P R E S E N T A

Karen Evelyn Onofre Alviso

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016

roll the dice

if you're going to try, go all the
way.

otherwise, don't even start.

if you're going to try, go all the
way.

this could mean losing
girlfriends,
wives, relatives, jobs and
maybe your mind.

go all the way.
it could mean not eating for 3
or 4 days.

it could mean freezing on a
park bench.

it could mean jail,
it could mean derision,
mockery,
isolation.

isolation is the gift,
all the others are a test of your
endurance, of
how much you really want to
do it.

and you'll do it
despite rejection and the
worst odds

and it will be better than
anything else
you can imagine.

if you're going to try,
go all the way.
there is no other feeling like
that.

you will be alone with the gods
and the nights will flame with
fire.

do it, do it, do it.
do it.

all the way
all the way.

you will ride life straight to
perfect laughter, it's
the only good fight
there is.

– Charles Bukowski

Agradecimientos

*A mi amada **Universidad Nacional**, por la excelente educación y oportunidades que me ha ofrecido desde la preparatoria. Mi formación escolar es el producto de la extensa oferta académica y cultural que la UNAM provee.*

*A mis papás **Gustavo** y **Yolanda** por todo el amor, esfuerzo, comprensión y apoyo incondicional que me han brindado. No sólo en esta etapa, pero en cada una de las aventuras, proyectos o viajes que he emprendido. Soy reflejo de la educación y los buenos ejemplos que con amor me han inculcado desde pequeña. ¡Los amo!*

*A mis hermanas, **Lizeth** (Vulti), por toda la comprensión, tolerancia y experiencias que hemos disfrutado juntas. Somos un gran equipo, hermani. Y **Marisol** (Vulti grande), por su ejemplo, guía y amor. Gracias por siempre impulsarme a seguir mis sueños.*

*A mi asesor, **Jaime Urrutia**, por la confianza, apoyo y puertas abiertas al conocimiento que me ha ofrecido en esta etapa. Su ejemplo, es una inspiración para convertirme en una mejor persona y una mejor estudiante.*

*A **Mauricio Nava**, por su amistad, tiempo y soporte. Sus recomendaciones y consejos ayudaron a que este trabajo tomará forma y sentido.*

*A **Sergio Chávez**, por la amistad y consejos, que me han permitido abrir la mente a retos y problemáticas actuales. Siempre es un gusto compartir una conversación.*

A mis **sinodales** de tesis: Carlos Ortiz, Eduardo Aguayo y Osvaldo Sánchez, por sus comentarios y observaciones.

A mi mejor amiga, **Jennifer**, por cada una de las experiencias que hemos vivido juntas. Sé que la distancia no logrará disolver nuestra amistad.

A **David**, por el tiempo compartido y por creer en mí. Me has ayudado a hacer crecer mis sueños y aspiraciones.

A mis amigxs y compañerxs de la Facultad de Ingeniería. Quiero evitar los nombres por el temor de omitir alguno, ustedes saben quiénes son. Parte de la increíble experiencia que ha sido la universidad, se las debo a ustedes.

A **ExxonMobil, El Instituto Internacional de Educación (IIE), Fundación UNAM** y **Fundación Telmex** por los apoyos recibidos durante mi formación universitaria.

Al **Instituto de Geofísica** de la UNAM, por haberme permitido hacer uso extensivo de las instalaciones y servicios que ofrece.

ÍNDICE

Lista de Figuras	6
Resumen	8
1. Introducción	10
2. Marco tectónico y geológico.....	14
Marco geológico.....	16
Marco tectónico.....	19
Cráter Chicxulub	24
3. Metodología	27
Localización del área de estudio	27
Datos marinos	27
Mapa mundial de Gravedad	31
Procesamiento de datos de gravimetría y magnetometría.....	32
Procesos aplicados.....	36
4. Análisis de los resultados.....	40
Batimetría.....	40
Gravimetría	43
Anomalías de Aire Libre.....	43
Gradiente Horizontal.....	48
Amplitud de la Señal Analítica	51
Amplitud de la Señal Analítica Mejorada de 1er Orden.....	54
Magnetometría	57
Anomalía de Campo Total	57
Amplitud de la señal analítica	61
Gradiente Horizontal de la Señal Analítica.....	65
5. Discusión de los resultados	67
6. Conclusiones	72
7. Bibliografía.....	74
8. Anexo Digital.....	78

Lista de Figuras

CAPÍTULO 2. Marco Geológico y Tectónico

- ◆ **Figura 2.1.** Localización del área de estudio
- ◆ **Figura 2.2.** Mapa geológico de la Península de Yucatán
- ◆ **Figura 2.3.** Columna estratigráfica de la Península de Yucatán
- ◆ **Figura 2.4.** Distribución de los rasgos geomorfológicos en el Golfo de México
- ◆ **Figura 2.5.** Distribución paleogeográfica en el Triásico—Jurásico temprano
- ◆ **Figura 2.6.** Distribución paleogeográfica en el Oxfordiano tardío
- ◆ **Figura 2.7.** Distribución paleogeográfica en el Albiano tardío
- ◆ **Figura 2.8.** Distribución paleogeográfica en el Plioceno
- ◆ **Figura 2.9.** Localización geográfica del cráter Chicxulub

CAPÍTULO 3. Metodología

- ◆ **Figura 3.1.** Ubicación del levantamiento marino
- ◆ **Figura 3.2.** Ubicación de las bases magnéticas terrestres
- ◆ **Figura 3.3.** Límites de la malla de datos satelitales
- ◆ **Figura 3.4.** Diagrama de flujo del procesamiento de datos magnéticos
- ◆ **Figura 3.5.** Diagrama de flujo del procesamiento de datos gravimétricos

CAPÍTULO 4. Análisis de Resultados

- ◆ **Figura 3.1.** Mapa batimétrico

Gravimetría

- ◆ **Figura 3.2.** Mapa de Anomalía de Aire Libre
- ◆ **Figura 3.3.** Mapa de regional con continuación ascendente a 3 km
- ◆ **Figura 3.4.** Mapa de regional con continuación ascendente a 10 km
- ◆ **Figura 3.5.** Mapa de gradiente horizontal con continuación ascendente a 3 km
- ◆ **Figura 3.6.** Mapa de gradiente horizontal de la anomalía de aire libre
- ◆ **Figura 3.7.** Mapa de gradiente horizontal con continuación ascendente a 10 km
- ◆ **Figura 3.8.** Mapa de la amplitud de la señal analítica de la anomalía de aire libre

- ◆ **Figura 3.9.** Mapa de la amplitud de la señal analítica con continuación ascendente a 3 km
- ◆ **Figura 3.10.** Mapa de la amplitud de la señal analítica con continuación ascendente a 10 km
- ◆ **Figura 3.11.** Mapa de la amplitud de la señal analítica mejorada de primer orden de la anomalía de aire libre
- ◆ **Figura 3.12.** Mapa de la amplitud de la señal analítica mejorada de primer orden a 10 km

Magnetometría

- ◆ **Figura 3.13.** Mapa de Anomalía de Campo Total
- ◆ **Figura 3.14.** Mapa de regional con continuación ascendente a 2 km
- ◆ **Figura 3.15.** Mapa de regional con continuación ascendente a 5 km
- ◆ **Figura 3.16.** Mapa de la amplitud de la señal analítica con continuación ascendente a 2 km
- ◆ **Figura 3.17.** Mapa de la amplitud de la señal analítica de la anomalía de campo total
- ◆ **Figura 3.18.** Mapa de la amplitud de la señal analítica con continuación ascendente a 5 km
- ◆ **Figura 3.19.** Mapa del gradiente horizontal de la amplitud de la señal analítica

Resumen

La plataforma carbonatada de Yucatán se ha formado sobre un bloque tectónico de basamento cristalino en el Golfo de México. El presente trabajo de tesis presenta los resultados del procesamiento, análisis e interpretación de datos gravimétricos marinos y satelitales y magnetométricos marinos. La interpretación se apoya en las correlaciones con la fisiografía y batimetría monohaz.

El procesamiento se realizó con programas en lenguaje Matlab y posteriormente la visualización de los resultados con la paquetería Geosoft Oasis Montaj. Los métodos empleados para el procesamiento e interpretación de los datos fueron: la continuación ascendente para la separación del regional y residual, el gradiente horizontal, la amplitud de la señal analítica, la amplitud de la señal analítica mejorada y el gradiente de la amplitud de la señal analítica. Dicho procesamiento se realizó en el dominio espacial y del número de onda aplicado a mallas regulares de gravimetría y magnetometría.

En la plataforma se pueden observar dos zonas con patrones característicos definidos por las anomalías. De la longitud 88°W al Oeste en la zona de Mérida se observan anomalías de gran longitud de onda y profundidad, que en la parte Este de Holbox presentan una orientación N—S y longitud de onda menor, exceptuando la anomalía de Isla Mujeres.

Las anomalías de Alacrán, Banco Nuevo y el Cráter Chicxulub se pueden asociar a discontinuidades en el basamento cristalino de la plataforma. La anomalía de

Isla Mujeres tiene origen en el fallamiento lateral resultado de la evolución de la placa del Caribe. Los elementos de Cayo Arenas y la Terraza de Campeche se pueden relacionar con fallamiento normal ocurrido durante el impacto de Chicxulub o como consecuencia del desplazamiento del bloque de Yucatán. El escarpe de Campeche define la frontera entre la corteza continental de la península de Yucatán y la corteza oceánica formada durante la apertura del Golfo de México.

1. Introducción

La plataforma carbonatada de Yucatán esta construida sobre un basamento cristalino-metamórfico de afinidad panafricana y es uno de los rasgos geológicos y tectónicos de mayor importancia en el Golfo de México. Su evolución está ligada a la apertura del Golfo de México y formación de la placa del Caribe. La investigación de procesos de sedimentación y erosión, cambios en el nivel del mar, así como los procesos tectónicos de subsidencia y emersión, son fundamentales para entender la evolución geológica de la plataforma de Yucatán.

En 1986 y 1990, Alvarado-Omaña y Abdeslem-García respectivamente, presentan trabajos de procesamiento, análisis e interpretación de un levantamiento marino de datos gravimétricos, magnéticos y de batimetría monohaz (Yucatán 85) en la plataforma carbonatada de Yucatán. Sin embargo, a pesar de la buena calidad de los datos el procesamiento fue restringido, debido a las limitaciones computacionales de la época. Posteriormente, Hildebrand et al. (1991) publican un artículo en el cual a partir de la integración de información geofísica-geológica relaciona la estructura del cráter Chicxulub con la extinción masiva del límite Cretácico-Paleógeno. Dicho evento geológico no fue considerado dentro del análisis de Alvarado y Abdeslem.

En el presente trabajo de tesis, se tiene como objetivo realizar un análisis detallado de las anomalías gravimétricas y magnéticas a partir de un flujo de procesamiento que permitirá observar los límites de las fuentes causantes y su interpretación geológica. Así como realizar la caracterización geofísica de los

principales rasgos geomorfológicos de la plataforma, entre ellos el escarpe de Campeche y el cráter de impacto Chicxulub.

Las bases de datos que se utilizaron corresponden al levantamiento marino Yucatán 85 y al Mapa Mundial de Gravimetría cuya información es de alta resolución y mayor extensión. Ambas bases de datos pueden ser consultadas y descargadas en el sitio web del Centro Nacional de Información Ambiental (NCEI) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) y del Buró Gravimétrico Internacional (BGI). El procesamiento se realizó con un programa escrito en lenguaje Matlab, caracterizado por su eficiencia en el cómputo científico. A partir de los resultados, se mejoró la interpretación propuesta en la década de los noventa, debido a las ventajas resultantes del cómputo científico y los programas de visualización de datos, así como la integración de información de mayor calidad y resolución.

La estructura de este trabajo es la siguiente. En el capítulo dos, se presentan el marco geológico y tectónico de la Plataforma, su evolución desde el Paleozoico y la fragmentación del supercontinente Pangea con la apertura del Golfo de México durante el Jurásico Tardío. Con ayuda de información publicada por López-Ramos (1985) se describe la geología regional de la plataforma y la secuencia estratigráfica observada a partir de diversas fuentes de información; Tales como el análisis de secuencias estratigráficas, afloramientos en superficie, pozos y dataciones radiométricas.

En el capítulo tres, se describen los datos de gravimetría y magnetometría, incluyendo las fuentes electrónicas de donde pueden descargarse y el tipo de correcciones que fueron aplicadas antes del procesamiento propuesto. Asimismo se hace una breve descripción de los algoritmos utilizados para la interpretación de datos potenciales; estos métodos fueron elegidos con base en resultados sobre datos sintéticos aplicados por Nava-Flores (2010). Además en el capítulo, se describe el flujo de trabajo propuesto para los datos de gravimetría y magnetometría.

En el capítulo cuatro, se destaca el análisis de los resultados, con la descripción detallada de las anomalías y sus características, así como la descripción visual de los rasgos y orientaciones observados a partir del procesamiento. Se analizaron las similitudes entre las anomalías y la correlación entre el método magnético, el gravimétrico y la batimetría. Se muestran los mapas de mayor relevancia para la interpretación geofísica.

Como parte del capítulo cinco, se realizó una discusión de los resultados anteriormente descritos y las posibles causas de aparición de anomalías potenciales, en una plataforma tectónicamente pasiva. Se explican las posibles fuentes causantes de las discontinuidades y anomalías y su formación, a partir de la historia geológica y tectónica de la región. Se proponen métodos analíticos para la obtención de mayor información, acerca de la naturaleza cristalina del basamento y las discontinuidades corticales.

En el capítulo seis se presentan las conclusiones obtenidas a partir del análisis de los resultados. Por último, en la parte de bibliografía (capítulo siete) se encuentran las fuentes de información referidas en este trabajo y lectura complementaria, que aunque no ha sido citada fue parte fundamental, para el desarrollo de esta tesis.

En el anexo digital, se encuentran todos los mapas realizados, en una escala 1:36.06201, en formato de hoja tamaño carta.

2. Marco tectónico y geológico

La plataforma carbonatada de Yucatán se encuentra en el sector sur del Golfo de México, la parte emergida constituye la porción terrestre de la Península de Yucatán en México (Figura 2.1). Abarca geográficamente desde las longitudes 86°—92.5°W y latitudes 16°—24°N. E incluye la parte Este de los estados de Yucatán y Campeche, el Territorio de Quintana Roo y la parte Norte de Guatemala y Belice.



Figura 2. 1 Mapa de la localización del área de estudio.

En el área de aproximadamente 350,000 km², se pueden diferenciar diferentes unidades fisiográficas (Figura 2.2); en la porción sumergida de la plataforma, figuran el Banco de Campeche, que se extiende en la dirección E—O entre las longitudes 92.5°—86°W, con una extensión máxima de 680 km. En la dirección

N—S se enmarca entre las latitudes 24.3°—21.4°N, con una extensión máxima de 300 km. El Banco de Campeche está delimitado en la parte norte, por un abrupto cambio en la pendiente y la profundidad; a dicho rasgo geológico se le denomina Escarpe de Campeche (Weidie, 1985). Al Oeste se encuentra el Cañón de Campeche, delimitando la parte occidental del Banco. En la parte noreste el Cañón de Campeche (Campeche Tongue) sirve como frontera geomorfológica.

Los límites geomorfológicos de la parte emergida, correspondiente a la Península de Yucatán se encuentran en el Norte y Noreste, por el talud continental del Banco de Campeche, al sur el límite está formado por el Arco de la Libertad que incluye la zona del Peten en Guatemala. La frontera occidental, está formada por las planicies costeras del Golfo de México en la parte Suroeste y Este, de los estados de Campeche y Tabasco, respectivamente (López-Ramos, 1975).

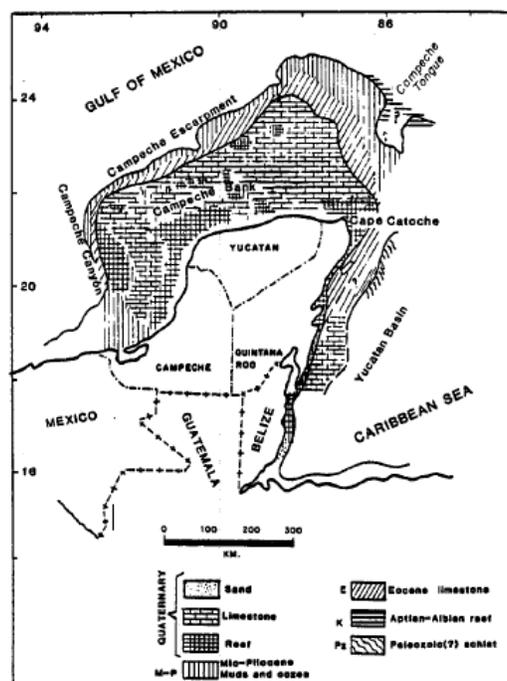


Figura 2. 2 Mapa geológico de la península de Yucatán (Tomada de Weidie, 1985).

Marco geológico

La plataforma de Yucatán es un extenso banco carbonatado cuyo desarrollo inició en el Mesozoico. La estratigrafía regional se puede describir a partir de un basamento cristalino-volcánico de afinidad Pan-Africana; depósitos clásticos y, posteriormente, un predominio de facies carbonatadas y evaporíticas desarrolladas durante el Cretácico y Cenozoico (López-Ramos, 1975). El basamento de esta plataforma aflora solamente en la región Sureste de Belice, en la zona de las montañas Mayas. En México el basamento se ha identificado y fechado mediante el análisis de muestras de pozos realizados en la zona (Urrutia *et al.*, 2008, 2011).

Durante el Paleozoico Tardío se acumuló una capa gruesa de sedimentos terrestres. Estos consisten en lechos rojos continentales que yacen directamente sobre el basamento. A partir de las reconstrucciones paleográficas para el Mesozoico Temprano, se establece que el bloque de Yucatán se localizaba unido a la región Norte de África, posteriormente la sección se separó de la unidad Lousiana-Texas al momento de la apertura del Golfo de México. La correlación regional con unidades semejantes al Sureste de México (Formación Todos los Santos) les asigna una edad del Jurásico Medio-Tardío (Padilla-Sánchez, 2007).

De manera discordante sobre estas rocas continentales, yace una secuencia gruesa de carbonatos y evaporitas cretácicas, interrumpida abruptamente por los depósitos del límite K/Pg causados por el impacto de Chicxulub (Formación Chicxulub). Posterior a dicha interrupción en la sedimentación del Cretácico Superior, se encuentran una serie de carbonatos dolomitizados y evaporitas, con

una delgada capa de arenisca, cuya fauna se puede asociar a diferentes ambientes de depósito, desde tipo lagunar hasta depósitos arrecifales (López-Ramos, 1985).

En el Cenozoico se puede apreciar a la formación Icaiché, del Paleoceno-Eoceno inferior. Dicha formación se encuentra formada por calizas compactas de micro a macro cristalinas, generalmente dolomitizadas, a veces silicificadas, o bien, simplemente recristalizadas, con ausencia de fósiles (López-Ramos, 1985).

Para el Eoceno medio y superior se tiene la Formación Chichén Itzá. Las rocas esta formación son calizas con abundante fauna, presentan ligeras variaciones litológicas lo que permite dividirla en tres miembros: Miembro Xbacal, Miembro Pisté y Miembro Chumbec. Fue depositada sobre una base casi plana, por lo que no ofrece grandes variaciones en los ambientes de depósito y sólo se diferencia a través de su microfauna (López-Ramos, 1985).

Para el Oligoceno inferior los depósitos son de calcarenitas con espesores de 1 - 1.5 m. El Oligoceno superior está constituido por calizas y calcarenitas coquinoides, con abundantes restos de moluscos, briozoarios, algas y miliólidos (López-Ramos, 1985).

La Formación Bacalar correspondiente al Mioceno inferior consiste en calizas blandas con nódulos duros. Existe una transición a margas blandas en los niveles inferiores y ocasionalmente se presentan finas capas de yeso (López-Ramos, 1975).

Los depósitos del Pleistoceno y Holoceno corresponden a calizas coquiníferas masivas, cuya fauna comprende abundantes moluscos y se correlacionan con el Pleistoceno; mientras que las capas superiores, más blandas y costeras, pertenecen a un periodo más reciente. El Cuaternario está representado por carbonatos sin la presencia de evaporitas (López-Ramos, 1985). En la Figura 2.3 se puede observar la columna estratigráfica propuesta por López-Ramos para la Península de Yucatán.

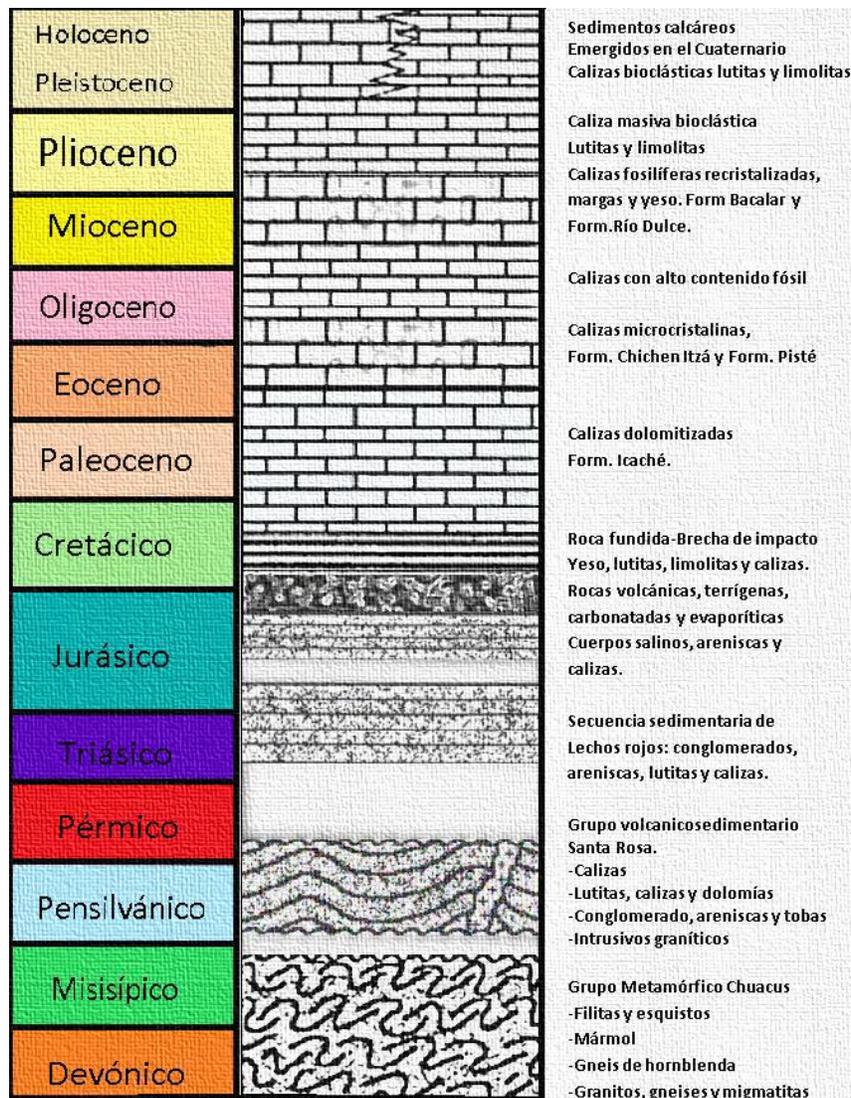


Figura 2. 3 Columna estratigráfica de la península de Yucatán (Modificada de López-Ramos, 1985).

En la primera etapa de evolución, el Golfo de México comienza su apertura con la fragmentación y dispersión del supercontinente Pangea. A partir del Triásico Tardío al Jurásico Temprano, Norteamérica comienza a desplazarse de Gondwana a lo largo de zonas de fracturas intercontinentales, poco definidas; produciendo a su vez depósito de lechos rojos y emplazamiento de diques. La separación de África y Norteamérica se llevó a cabo en el Jurásico Medio (Figura 2.5).

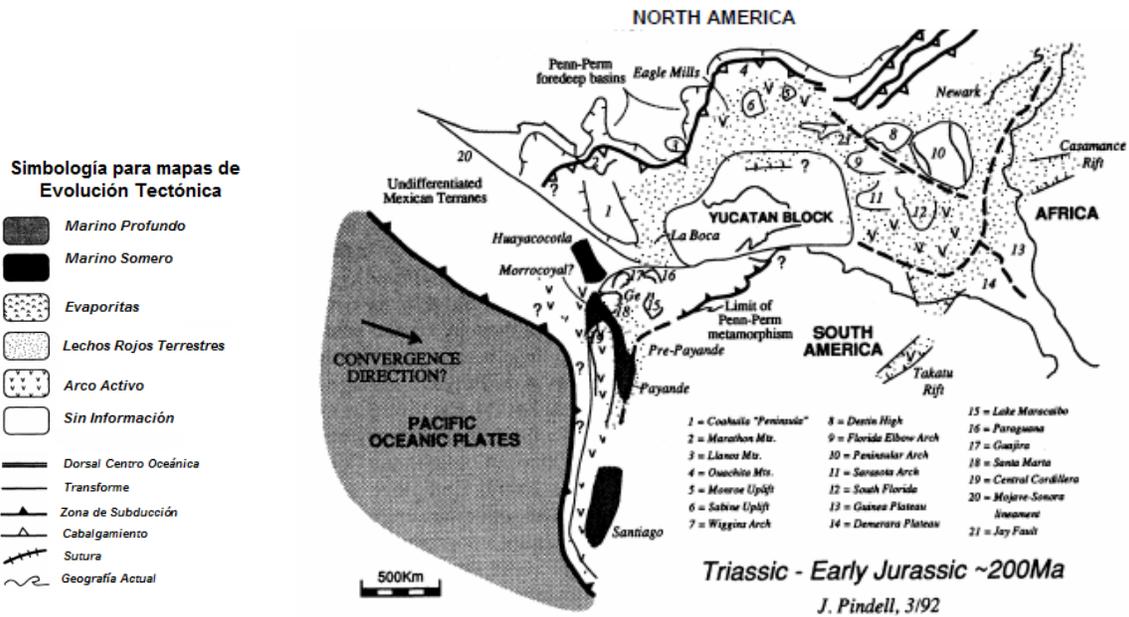


Figura 2.5 Distribución paleogeográfica en el Triásico – Jurásico Temprano (tomada de Pindell, 1994).

A finales del Jurásico Tardío (Oxfordiano), el Bloque de Yucatán comenzó a migrar en dirección Sur a lo largo del flanco este del Arco de Tamaulipas (Figura 2.6), produciendo una zona arqueada de cizalla a lo largo de la parte este de México. Durante el Jurásico Medio—Calloviano y el Jurásico Superior—Oxfordiano, se produce una invasión de aguas marinas entre las secciones de Yucatán y Florida que cubrieron una extensa zona con poca circulación, poca profundidad y alta

evaporación. Dichas condiciones favorecieron el depósito de grandes volúmenes de sal en la zona (formaciones Louann y Campeche). Durante el Jurásico Tardío la extensión del lecho marino dividió la cuenca de sal en dos partes (Figura 2.6).

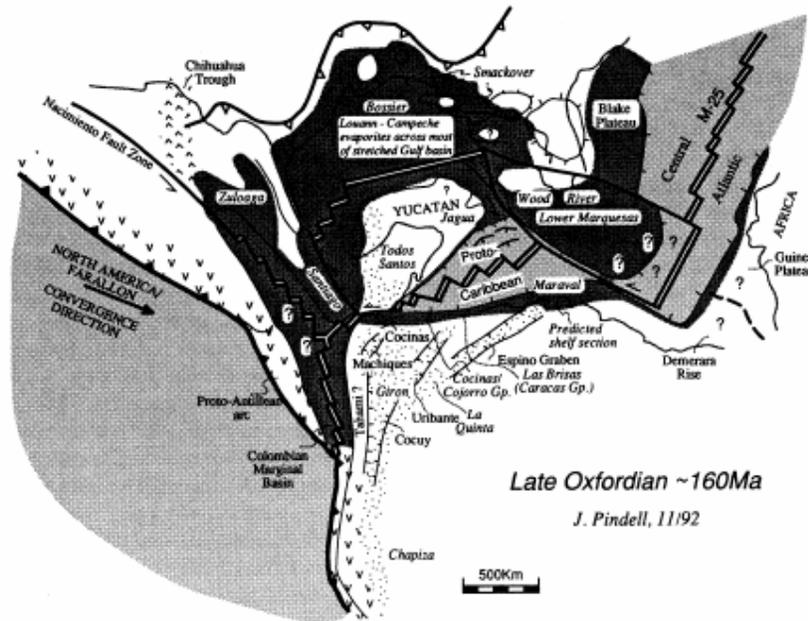


Figura 2. 6 Distribución paleogeográfica en el Oxfordiano tardío (tomada de Pindell, 1994).

La apertura del Golfo de México terminó probablemente en el Cretácico Inferior—Berrisiano (Pindell, 1994). En dicho tiempo, el bloque de Yucatán se volvió parte de la placa de Norteamérica.

Desde el Cretácico Temprano al Aptiano—Albiano la separación de placas continuó entre Norteamérica y Suramérica en el Proto-Caribe, en cuyas márgenes pasivas se desarrolló subsidencia termal. Debido a las reorganizaciones en las fronteras de las placas y la apertura del Atlántico Ecuatorial, gran parte de las cuencas de rift fueron inundadas en el Albiano tardío (Figura 2.7). Las áreas de

plataformas se comportaron como basamentos someros durante la subsidencia (Pindell, 1994).

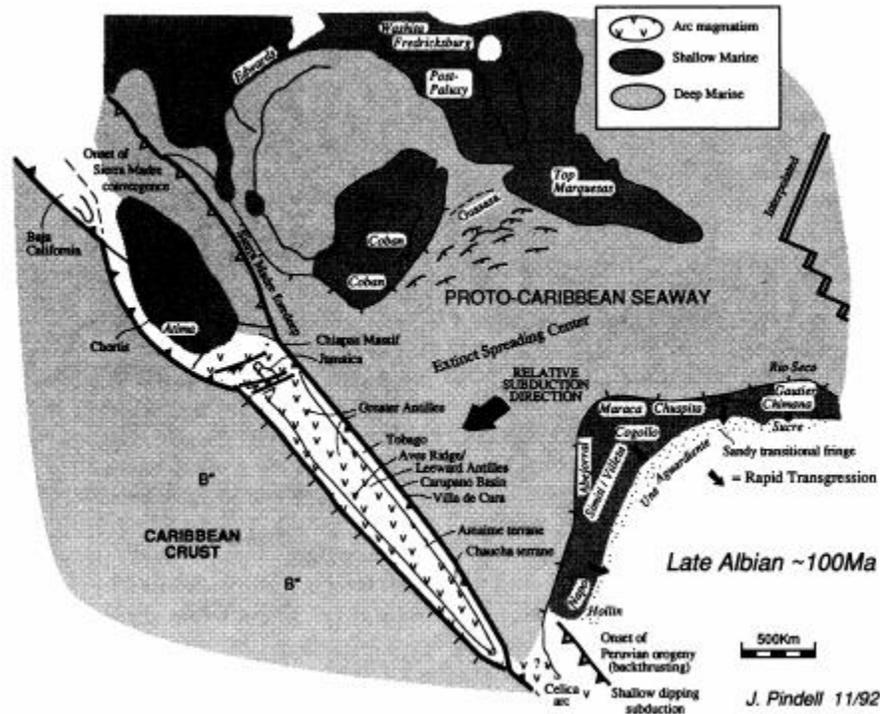


Figura 2. 7 Distribución paleogeográfica en el Albiano tardío (tomada de Pindell, 1994).

Desde el Jurásico Tardío al Cretácico Tardío, la sedimentación en la plataforma de Yucatán estuvo dominada por secuencias carbonatadas, con un cambio a depósito de sedimentos clásticos a principios del Paleógeno, provocado por los esfuerzos de la Orogenia Laramíde, evento que formó la Sierra Madre Oriental. Durante el Paleógeno la sedimentación clástica se fue alojando en grandes depocentros formados en el antepaís de la Sierra Madre Oriental y en las porciones sur y suroccidental del Golfo de México, en donde el Macizo de Chiapas aportó un gran volumen de sedimentos, en el Bloque de Yucatán continuaba el depósito de carbonatos de plataforma somera (Padilla y Sánchez, 2007).

En el Mioceno, durante el Serravaliano, la compresión derivada del movimiento lateral del Bloque de Chortis y de la subducción de la Placa de Cocos contra la Placa de Norteamérica, formó los pliegues y fallas de la cadena de Chiapas-Reforma-Akal sobre el nivel de sal del Calloviano. Posteriormente dichas estructuras sufrieron un basculamiento hacia el noroeste, propiciando el movimiento de la sal hacia el norte. Durante el Plioceno hubo un levantamiento isostático que provocó la emersión de la plataforma de Yucatán y la Sierra Chiapaneca (Figura 2.8).

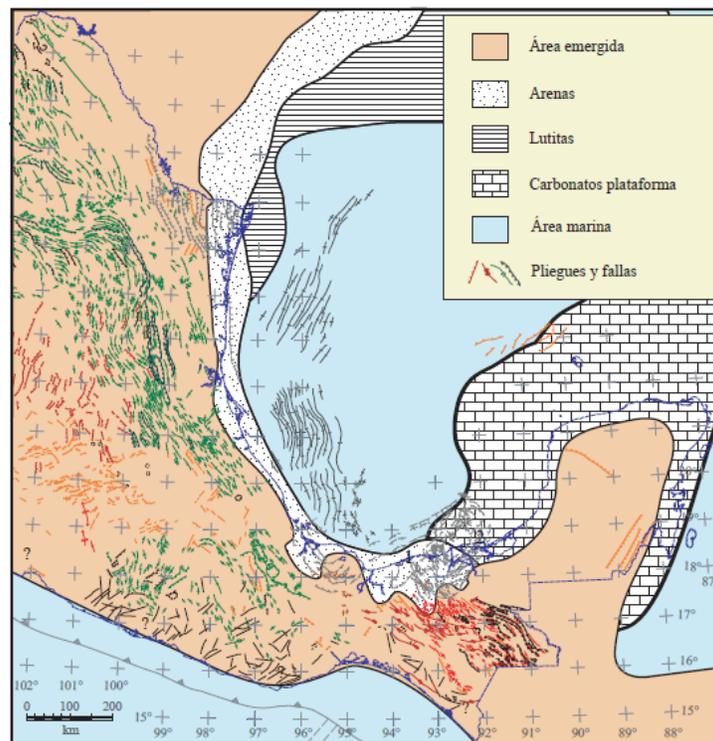


Figura 2. 8 Paleogeografía en el Plioceno (tomada de Padilla-Sánchez, 2007).

Cráter Chicxulub

Uno de los rasgos geológicos y geomorfológicos más importantes de la plataforma carbonatada de Yucatán es el cráter Chicxulub, debido a su importancia en la evolución geológica y biológica en el planeta Tierra.

Tres décadas atrás, Álvarez y colaboradores (1980) publicaron un artículo en cual proponían que el impacto de un asteroide había causado una de las extinciones más severas en la historia del planeta Tierra, marcando la frontera entre el Cretácico y el Paleógeno (referido como límite K/Pg). Dicho estudio se encuentra basado en el enriquecimiento de Iridio, en las secciones correspondientes al límite K/Pg en secuencias de Dinamarca, Italia y Nueva Zelanda. Un año después, durante la reunión anual de la Sociedad de Geofísicos de Exploración (SEG) Penfield y Camargo-Zanoguera (1981), presentaron un estudio en el cual sobresalía una estructura enterrada en la Plataforma carbonatada de Yucatán. Dicha estructura estaba caracterizada por patrones de anomalías gravimétricas y magnéticas semicirculares, sobre un área de ~200 km de diámetro, que fue interpretado como un centro volcánico muy grande o un cráter de impacto. Después de una década de estudios adicionales, Hildebrand y colaboradores (1991, 1998), resumieron los estudios de la zona y establecieron la relación del impacto con el límite K/Pg.

El cráter Chicxulub está localizado en la plataforma carbonatada de Yucatán, en la parte sur del Golfo de México (Figura 2.9). La estructura se encuentra aproximadamente, mitad en la parte marina y mitad en la parte terrestre, cubierta

de sedimentos carbonatados. El centro del cráter se encuentra aproximadamente en la línea de costa del Puerto de Chicxulub (Urrutia *et al.* 2011).

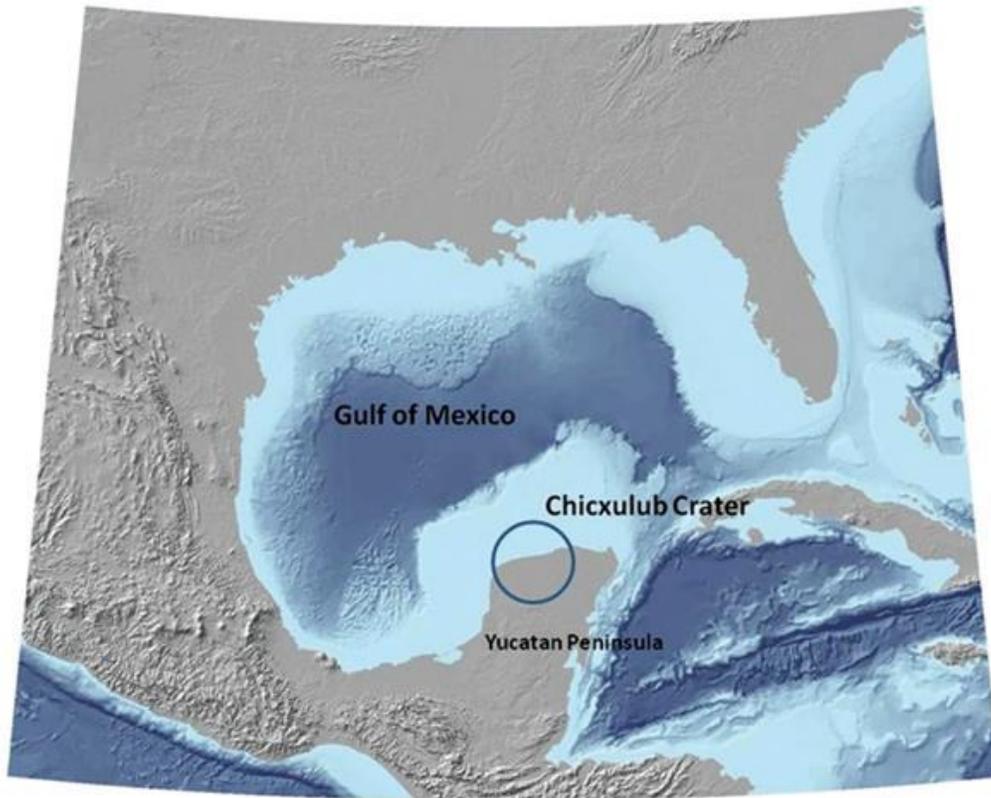


Figura 2. 9 Localización del cráter Chicxulub (tomada de Urrutia, 2011).

Datos geofísicos indican que el cráter Chicxulub es una cuenca multi-anillos, con tres series de anillos semicontinuos arqueados de fallas y rasgos topográficos concéntricos que se levantan por encima del piso del cráter (peak ring). El impacto preserva la deformación de al menos 30 km de profundidad, alterando la frontera corteza-manto (Gulick *et al.*, 2013).

La estructura, tamaño y morfología del cráter Chicxulub han sido investigados en las últimas dos décadas, utilizando métodos de gravimetría, magnetometría,

sísmica de reflexión y magnetotelúrico, así como perforación de pozos, adquisición de registros y perforación con recuperación de núcleos (Urrutia *et al.*, 2011).

Las propiedades petrofísicas de las litologías propias del impacto y rocas preexistentes han sido determinadas a partir de registros geofísicos y muestras de núcleo. Las litologías de impacto han sido estudiadas con análisis petrológicos, geoquímicos e isotópicos. La estratigrafía y la edad de impacto han sido estudiadas con información de pozos, datación radiométrica, bioestratigrafía, secuencias estratigráficas y polaridad magnética (Urrutia *et al.*, 2011).

3. Metodología

Localización del área de estudio

Para la realización de este trabajo de tesis se tomaron dos bases de datos diferentes. La primera corresponde a un levantamiento marino realizado en la primavera de 1985 por el Grupo de Estudio de Márgenes Continentales (CONMAR), de la Escuela de Oceanografía de la Universidad Estatal de Oregón. Dichos datos fueron tomados del sitio web del Centro Nacional de Información Ambiental (NCEI) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) en el apartado de geofísica marina.

La segunda base de datos corresponde a la anomalía de Aire Libre del Mapa Mundial de Gravedad primera edición del 2012. Dichos datos fueron descargados del sitio web del Buró Gravimétrico Internacional (BGI) en la sección del modelo global.

Datos marinos

Los datos corresponden a un levantamiento en los márgenes de la Península de Yucatán a bordo de un buque de la Marina Mexicana, “El Altaír”. El crucero Yucatán 85 recopiló aproximadamente 9600 millas náuticas (17,800 km) de datos marinos de gravimetría, magnetometría y batimetría monohaz. El levantamiento cubrió la Plataforma de Yucatán con líneas uniformemente separadas (Figura 3.1). Las mediciones se realizaron a lo largo de líneas espaciadas aproximadamente cada 22 km, con una orientación principal Norte—Sur y estaciones cada kilómetro.

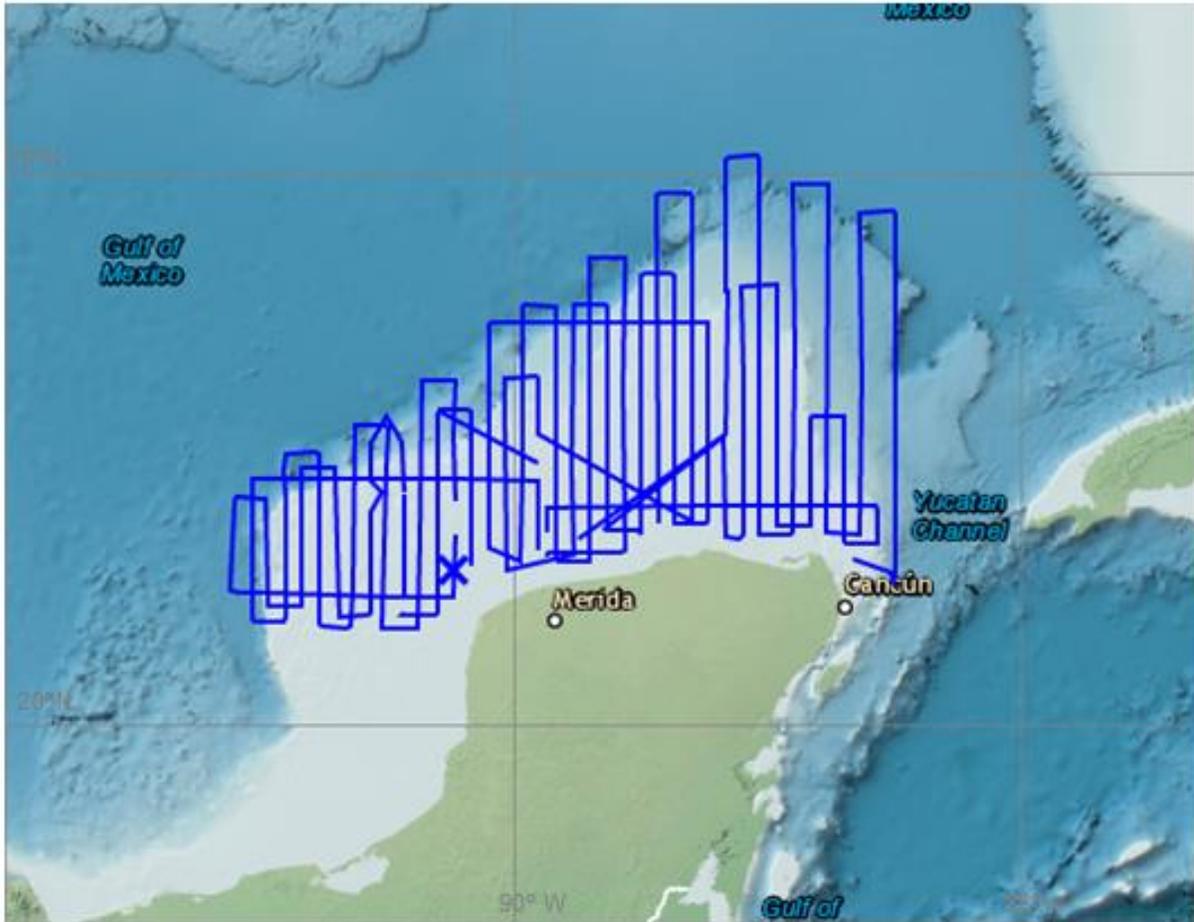


Figura 3. 1 Ubicación del levantamiento marino.

Navegación

En la navegación para los sondeos de la campaña Yucatán 85 fue apoyada por dos sistemas, el sistema ARGO y el sistema de Transito Satelital. En el norte de la península el sistema predominante fue el ARGO, a partir del cual se pudo calcular la corrección de Eötvös con una precisión de 90 metros. El sistema de Transito Satelital sirvió como soporte para el sistema ARGO. En la parte Este de la Península (Caribe Mexicano), el sistema que se usó fue el de transito satelital, teniendo una precisión de 300 metros (Abdeslem, 1990).

Mediciones de gravedad marina

Las mediciones de gravimetría se llevaron a cabo con un gravímetro LaCoste and Romberg, de dos ejes, para aire y mar. Las mediciones se efectuaron cada 10 segundos, posteriormente se re muestreó el levantamiento hasta tener mediciones cada 3 minutos, teniendo una estación por kilómetro considerando 10.8 nudos como velocidad del buque (Alvarado-Omaña, 1986).

Debido a que las mediciones del gravímetro son relativas a estaciones terrestres, se realizó un ajuste con una base gravimétrica en el puerto de Progreso que, a su vez, tuvo una corrección referida a la base absoluta en la Estación de Gravedad Internacional (IGB08LL19; ACIC CODE 1764-1), donde el valor establecido es de 978721.32 mGal. Asimismo se realizó la corrección por mareas terrestres y derivada del instrumento en las mediciones a bordo. La deriva total del gravímetro para la campaña Yucatán 85 fue de 0.00368 mGal/día (Alvarado-Omaña, 1986).

Todos los datos medidos en una plataforma en movimiento requieren correcciones. Tomando en cuenta que son datos de aceleración, es requerido hacer una separación entre valores de la gravedad y aceleraciones externas, como las propias del barco (verticales y horizontales), y efectos propios del instrumento. Dichas correcciones fueron realizadas por Alvarado-Omaña (1986).

La anomalía de aire libre se obtiene a partir de la diferencia entre la gravedad observada a nivel del mar y el valor teórico de la gravedad, calculado para cada punto. Para el levantamiento se realizó la corrección con el valor del Campo Gravimétrico Internacional de 1967 (Alvarado-Omaña, 1986).

Mediciones de magnetometría marina

Para el levantamiento de datos magnéticos marinos se utilizó un magnetómetro de Protón Precesión para aire y mar GeoMetrics G801/3. El instrumento fue remolcado en un contenedor a prueba de agua por el buque, a una distancia de 180 metros, para evitar la interferencia magnética provocada por el barco. El campo magnético total fue muestreado cada 10 segundos a bordo del buque y posteriormente re-muestreado a 3 minutos cada medición. La precisión del instrumento es de ± 1 nT. La anomalía de campo total se obtuvo a partir de la resta del valor escalar del Campo Geomagnético de Referencia Internacional (IGRF) de 1985 del valor de campo magnético total (Abdeslem, 1990).

Para remover las variaciones temporales del campo magnético de las observaciones marinas se establecieron en tierra tres magnetómetros GeoMetrics de protón-precisión modelo G-856A, con una precisión de ± 0.5 nT (Figura 3.2). Se realizó la corrección para variación diurna y fluctuaciones magnéticas, debido a tormentas eléctricas, tormentas solares y otros fenómenos (Abdeslem, 1990).

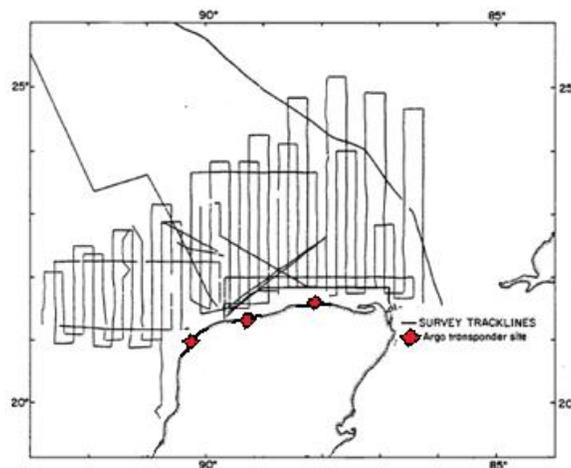


Figura 3. 2 Ubicación de las bases magnéticas en tierra (modificada de Abdeslem, 1990).

Mediciones batimétricas

Para realizar el levantamiento batimétrico se utilizó una ecosonda EDO Western, con un transceptor de 2 kilowatts funcionando a una frecuencia de 12 kHz. Los datos se desplegaron en un registrador gráfico de un solo canal EPC 4600, con una frecuencia de barrido de 4 segundos, posteriormente fueron digitalizados a mano con un intervalo de 3 minutos. Los datos se corrigieron por la velocidad del sonido en el agua, obteniendo los valores de profundidad (Abdeslem, 1990).

Mapa mundial de Gravedad

El Mapa Mundial de Gravedad comprende una serie de mapas y mallas digitales calculadas a escala global a partir de modelos de gravedad y elevación terrestres. Los datos son derivados de modelo geopotencial EGM2008 y el modelo global de relieve ETOPO1. La información que se utiliza para realizar dichos modelos proviene de mediciones de gravedad (aire, tierra y mar) y altimetría y gravimetría satelital de la misión GRACE (Bonvalot *et al*, 2012).

Para este trabajo se utilizó una malla digital de la anomalía de Aire Libre con un espaciamiento de 2 minutos y límites de 85.9°—93° W y 20.7°—24.4°N (Figura 3.3).

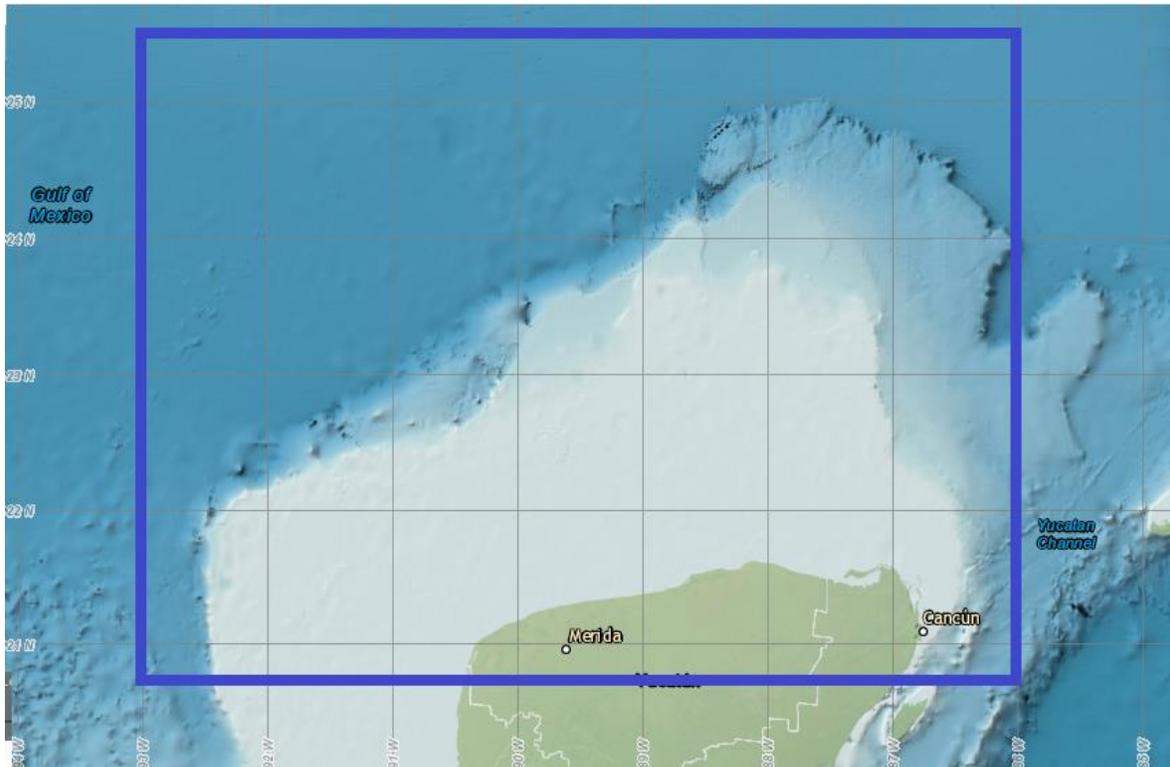


Figura 3.3 Límites de la malla de datos satelitales.

Procesamiento de datos de gravimetría y magnetometría

Los métodos geofísicos de exploración gravimétrico y magnetométrico son ampliamente utilizados debido a la versatilidad que ofrecen. En el presente trabajo de tesis se aplicaron diferentes métodos de interpretación para definir la distribución de masas a lo largo de la plataforma.

Separación Regional – Residual

Este proceso está diseñado para realizar la separación de efectos de fuentes someras o menor longitud de onda y fuentes profundas o de mayor longitud de onda (Blakely, 1996).

Existen diversas metodologías para realizar la separación. En esta tesis se utilizó el método de continuación analítica ascendente, propuesto por Blakely (1996). La

continuación ascendente es un método que transforma el campo potencial medido en una superficie, al campo potencial medido en una superficie con mayor altitud o más lejana a las fuentes. Particularmente, el proceso de continuación ascendente tiende a atenuar anomalías causadas por fuentes locales o someras relativamente a aquellas más profundas o regionales.

En el dominio de la frecuencia, a partir de la transformada de Fourier bidimensional (1) y el vector de números de onda (2), el operador de la continuación ascendente se puede expresar como (3):

$$\mathcal{F}\{f(x, y)\} = F(p, q) \quad (1)$$

$$k(p, q) = \sqrt{p^2 + q^2} \quad (2)$$

$$F(u) = e^{-\Delta z |k|}, \quad (3)$$

$\Delta z > 0$; *valor de la continuación*

Derivadas direccionales

Diversos métodos de interpretación de datos potenciales como el gradiente horizontal y la señal analítica, tienen en común las derivadas direccionales. El cálculo de estas se puede realizar por el método de diferencia finitas o a través de la propiedad de diferenciación de la transformada de Fourier (Blakely, 1996).

Para obtener las derivadas con respecto a x y y , se utilizó el método de diferencias centradas (4) y (5) y diferenciación en el dominio del número de onda para las derivadas con respecto a z (6).

$$\frac{d}{dx}f(x_i) \approx \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}))}{2\Delta x} \quad (4)$$

$$\frac{d}{dy}f(y_j) \approx \frac{f(y_{j+1}) - f(y_{j-1}))}{2\Delta y} \quad (5)$$

$$\mathcal{F}\left\{\frac{\partial^n}{\partial z^n}f(x, y)\right\} = k(p, q)^n F(p, q) \quad (6)$$

Gradiente Horizontal

El método de gradiente horizontal es un proceso aplicado para la detección de bordes laterales de fuentes de campos potenciales, se basa en los gradientes o cambios abruptos de magnetización o densidad a lo largo de una malla o un perfil (Blakely, 1996). Los máximos de este proceso se sitúan en los bordes de las fuentes causantes de las anomalías. Se puede expresar matemáticamente de la siguiente forma (7):

$$H(x, y) = \sqrt{\left[\frac{\partial}{\partial x}f(x, y)\right]^2 + \left[\frac{\partial}{\partial y}f(x, y)\right]^2} \quad (7)$$

Señal Analítica

Este método está formado por la combinación de gradientes horizontales y verticales de datos potenciales. La señal analítica tiene una forma de campana sobre los cuerpos o fuentes causantes. Este método es de gran importancia, ya que dependen de la localización, pero no de la dirección de magnetización de las fuentes en el caso de datos magnéticos (Blakely, 1996). La aplicación de este método por primera vez fue por Nabighian (1972), posteriormente Roest y

colaboradores (1992), demostraron que la amplitud de la señal analítica 3D (9) de una anomalía de campo potencial (8) puede denotarse como (10):

$$\varphi = f(x, y) \quad (8)$$

$$A(x, y) = \left[\frac{\partial \varphi}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \hat{y} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \hat{z} \right] \quad (9)$$

$$|A(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z}\right)^2} \quad (10)$$

Señal analítica mejorada

Este método propuesto por Hsu y colaboradores (1996) proponen aumentar la resolución de los bordes de anomalías en planta, al introducir derivadas verticales de mayor orden (11), con este proceso se reduce el efecto de interferencia entre fuentes.

La expresión matemática para la señal analítica mejorada de orden n es (12) y el cálculo de su amplitud es (13):

$$\varphi = f(x, y)$$

$$\nabla^n = \frac{\partial^n}{\partial z^n} \quad (11)$$

$$A(x, y) = \left[\frac{\partial}{\partial x} (\nabla^n \varphi) \hat{x} + \frac{\partial}{\partial y} (\nabla^n \varphi) \hat{y} + \frac{\partial}{\partial z} (\nabla^n \varphi) \hat{z} \right] \quad (12)$$

$$|A(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial x} (\nabla^n \varphi)\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial y} (\nabla^n \varphi)\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial z} (\nabla^n \varphi)\right)^2} \quad (13)$$

Procesos aplicados

Los siguientes diagramas de flujo (Figuras 3.4 y 3.5), muestran los procesos que se aplicaron a cada una de las bases de datos es importante mencionar que no se realizaron correcciones temporales o espaciales a los datos, ya que como se especifica anteriormente, éstas fueron realizadas previamente. Respecto a la reducción al polo en los datos magnéticos, no se realizó, debido a que a lo largo de la plataforma no se pueden observar anomalías dipolares (Abdeslem, 1990).

Con ayuda del software Surfer 11 se llevó a cabo la interpolación de los datos para obtener una malla regular, se utilizó el método de Kriging, ya que permitió rellenar las celdas de la malla en las que no existía información (datos magnéticos); esto con el objetivo de aplicar la transformada de Fourier sobre una malla “suavizada”.

El procesamiento posterior se realizó con un “script” escrito en Matlab, que permite tener un control adecuado en la calidad de los procesos y los resultados.

Los procesos posteriores a la separación Residual – Regional, se realizaron para cada matriz de valores ascendidos y para la anomalía de campo total y de aire libre respectivamente. Se decidió utilizar los valores del regional ya que el área de estudio comprende una zona geográficamente muy extensa; por lo que, la identificación de anomalías locales complicaría la interpretación de los resultados asimismo, la calidad de los datos magnéticos no es la adecuada para realizar ese tipo de análisis.

La visualización final de los datos se realizó con el software Geosoft – Oasis Montaj 6.4.2. Para la realización de las mallas el método de mínima curvatura fue

el utilizado, debido a que el tiempo de procesamiento es menor que el necesario para realizar la interpolación con otros algoritmos como Kriging. El recorte de las mallas de magnetometría se hizo con el enmascaramiento de un polígono definido por las líneas del levantamiento marino.

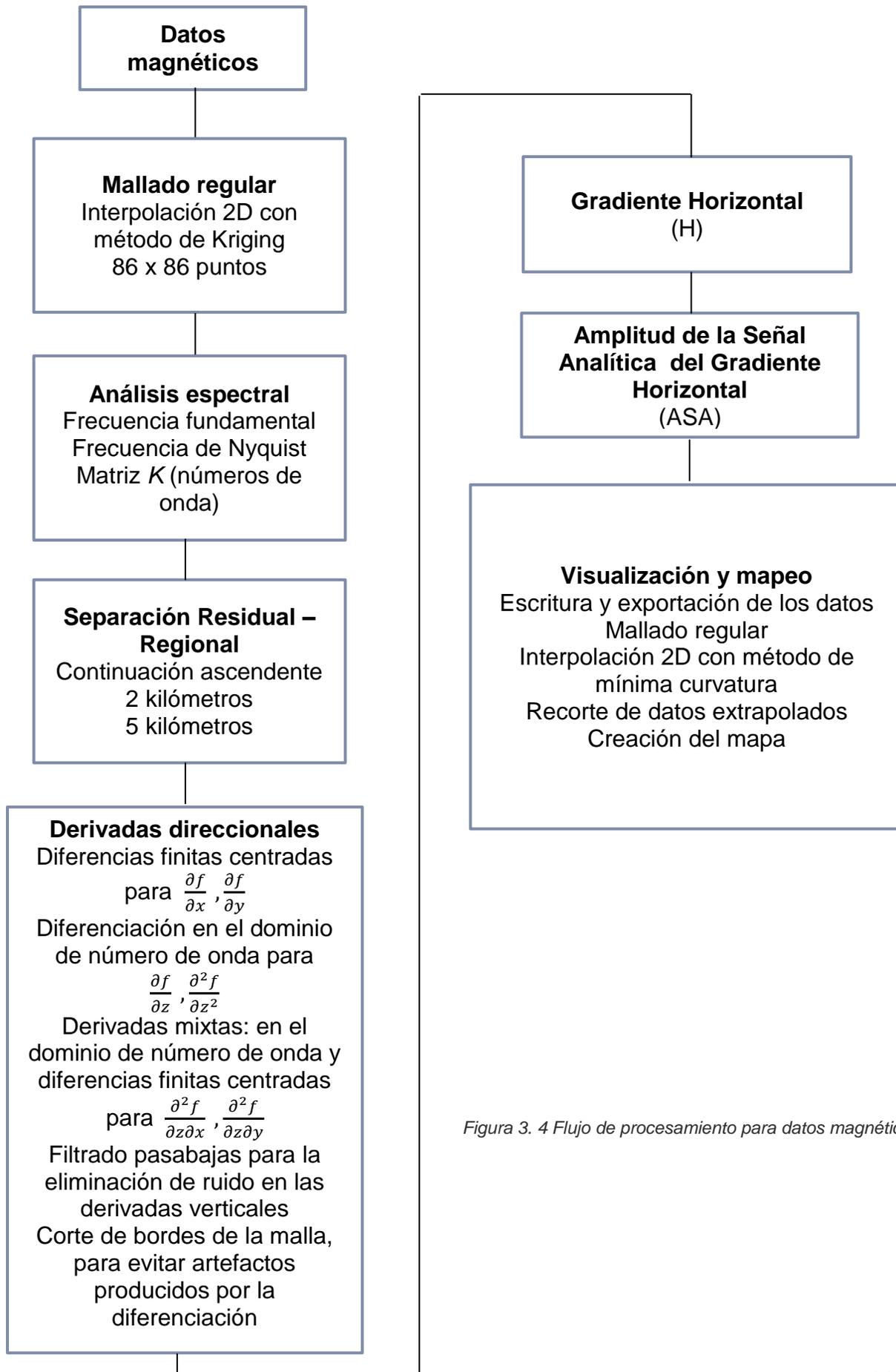


Figura 3. 4 Flujo de procesamiento para datos magnéticos

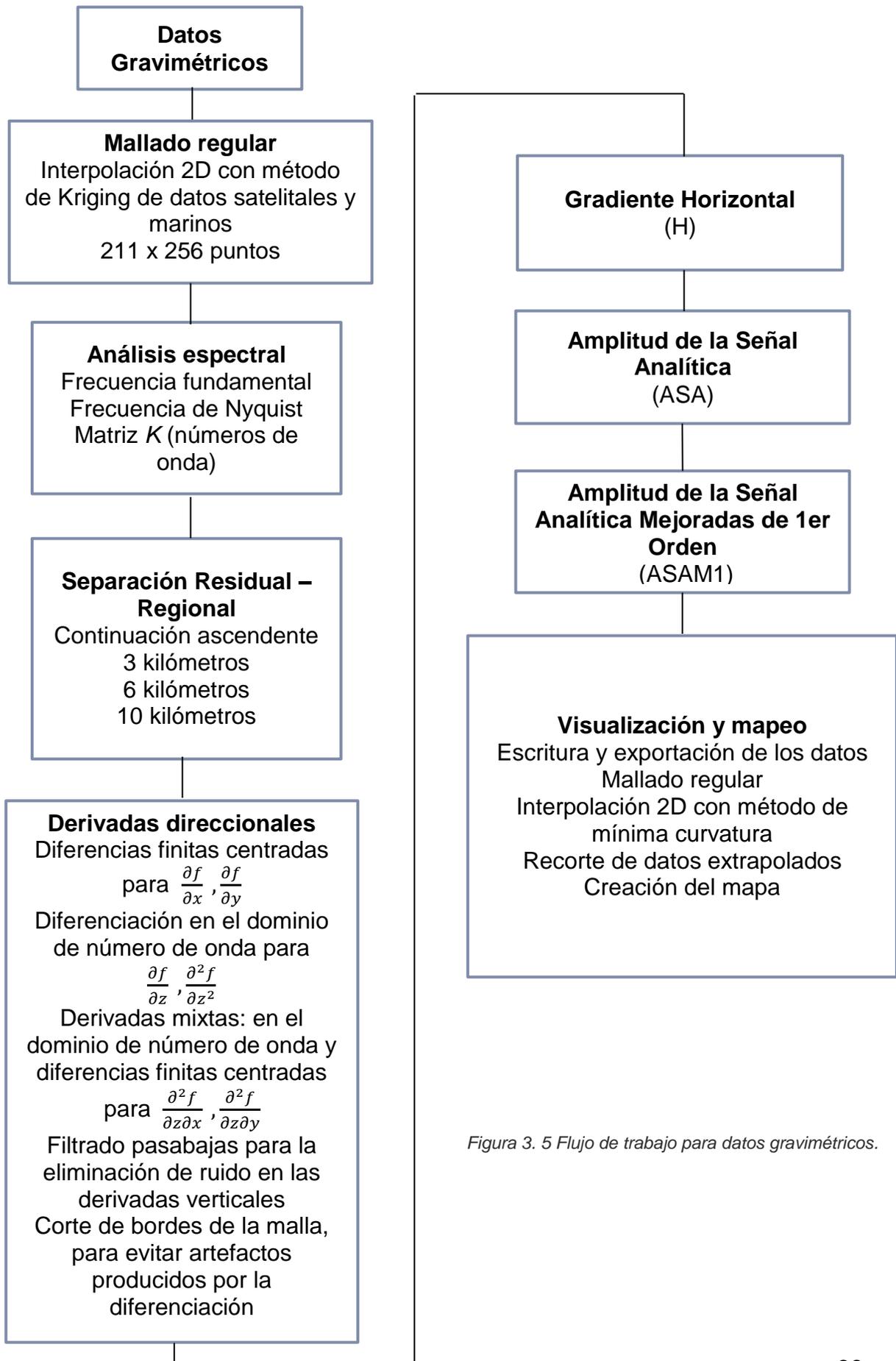


Figura 3. 5 Flujo de trabajo para datos gravimétricos.

4. Análisis de los resultados

A continuación se muestran los resultados del procesamiento de los datos gravimétricos y magnéticos, así como su descripción y análisis. Todos los mapas realizados se encuentran en la sección de anexo digital, en este capítulo solo se incluyeron aquellos mapas que permitieron realizar una mejor interpretación.

Batimetría

La plataforma carbonatada de Yucatán ha sido dividida en diferentes unidades fisiográficas (Figura 4.1). El banco de Campeche consiste en la región más somera que se extiende de la línea de costa hasta la isóbata 80 m, con una pendiente suave en la dirección Norte, en la parte Noreste tiene una forma irregular de la isóbata 60 m a la isóbata 200 m. Tiene una extensión aproximada de 100 km de ancho y 450 km de largo. El lado Este del banco de Campeche es cortado por una sección reconocida como la terraza de Campeche, que se extiende desde la isóbata 200 m hasta el borde oriental del escarpe de Campeche, tiene una pendiente poco pronunciada.

En la parte Norte y Este de la plataforma de Yucatán se encuentra el escarpe de Campeche, que delimita la plataforma de la zona abisal del Golfo de México, tiene un cambio súbito en las profundidades, a partir de la isóbata 100 m la batimetría desciende abruptamente hasta alrededor de los 3500 m. La estructura tiene una orientación NE—SW y está cortada en toda su extensión por diversos cañones que fueron estudiados por Paull y colaboradores (2014). En dirección a la zona central del Golfo de México, se encuentra una de las unidades fisiográficas más

extensas, la Planicie Sigsbee que está caracterizada por profundidades mayores a los 3000 m.

En el borde Oeste de la plataforma como parte del escarpe de Campeche se encuentra el cañón de Campeche, este rasgo se extiende de la isóbata 60 m hasta una profundidad mayor a los 2000 m, la orientación es N—S con una longitud aproximada de 190 km.

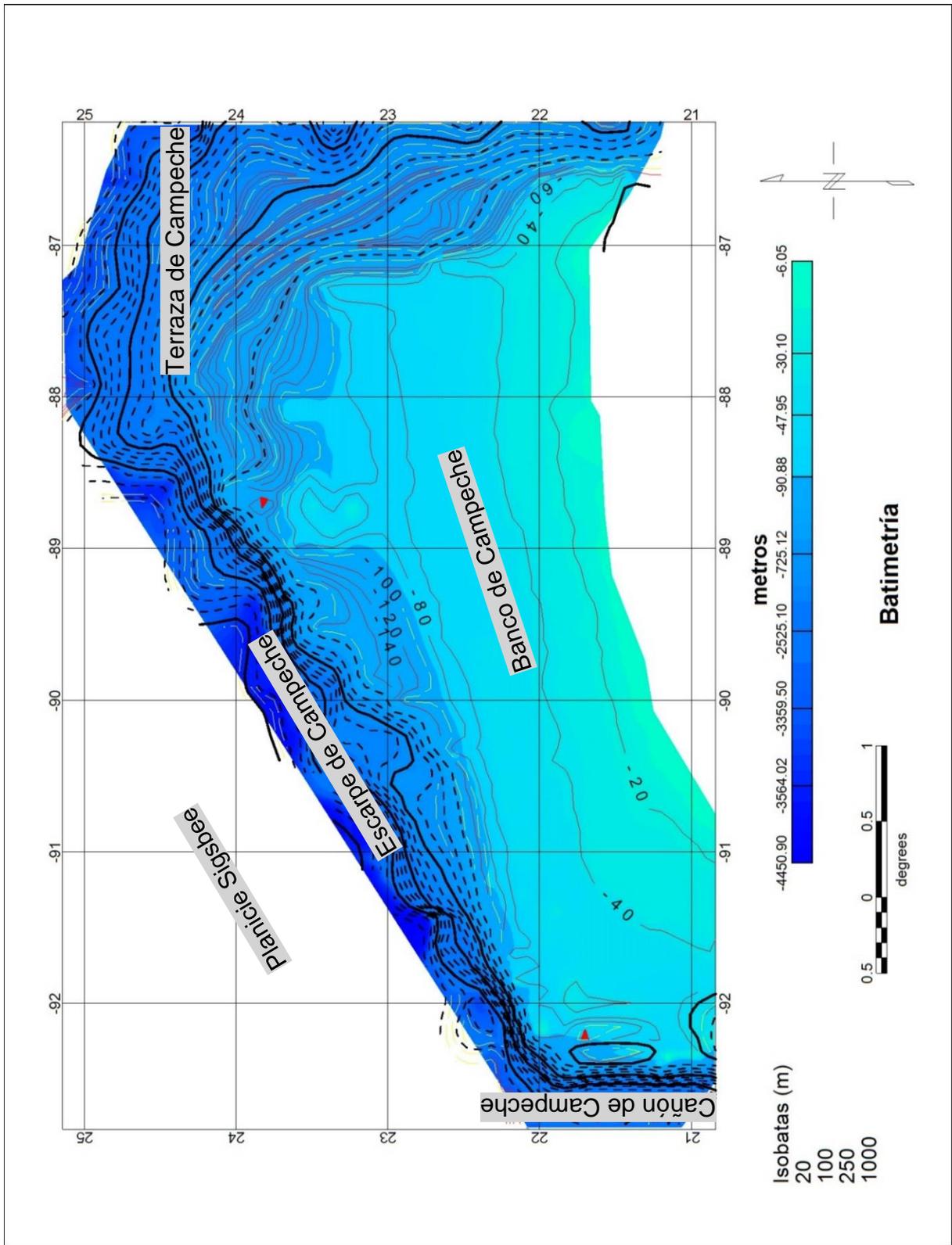


Figura 4. 1 Mapa batimétrico.

Gravimetría

Anomalías de Aire Libre

El contraste de densidades, tan grande entre el agua de mar y las rocas y sedimentos, que yacen debajo de la columna de agua provocan que los contornos de la anomalía de aire libre sigan las isolíneas de la batimetría. Esto significa que para observar cambios significativos en los mapas gravimétricos, el contraste de densidades, la estructura, el espesor de los cuerpos sedimentarios o el tamaño de las fuentes tiene que ser mayor.

El mapa de anomalía de Aire libre (Figura 4.2) tiene un rango de valores que van desde los -111 – 107 mGal. El bajo gravimétrico del escarpe de Campeche (1) se extiende a lo largo de la base del Escarpe de Campeche en la isóbata 2000 m hasta el margen de la zona abisal en el Golfo de México. Tiene un rango de -50— -100 mGal, este rasgo sigue los contornos de la batimetría, por lo que refleja el cambio abrupto en la columna de agua entre el margen continental y la zona abisal del Golfo, en la parte Norte. En la zona Este, el bajo de la Terraza de Campeche (6) es otro elemento que sigue los contornos batimétricos, tiene valores entre 0 – -20 mGal. En la zona Sur del área de estudio se observa el alto gravimétrico de Isla Mujeres, tiene una orientación N – S y alcanza valores máximos de 90 mGal, este rasgo se extiende entre las latitudes 20° y 24°N, del lado oeste de este alto se encuentran entre las longitudes 87°—88°W y 21°—24°N las anomalías gravimétricas: Lagartos (8) de menor longitud y menor definición de los máximos y mínimo, tiene una tendencia general N—S. El bajo de Cayo Arenas (7) se puede observar como una discontinuidad del borde de la plataforma, tiene

un valor promedio de 0 mGal, con un máximo local de 10 mGal, tiene una orientación paralela al escarpe de Campeche con una longitud máxima de 110 km y ancho de 50 km. Dos estructuras de altos gravimétricos son el llamado Alacrán (2) y el Banco Nuevo (3) que no siguen las isóbatas, el primero se encuentra localizado entre las latitudes 23° y 24°N y longitud 89° W, tiene una extensión aproximada de 133 km con un máximo de 80 mGal. El alto Banco Nuevo se encuentra en el margen oeste de la plataforma y es el máximo gravimétrico del área con valores entre 50 — 100 mGal.

Uno de los rasgos de mayor relevancia en la plataforma es el cráter de impacto de Chicxulub (4), esta estructura tiene una anomalía gravimétrica con forma de herradura y orientación hacia el norte, se puede observar un patrón de anillos, con el centro ubicado en la línea de costa y valores en un rango de 0—20 mGal. En la planicie Sigsbee, los valores gravimétricos tienen un rango entre los -20—0 mGal, esta región se extiende en la zona norte del escarpe de Campeche, de acuerdo a Alvarado-Omaña (1986) las anomalías gravimétricas con un rango entre -20—20 mGal denotan corteza que esta isostáticamente compensada.

El mapa de anomalía de aire libre con continuación ascendente de 3 km (Figura 4.3) tiene un rango definido entre los -97—92 mGal. Muestra los rasgos regionales a lo largo de la plataforma antes descritos, con la diferencia de acentuar la anomalía Lagartos y mostrar dos mínimos locales a lo largo del bajo del Escarpe de Campeche.

La continuación ascendente a 10 km (Figura 4.4) con rango de -77—73 mGal muestra una plataforma suavizada, en la que resalta una discontinuidad en el patrón del Escarpe de Campeche en la zona Norte, este rasgo es cortado en la zona Noreste con longitud 87°W.

En el mapa de anomalía de Aire Libre y en los tres mapas con continuaciones (3, 6, 10 km) se pueden observar los rasgos regionales antes descritos con algunas variaciones en su longitud, la definición de la forma y la continuidad de los rasgos. A partir de dichas observaciones he definido dos zonas, de la longitud 88°W con dirección al Oeste, a la que se le ha nombrado zona de Mérida con anomalías de gran tamaño y límites definidos incluyendo el bajo del escarpe de Campeche, el cráter de impacto de Chicxulub y los altos Alacrán y Banco Nuevo. En dirección este de la longitud 88°W, la zona de Holbox está caracterizada por anomalías con menor definición, y orientación general N—S.

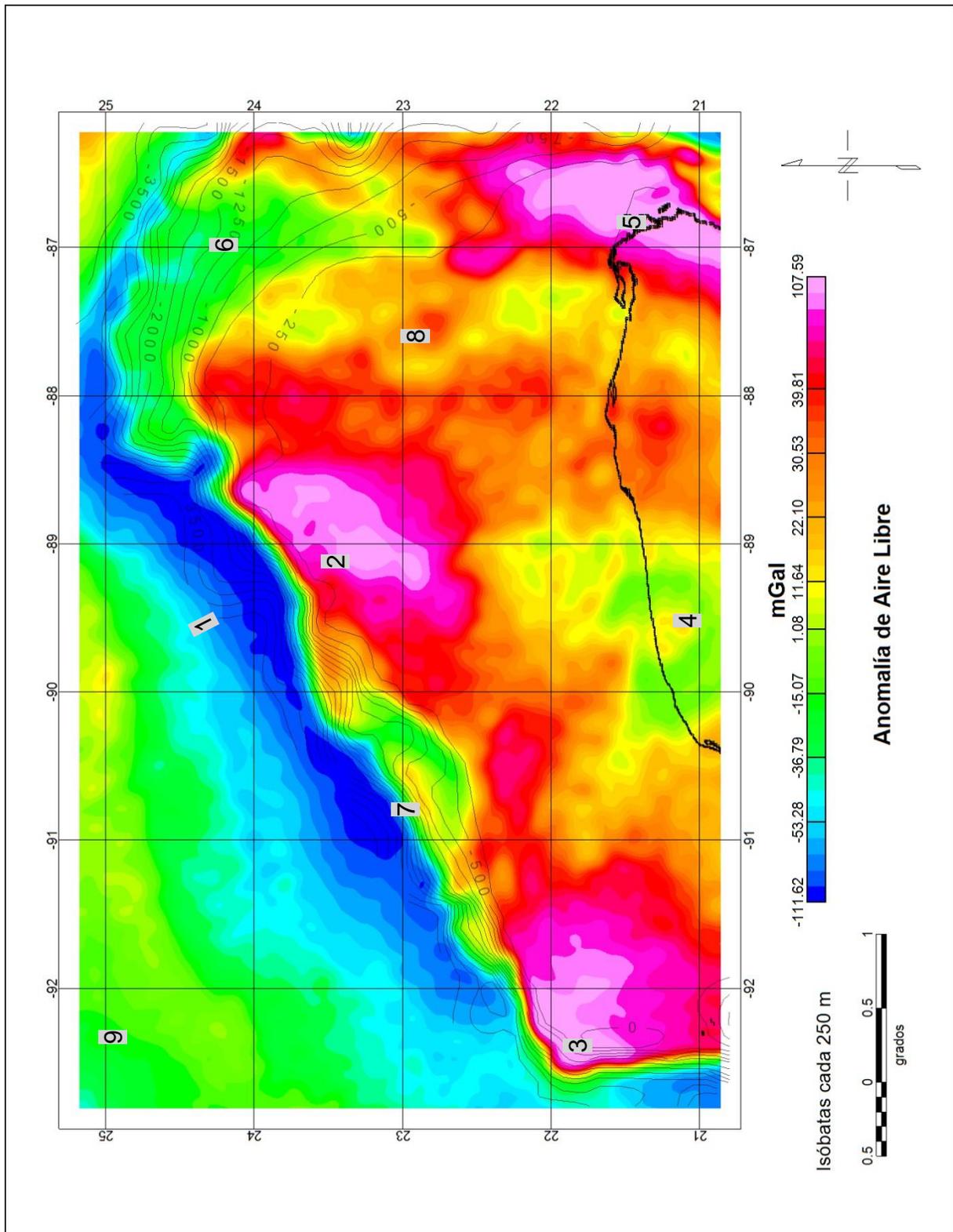


Figura 4. 2 Mapa de anomalía de aire libre. La etiquetas corresponden a la principales anomalías. 1.-Escarpe de Campeche, 2.-Alacrán, 3.-Banco Nuevo, 4.-Cráter Chicxulub, 5.-Isla Mujeres, 6.-Terraza de Campeche, 7.-Cayo Arenas, 8.-Lagartos, 9.-Planicie Sigsbee

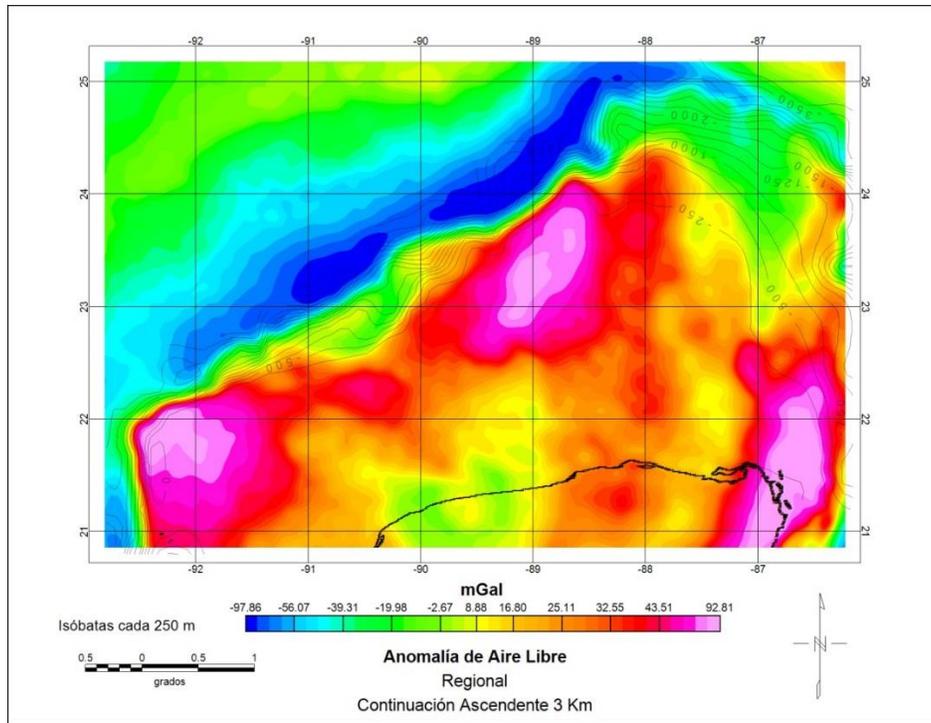


Figura 4. 3 Mapa del regional con continuación ascendente a 3 km.

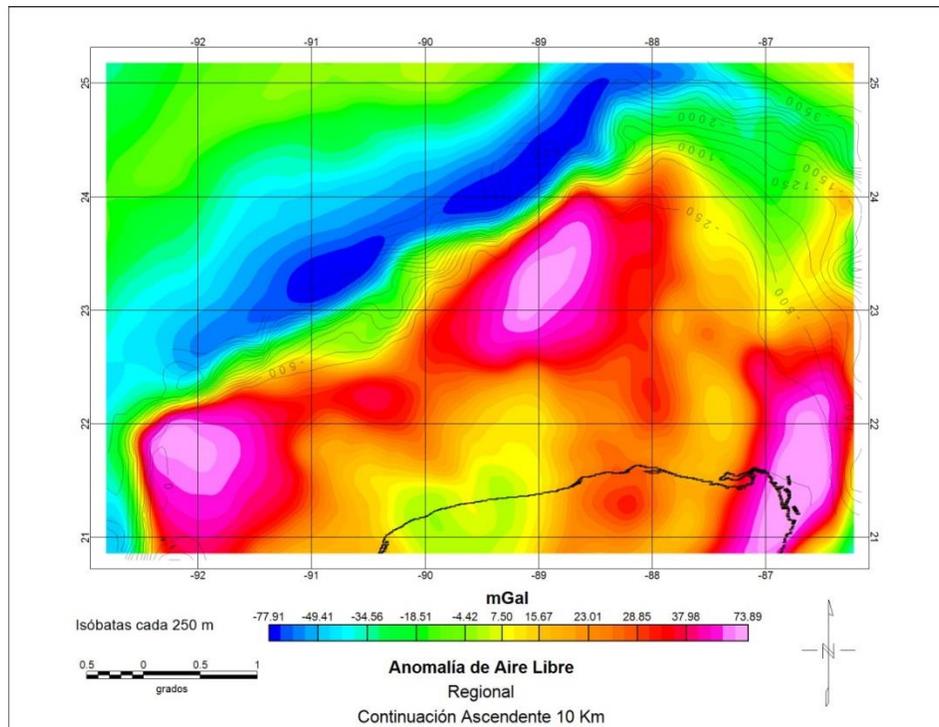


Figura 4. 4 Mapa de regional con continuación ascendente a 10 km.

Gradiente Horizontal

Este método ayuda a la delimitación de bordes de fuentes en las anomalías. A continuación se muestra el mapa del gradiente horizontal aplicado sobre la anomalía de aire libre con continuación ascendente a 3 km (Figura 4.5). Se marcó con color verde los contornos de las anomalías que se han discutido anteriormente (Figura 4.3), la ventaja del mapa de 3 km es que ofrece un mejor contraste. Uno de los rasgos más llamativos es el escarpe de Campeche, que aparece completamente delimitado en cada uno de los mapas. En las Figuras 4.6 y 4.7 también se pueden observar con gran detalle la naturaleza de anillos concéntricos del cráter de impacto de Chicxulub, así como la orientación NE—SW de la anomalía de Alacrán. Un atributo que toma mayor importancia es la discontinuidad en la plataforma por parte de la anomalía Cayo Arenas, ya que a diferencia de otros rasgos este se puede observar bien definido en los cuatro mapas del gradiente horizontal. En la planicie Sigsbee se pueden observar dos lineamientos que corren paralelos al escarpe de Campeche. En la zona de Holbox, la orientación de los bordes tiene una orientación N—S y presentan un máximo entre las latitudes 21° y 22°N.

En el mapa del gradiente horizontal de la anomalía de aire libre, se observan lineaciones de menor longitud de onda, sin un patrón definido.

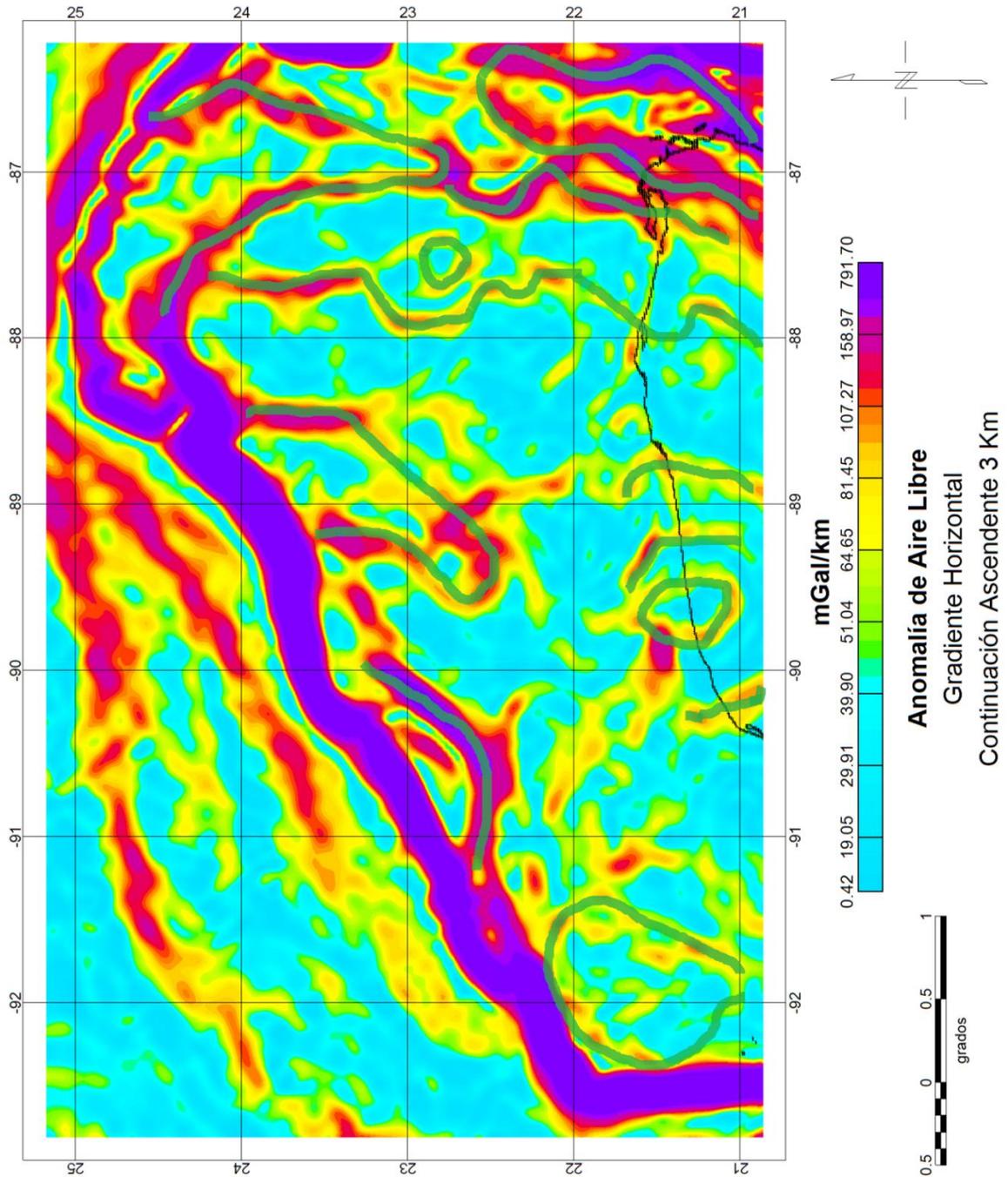


Figura 4.5 Mapa de gradiente horizontal con continuación ascendente a 3 km. En color verde se marcan los contornos más sobresalientes, a excepción del Escarpe de Campeche.

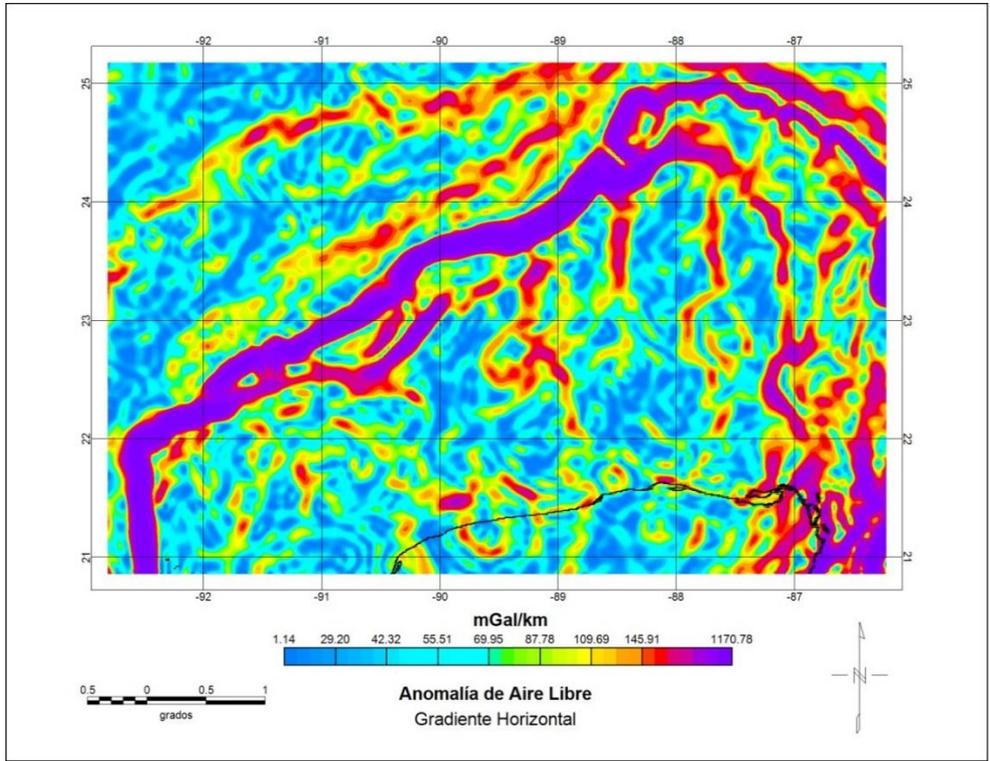


Figura 4.6 Mapa de gradiente horizontal

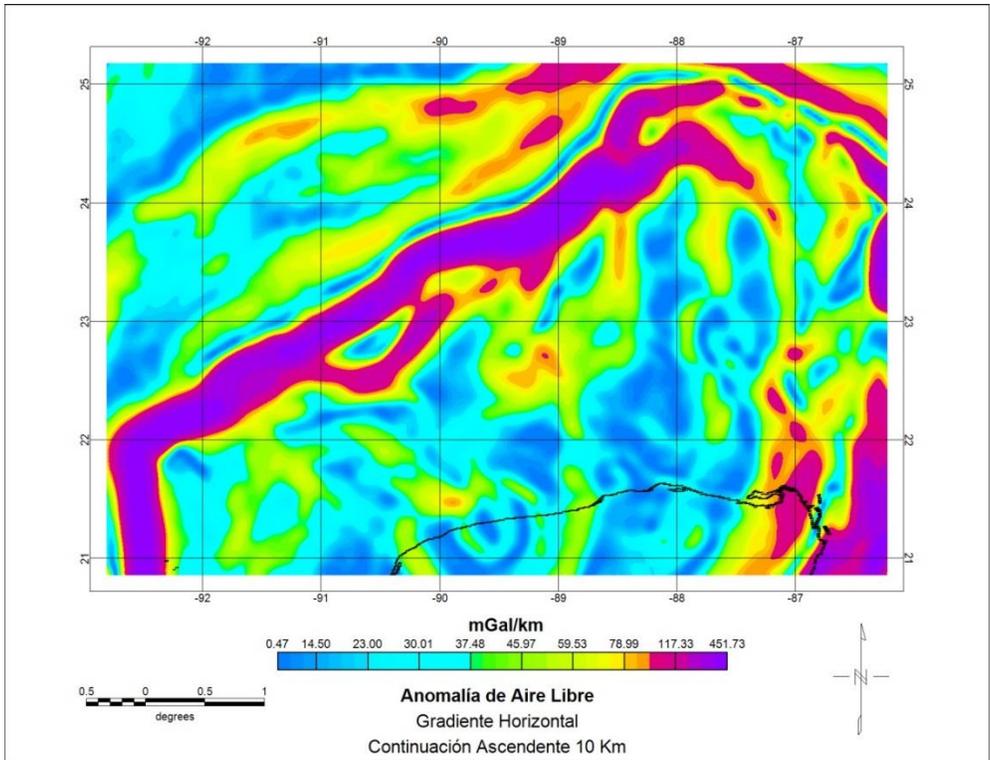


Figura 4.7 Mapa de gradiente horizontal con continuación ascendente a 10 km.

Amplitud de la Señal Analítica

Este método sirve para la delimitación de fuentes en planta. A continuación se muestran los mapas de dicho procesamiento (Figuras 4.8, 4.9 y 4.10); se remarcaron en color verde los límites de los rasgos con un patrón más significativo. En los mapas se puede observar que la característica más resaltante es el escarpe de Campeche, ya que muestra continuidad y se observan los valores máximos en cada imagen. Una de las razones por la que el escarpe es el elemento con mayor amplitud es debido a que el algoritmo de la señal analítica implica el cálculo de la derivada vertical, esta última siendo el cambio con respecto a la componente vertical. Se puede observar en la batimetría (Figura 4.1) que el escarpe de Campeche es un cambio abrupto de profundidad en la región, por lo que el valor de la derivada z es muy grande comparado con otras zonas del área. No obstante, otro rasgo que se mantiene constante en los mapas de amplitud de la señal analítica es la anomalía de Isla Mujeres, que como se ha descrito anteriormente, no tiene una correlación con las isóbatas.

Los rasgos que se desvanecen a partir de los 6 km de continuación ascendente (Figura 4.10), son el cráter Chicxulub y el Banco Nuevo. A su vez, la anomalía de Alacrán se “integra” al máximo del escarpe de Campeche.

Para realizar un mejor análisis de las anomalías regionales, sería recomendable aplicar el procesamiento sobre zonas específicas de la plataforma, disminuyendo el ruido producido por la diferenciación en el dominio de la frecuencia.

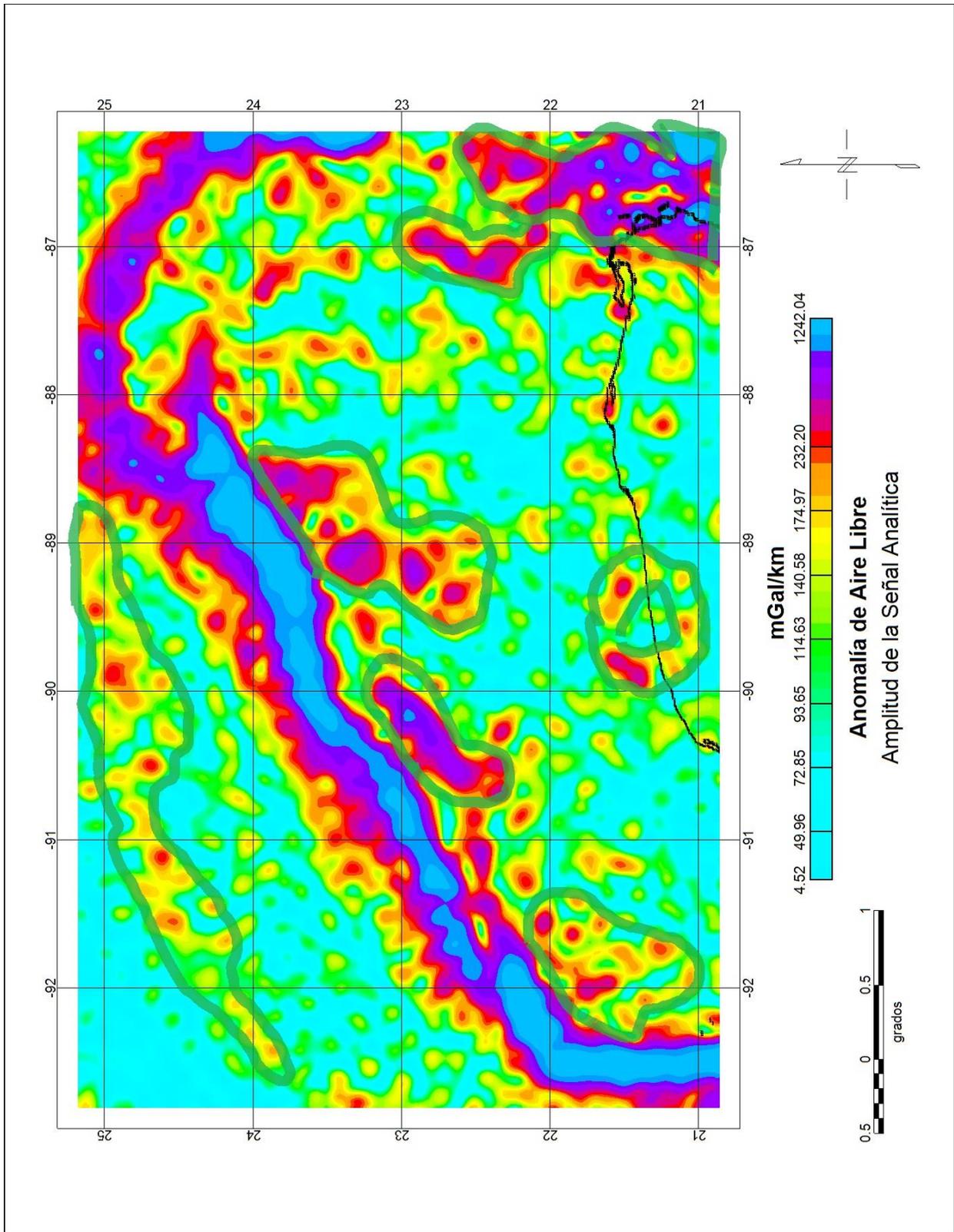


Figura 4. 8 Mapa de amplitud de la señal analítica. Con color verde se encuentran delimitados, los patrones mejor definidos.

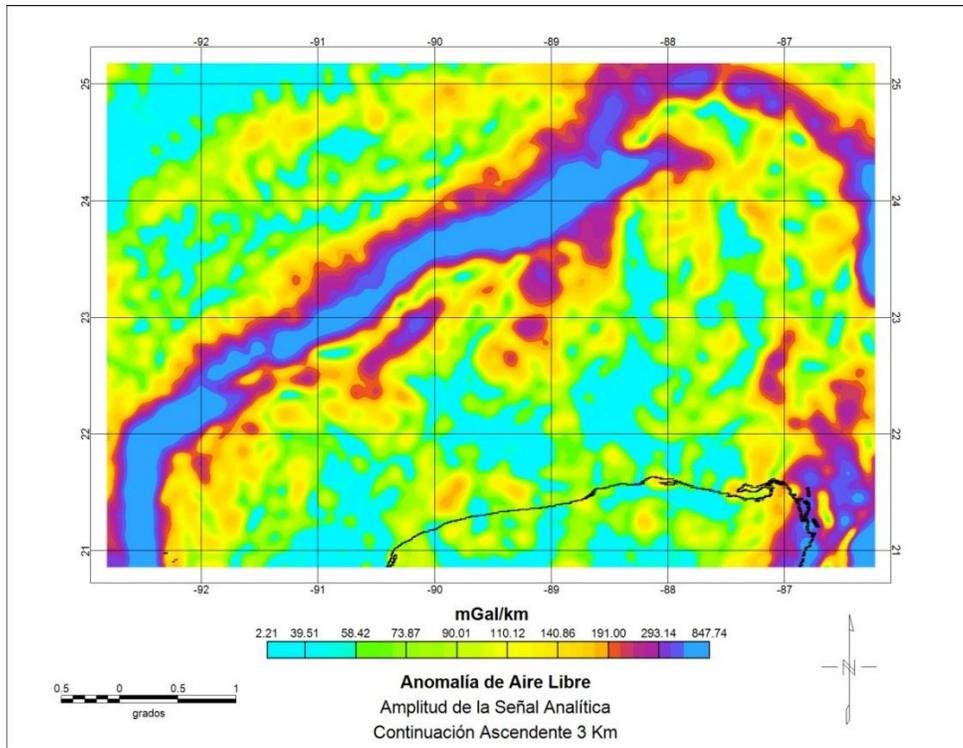


Figura 4. 9 Mapa de amplitud de la señal analítica con continuación ascendente a 3 km.

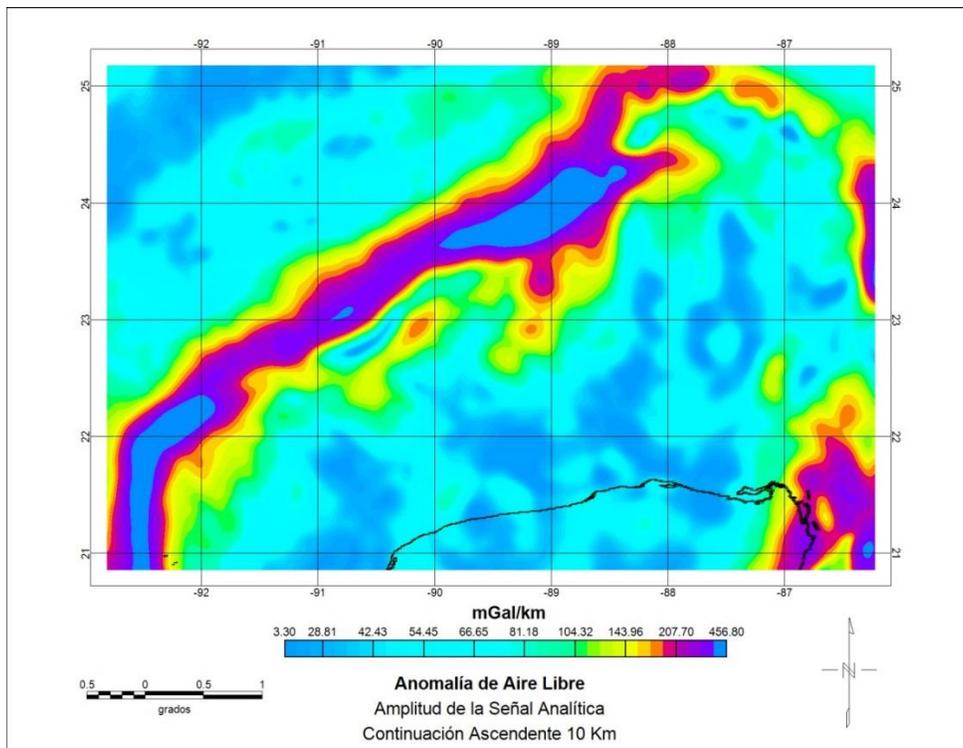


Figura 4. 10 Mapa de amplitud de la señal analítica con continuación ascendente a 10 km.

Amplitud de la Señal Analítica Mejorada de 1er Orden

Este método, sirve para mejorar la resolución de fuentes en planta, ya que toma las derivadas verticales con mayor orden. En la Figura 4.11 se puede observar que la línea de costa, queda muy bien definida. En los cuatro mapas con diferentes continuaciones (anexo digital) el rasgo con mayor definición es el escarpe de Campeche con su continuación en el cañón de Campeche. La Figura 4.12 corresponde a la ASAM1 de la continuación ascendente a 10 km, se remarcó con color negro, los patrones que se alcanzan a visualizar, sin considerar el escarpe de Campeche. Es de resaltar la línea de costa, el patrón de anillos concéntricos del cráter Chicxulub y la anomalía de Isla Mujeres. Otro rasgo que se puede observar, es que en la zona de Holbox, el patrón de la ASAM1 tiene una orientación N—S.

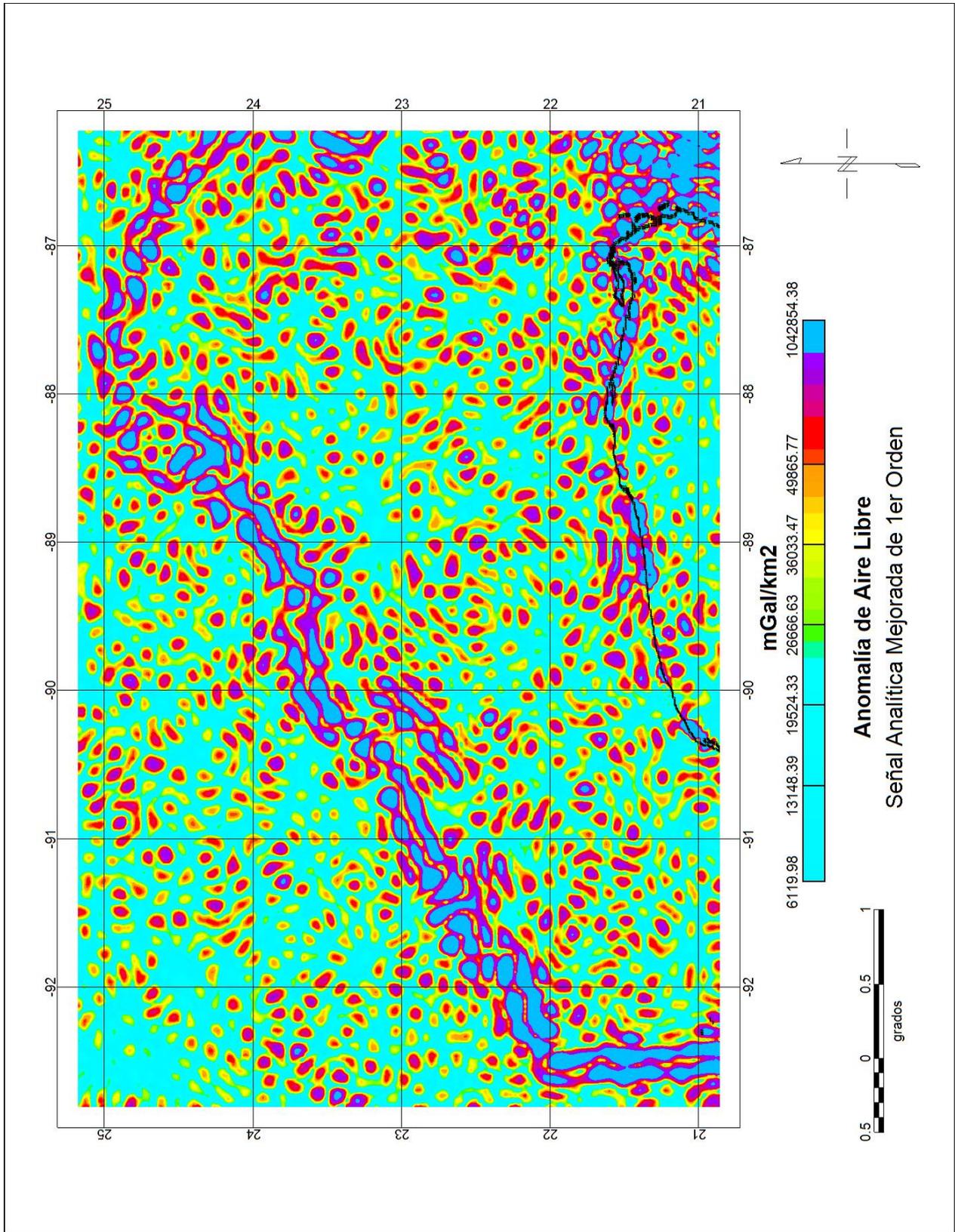


Figura 4. 11 Mapa de la señal analítica mejorada de 1er orden.

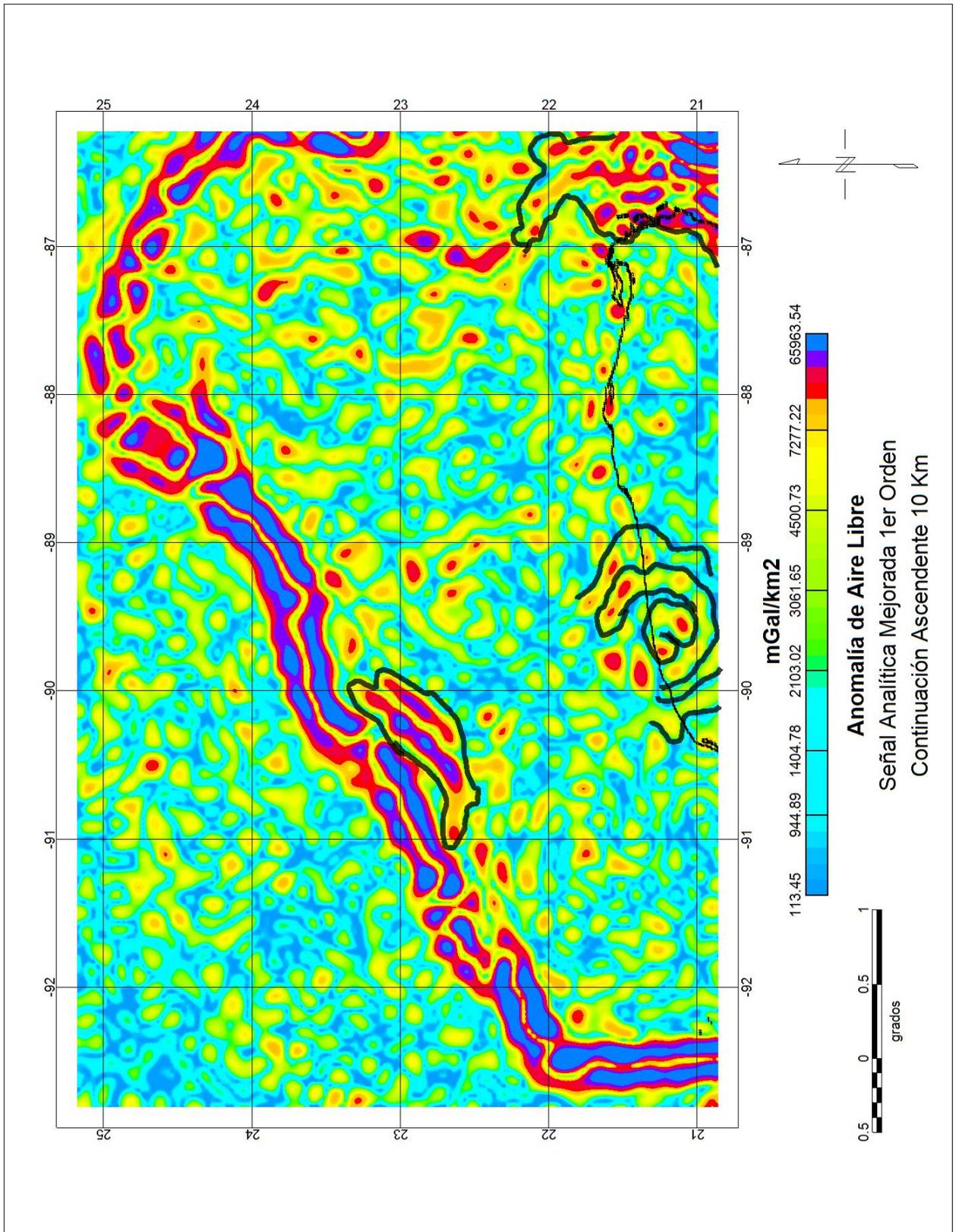


Figura 4. 12 Mapa de la señal analítica mejorada de 1er orden con continuación ascendente a 10 km.

Magnetometría

Anomalía de Campo Total

El mapa de anomalía de Campo Total (Figura 4.13) tiene un rango de -309—390 nT, se pueden observar diferentes rasgos a lo largo de la plataforma, entre ellos la serie de anomalías de baja longitud de onda del cráter de impacto de Chicxulub, en esta sección se encuentran los máximos y mínimos de la región, con valores que rondan entre los -300 nT y 400 nT. El bajo de Celestún tiene una orientación NW—SE y una extensión longitudinal aproximada de 400 km y 70 km de ancho. Al lado Este entre las longitudes 91.5° — 90° se puede observar la anomalía de Mérida, con un rango entre 0—50 nT. Al este de la longitud 88° , en lo que anteriormente se denominó la zona de Holbox; se puede ver una serie de bandas con orientación N—S, que se extienden a lo largo de la zona de estudio con ancho variable. La sección positiva muestra máximos de 150 y 200 nT y es coincidente con la anomalía de Lagartos en la sección de gravimetría. En la zona sureste existe un alto magnético coincidente con la anomalía de Isla Mujeres que se extiende hasta la latitud 23° N. Entre las longitudes 90° — 89° W se puede observar una anomalía con rasgos dipolares y de gran longitud de onda, es coincidente con la anomalía gravimétrica de Alacrán. Al norte de la latitud 24° se puede observar una anomalía con orientación NW—SE, de gran tamaño con características dipolares, coincidente con la sección más oriental del escarpe de Campeche y la terraza de Campeche. En los mapas de continuación ascendente a 2 km y 5 km (Figuras 4.14 y 4.15) se pueden observar los mismos patrones en las anomalías, aunque la ubicación de los máximos y mínimos es diferente. En el caso de la

anomalía Lagartos, se puede observar que con la continuación a diferentes alturas, el ancho, va disminuyendo, por lo que se puede esperar un cambio en la longitud de onda de las fuentes que están causando. Con ayuda del método de la amplitud de la señal analítica se podrá observar la naturaleza y extensión de las fuentes.

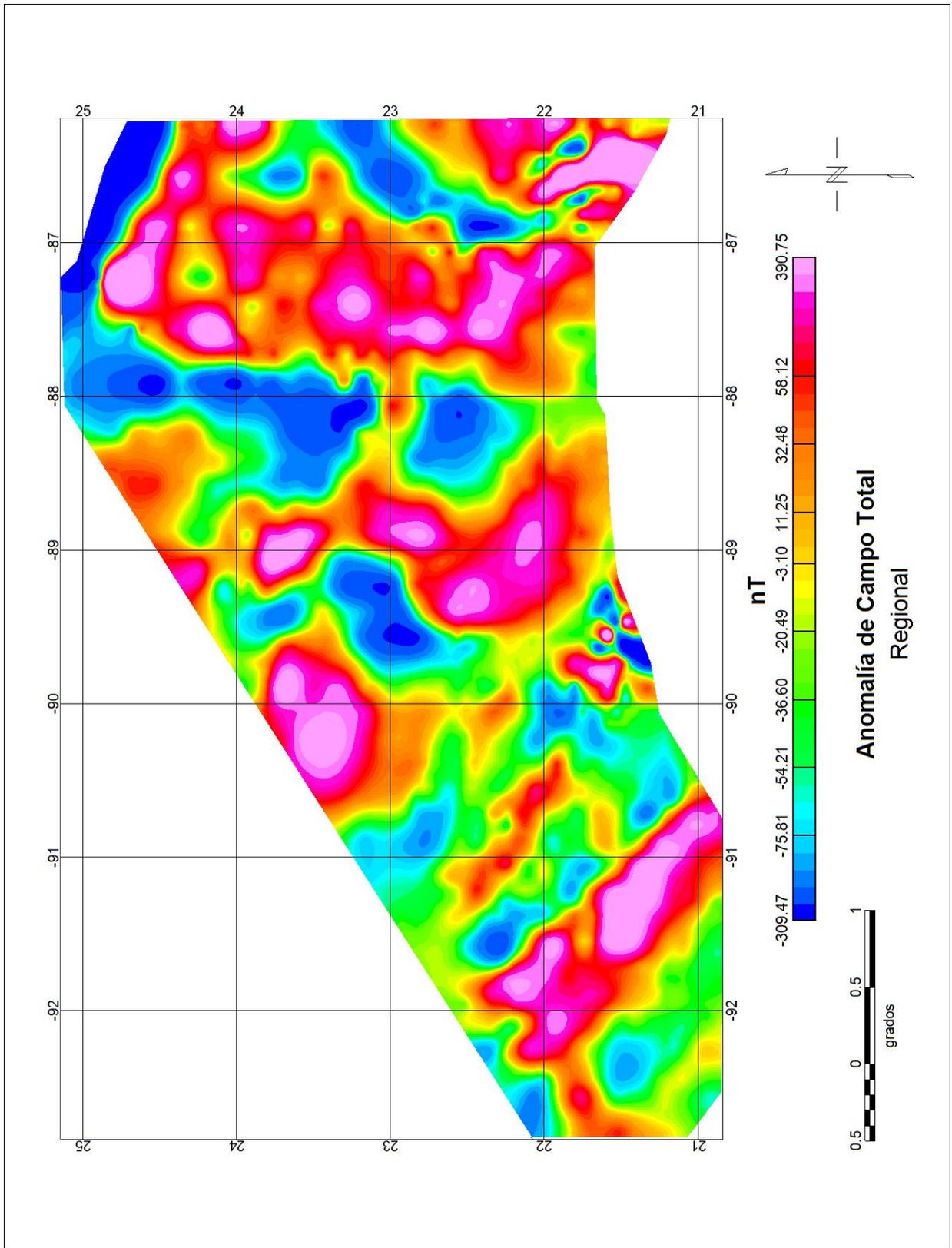


Figura 4. 13 Mapa de la anomalía de campo total.

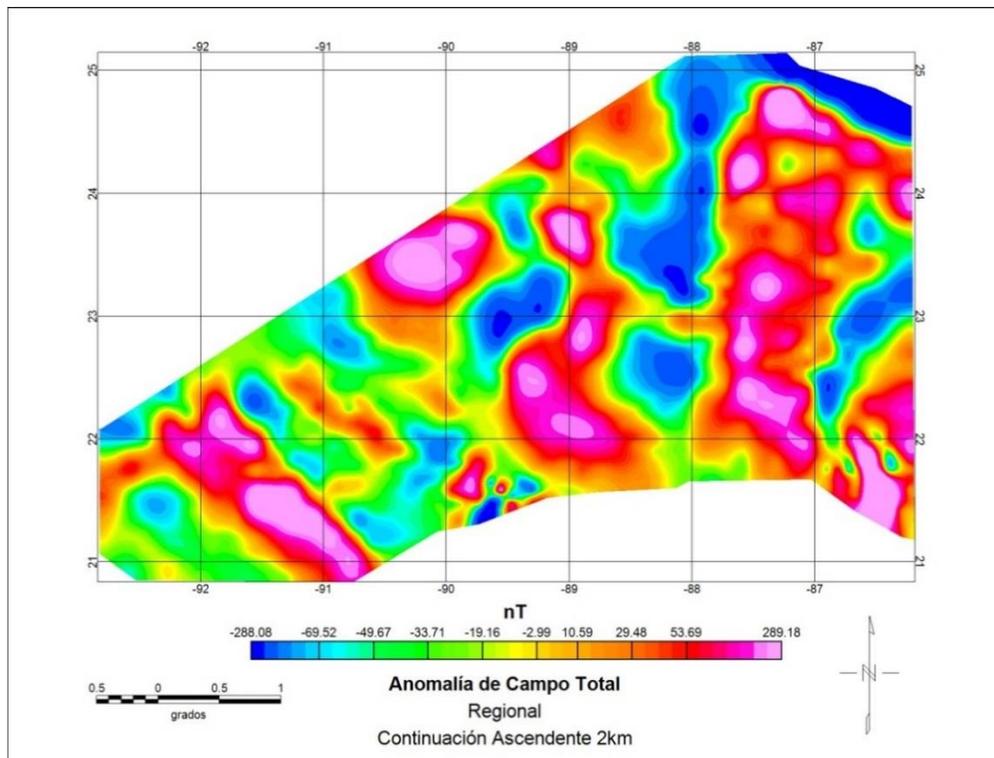


Figura 4. 14 Mapa de regional con continuación ascendente 2 km.

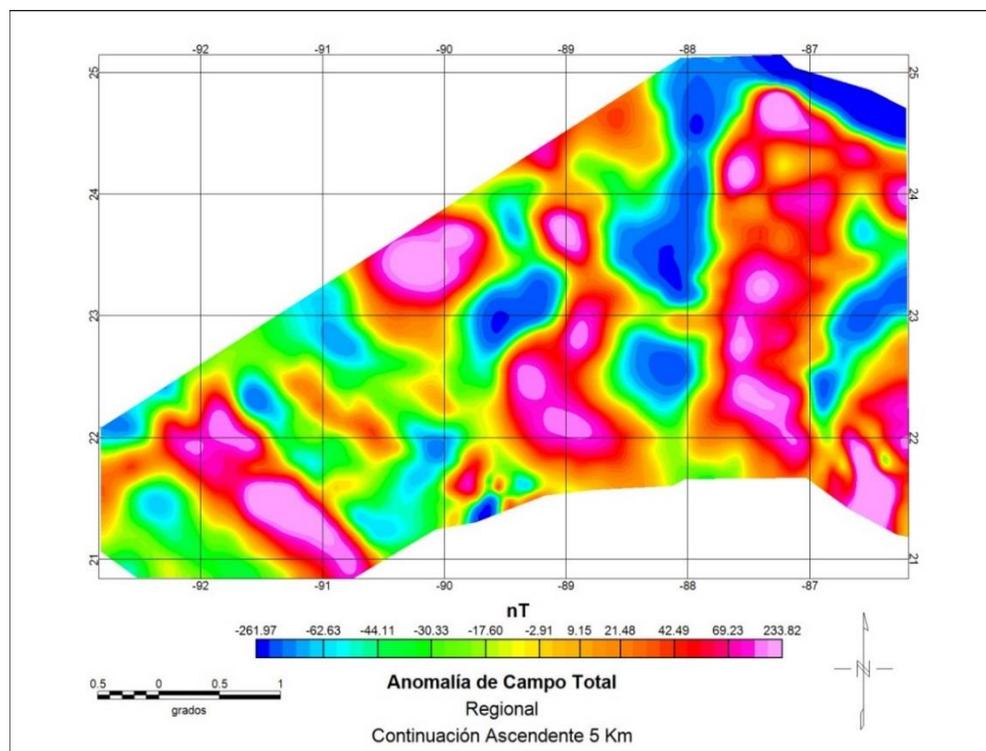


Figura 4. 15 Mapa de regional con continuación ascendente a 5 km.

Amplitud de la señal analítica

Este método fue de gran utilidad, ya que como ya se ha mencionado anteriormente, ya que es independiente del ángulo del vector de magnetización; es decir, sin importar la naturaleza dipolar de algunas de las anomalías se podrán observar las fuentes en su localización real.

A continuación se muestran los mapas de la amplitud de la señal analítica para la anomalía de campo total y sus continuaciones a 2 km y 5 km (Figuras 4.16, 4.17 y 4.18). En la Figura 4.16 se puede observar que la fuente de anomalías del cráter de impacto de Chicxulub, se imprime en toda su extensión, siendo coincidente con su análoga en los mapas de anomalía gravimétrica, también es remarcable que a diferencia de los mapas de la ASA en gravimetría, esta fuente no se pierde con la continuación ascendente. En la sección más occidental del mapa de la continuación ascendente de 2 km (Figura 4.16), se puede observar una fuente con forma “cuadrada” que correlaciona con la anomalía gravimétrica de Banco Nuevo, al observar su respuesta en el mapa de anomalía de campo total, se puede discernir su naturaleza dipolar y traslape con fuentes de mayor longitud de onda ubicadas al Este. La ASA muestra que el alto de Celestún tiene como fuente una estructura alongada con orientación NW—SE, de forma regional se puede observar que esta fuente es paralela a la anomalía gravimétrica en forma de Y provocada por el impacto de Chicxulub que se extiende hacia la parte terrestre de la plataforma. Otro rasgo que tiene esta misma característica, pero tiene menor longitud de onda, es la anomalía de Mérida, que de igual forma, presenta una orientación NW—SE. En la región central del área de estudio, la anomalía de

Alacrán tiene fuentes de gran tamaño y longitud de onda con naturaleza dipolar. En la parte Norte, se puede ver una orientación E—W coincidente con la morfología del escarpe de Campeche en la Figura 4.18. En la zona de Holbox, entre las longitudes 88° — 87° W se pueden distinguir fuentes de gran longitud de onda que se mantienen presentes en la continuación a 5 km, asimismo fuentes menores. No obstante la orientación N—S, se mantiene constante a lo largo de región. En el borde Norte de la plataforma, se observa un origen de la anomalía de gran tamaño que coincide con el escarpe de Campeche en su parte oriental, dicha fuente se mantiene inalterable en las continuaciones ascendentes. En la parte sur de la zona de estudio, la anomalía de Isla Mujeres se muestra como la superposición de fuentes de longitud de onda baja y grande a lo largo de su extensión, teniendo el máximo entre las latitudes 21.2° — 22° N; esta anomalía tiene una clara correlación con su análogo en los mapas de gravimetría.

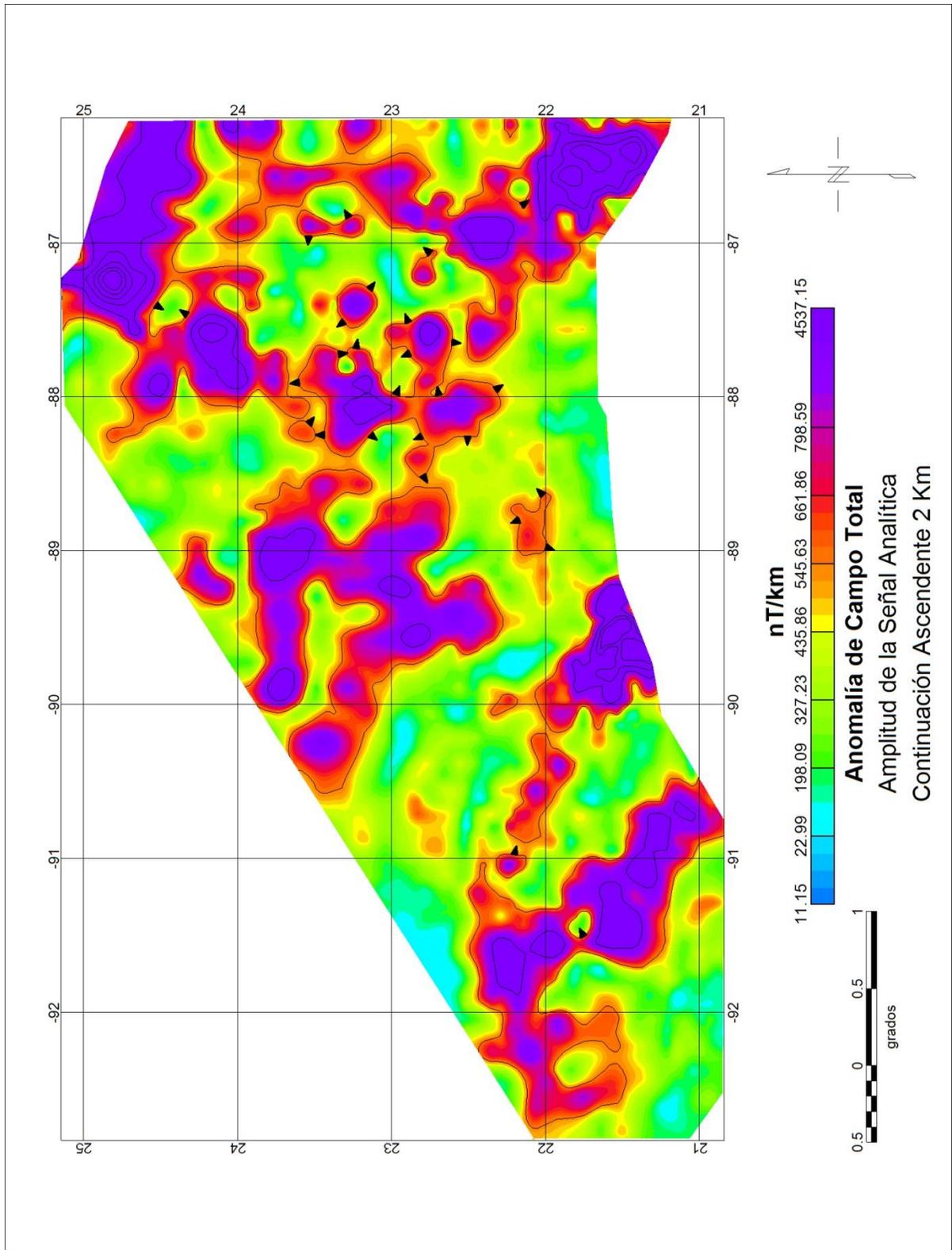


Figura 4. 16 Mapa de amplitud de la señal analítica con continuación ascendente a 2 km.

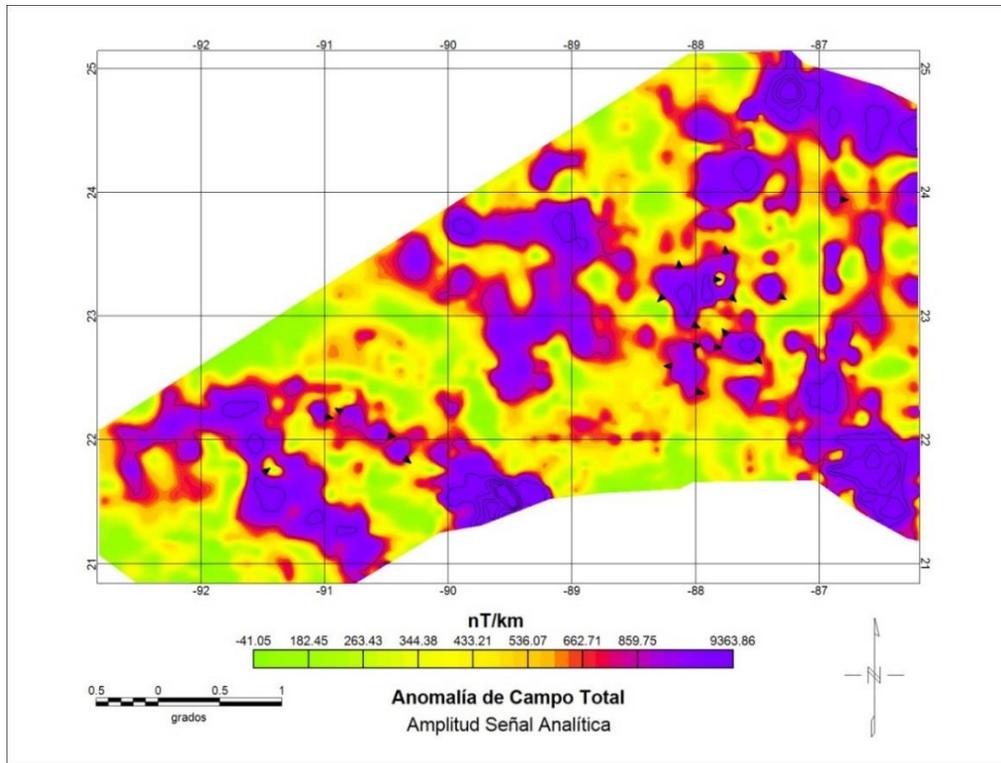


Figura 4. 17 Mapa de amplitud de la señal analítica.

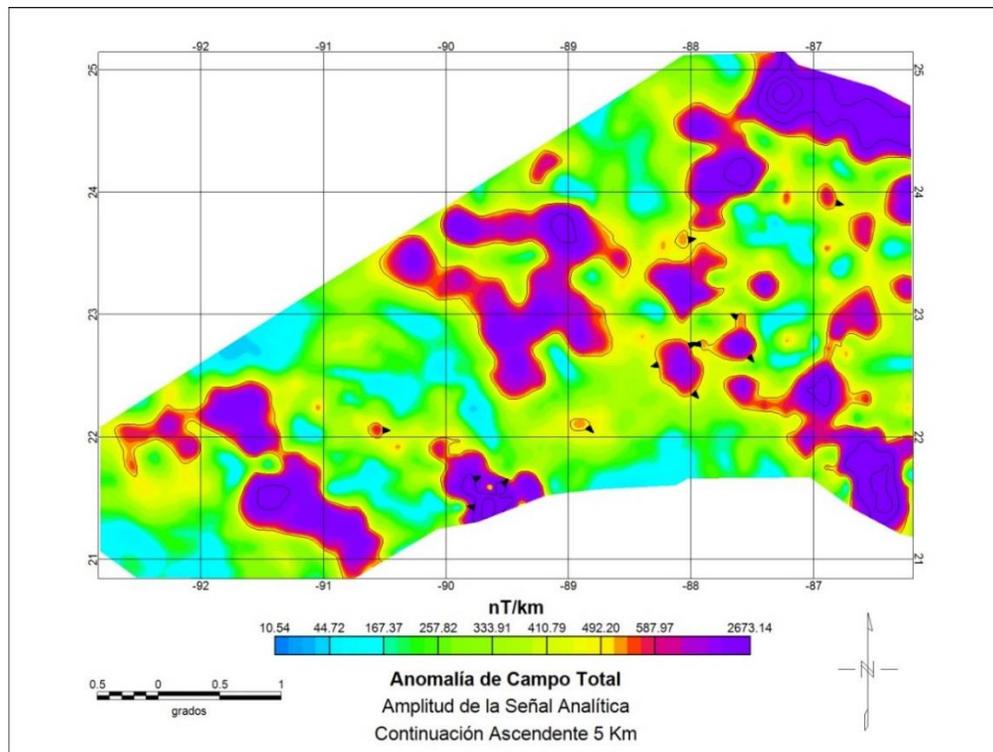


Figura 4. 18 Mapa de amplitud de la señal analítica con continuación ascendente a 5 km.

Gradiente Horizontal de la Señal Analítica

A continuación se muestran las imágenes del gradiente horizontal sobre la señal analítica. Se aplicó este flujo de procesamiento ya que como se ha explicado anteriormente el algoritmo de la ASA tiende a mostrar los máximos sobre las fuentes de las anomalías, por su parte el gradiente horizontal es un método de delimitación de bordes en planta. De su combinación se observarán la estimación de los bordes de las fuentes, sin tomar en cuenta la naturaleza dipolar de las mismas.

En la Figura 4.19 se pueden observar dos patrones principales de anomalías (Zona Holbox y Mérida), a partir de la longitud 88°W , los bordes son coincidentes con fuentes de menor longitud de onda y una orientación N—S, con excepción de los bordes de la fuente en la anomalía de Isla Mujeres y en el norte en la Terraza de Campeche. Al Oeste, se define el borde de la anomalía de Chicxulub con discontinuidades en forma alargada hacia el norte con extensión aproximada de 50 km que coincide con la forma de herradura en la anomalía de aire libre. El borde de las fuentes magnéticas de Celestún se puede diferenciar, con una longitud lateral aproximada de 70 km.

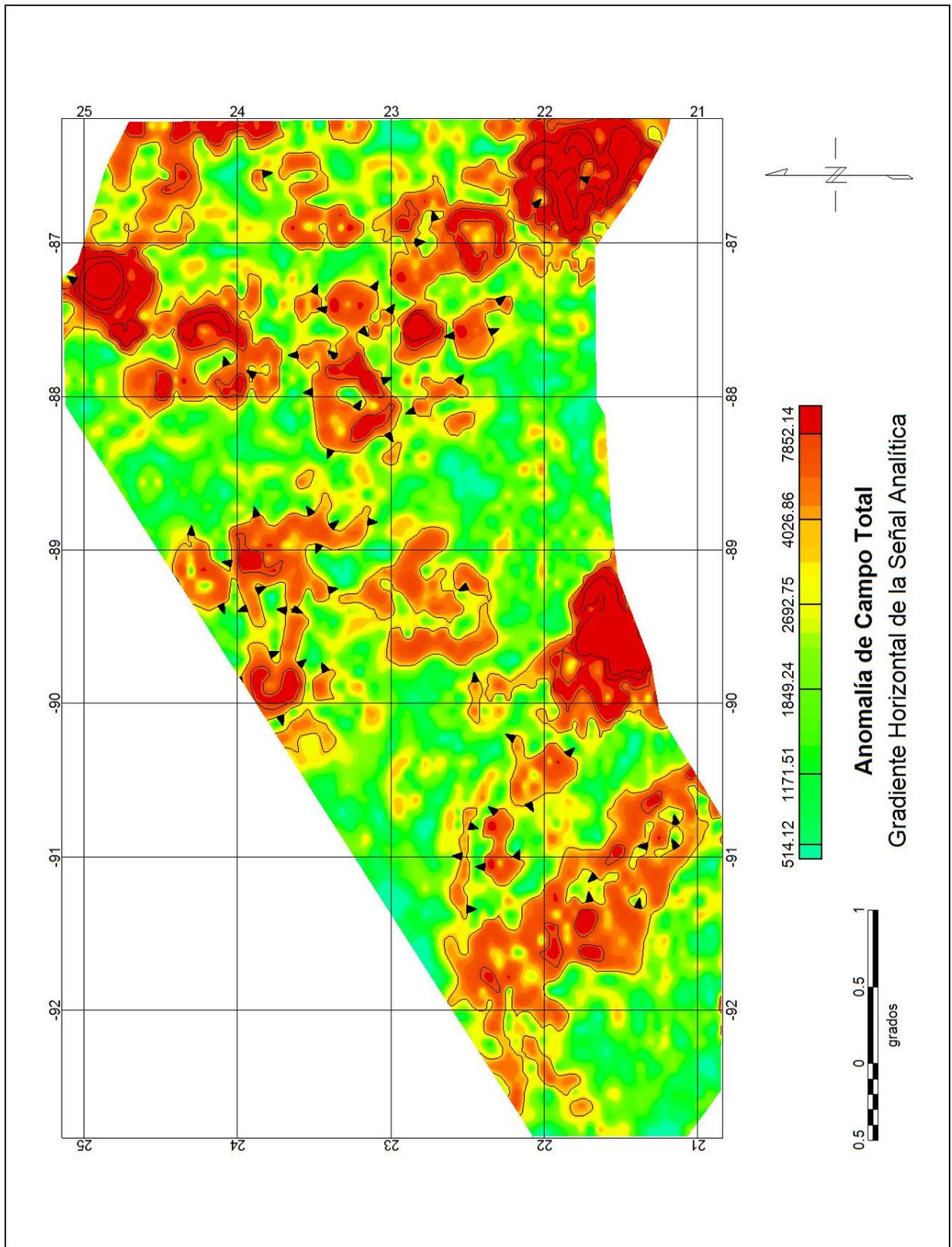


Figura 4. 19 Mapa de gradiente horizontal de la señal analítica.

5. Discusión de los resultados

A partir de la descripción de las anomalías de campo potencial en la plataforma carbonatada de Yucatán, se decidió dividir la región en dos zonas, con base en la orientación y longitud de onda observadas. La primera corresponde a la parte occidental desde la longitud $88^{\circ}30'W$ hasta $93^{\circ}W$. Se le otorgó el nombre Zona Mérida, y en ella se puede observar con ambos métodos geofísicos, las anomalías del cráter de impacto de Chicxulub, Alacrán y Banco Nuevo. En la gravimetría se pueden discernir la de Cayo Arenas y Escarpe de Campeche. En la magnetometría, el alto de Celestún. La segunda región es la Zona Holbox y abarca de la longitud $88^{\circ}30'W$ a $86^{\circ}W$. En esta área con ayuda de ambos métodos se pueden observar las anomalías de Lagartos e Isla Mujeres. En la gravimetría, la terraza de Campeche y la continuación suavizada hacia el Este del Escarpe de Campeche. En la magnetometría la fuente dipolar de la Terraza de Campeche.

El análisis de las anomalías gravimétricas permite reconocer diversas estructuras con características particulares. El Escarpe de Campeche es uno de ellos, en los contornos batimétricos se reconoce como un “escalón” en el borde la plataforma, marcando el cambio abrupto entre la corteza continental y la corteza oceánica formada hace más de 160 Ma, durante la apertura del Golfo de México. Sin embargo, existen discontinuidades a lo largo del escarpe, un ejemplo es la anomalía gravimétrica del Cayo Arenas que es coincidente con la tendencia de las isóbatas, este bajo gravimétrico puede estar causado por el impacto de Chicxulub hace 65.5 Ma, es decir, como efecto del fallamiento y desplazamiento de material

de forma masiva durante el evento. En la zona de Holbox, la terraza de Campeche puede estar asociada a fallamiento normal ocurrido durante la evolución de la placa del Caribe, debido a que se puede observar una correlación con la pendiente batimétrica; ésta a su vez, tiene una orientación N—S y un cambio en la profundidad de 60 m a 200 m.

El alto de Celestún (magnetometría) en la zona Mérida, se puede interpretar como una anomalía regional que podría estar asociada a una penetración de material proveniente del manto durante la migración del bloque de Yucatán, en la apertura del Golfo de México.

En el extremo Noroeste de la zona de estudio, se encuentra la anomalía dipolar de la terraza de Campeche. Con base en la descripción del procesamiento de los datos magnéticos, se puede concluir que este rasgo tiene una fuente de carácter regional, con una extensión máxima en dirección E—W de 160 km. Para realizar una interpretación completa es necesario analizar el total de su extensión.

En la sección oeste del área de estudio, se puede distinguir con ambos métodos potenciales y a diferentes alturas de continuación ascendente, la anomalía de Banco Nuevo, ésta no presenta un patrón de correlación entre las isóbatas y la anomalía de aire libre. Tiene una extensión en planta de 120 km por 140 km y no se observa una orientación preferencial. Con el método de la amplitud de la señal analítica para datos magnéticos, se puede observar que tiene una fuente de gran extensión.

En la parte central de la plataforma, entre las longitudes 88.5° — 89.75° W, la anomalía de Alacrán presenta un alto gravimétrico en el mapa de anomalía de aire libre y con la amplitud de la señal analítica de la anomalía de campo total; se puede observar que las fuentes tienen un carácter regional y de gran longitud de onda, debido a que al aplicar la continuación ascendente a diferentes alturas, este rasgo se mantiene inalterable.

En la parte sur de la plataforma en la zona Mérida, se encuentra el cráter de impacto de Chicxulub. Este rasgo de gran importancia geológica, está caracterizado por tener una anomalía gravimétrica en forma de Y o herradura, que se extiende a lo largo de las latitudes 22° — 19.5° N y la existencia de un patrón de anillos concéntricos, con el centro ubicado en la línea de costa al Oeste del puerto de Progreso en Yucatán. Posterior al evento de impacto, la cavidad fue rellenada con depósitos cenozoicos, formando una especie de cuenca a lo largo de la estructura. La firma magnética del cráter, está dada por una serie de bajos y altos, de poca extensión (decenas de kilómetros) que no se difuminan con el método de la continuación ascendente a diferentes alturas. Es remarcable mencionar que en la amplitud de la señal analítica de la anomalía de campo total, se puede observar la extensión real del cráter. A partir de dicho análisis se establece que la anomalía causada por el impacto es de carácter cortical.

En la zona de Holbox, entre las longitudes 88° — 87° W, se presenta una anomalía tanto magnética como gravimétrica con orientación N—S y un ancho aproximado de 80 km. Con ayuda del procesamiento de los datos, se puede distinguir que está

provocado por la superposición de fuentes de mediana longitud de onda, pero un patrón regional muy marcado.

En el límite oriental del área de estudio, se encuentra la anomalía de Isla Mujeres, este atributo tiene una tendencia muy marcada N—S, y valores máximos en cada uno de los métodos. Para realizar la interpretación de esta zona es vital observar cual es la tendencia regional en la vecindad de dicha anomalía. En el mapa publicado por la Geological Society of America (1991), se puede ver que la sección Este del bloque de Yucatán, tiene una tendencia SW—NE, que se puede extender desde Cuba hasta el estado de Chiapas y que se desarrolló durante la evolución de la placa de Caribe. Es por esta razón, que la anomalía de Isla Mujeres, se puede delimitar y resaltar con todos los procesos y a diferentes alturas de continuación ascendente. De la misma forma se puede asociar a este origen, la anomalía gravimétrica de la Terraza de Yucatán que representa una discontinuidad en el escarpe de Campeche.

A partir de la discusión de los datos, se puede concluir que la plataforma carbonatada de Yucatán presenta variaciones a nivel cortical en toda su extensión. De igual forma se pueden distinguir dos regiones principales, la zona Mérida, con anomalías de gran longitud de onda y orientación NW—SE y la zona Holbox de fuentes con orientación principal N—S y longitudes de onda mediana y grande asociadas a fallamiento lateral.

Es posible inferir que la plataforma de Yucatán de edad Mesozoica, tenga su origen en la acreción de dos terrenos corticales con diferentes características, lo

que provocaría las heterogeneidades en la zona. Otra posible explicación, es que durante la apertura del Golfo de México y el desplazamiento del bloque de Yucatán, se hayan producido discontinuidades tales que muestren la configuración actual.

Para poder comprobar alguna de las hipótesis antes mencionadas, se recomienda realizar algún método analítico como la deconvolución de Euler o el análisis de pendientes a partir del espectro radial de potencia, para la estimación de la profundidad de las fuentes, y/o, realizar dos o más modelos con el método de Talwani, en las dos zonas antes descritas, para obtener espesores aproximados de las unidades estratigráficas.

Existe información de los pozos perforados a lo largo y ancho de la región (Urrutia *et al.*, 2011); no obstante solo dos han alcanzado el basamento y no se puede extrapolar esta profundidad a toda la península sin cometer errores. Es vital en el estudio de la Plataforma, realizar una integración de todos los datos geofísicos-geológicos disponibles (pozos, secciones sísmicas, geoquímica, comportamiento reológico) para lograr descifrar este problema geológico.

6. Conclusiones

- ◆ La plataforma carbonatada de Yucatán presenta anomalías gravimétricas y magnéticas de diferentes longitudes de onda; a pesar de ser un elemento tectónico pasivo en el Golfo de México.

- ◆ Existen dos zonas en la plataforma con anomalías magnéticas y gravimétricas diferenciadas por la orientación y la longitud de onda.

- ◆ El adecuado procesamiento y la interpretación conjunta de métodos de gravimetría, magnetometría y batimetría fueron de gran conveniencia para la caracterización de discontinuidades a nivel cortical en la plataforma carbonatada de Yucatán.

- ◆ Los métodos de procesamiento para datos potenciales: continuación ascendente, amplitud de señal analítica, gradiente horizontal, amplitud de la señal analítica mejorada de primer orden y su combinación, son de gran utilidad para la caracterización de anomalías en la plataforma carbonatada de Yucatán.

- ◆ Las anomalías gravimétricas y magnéticas de Alacrán, Banco Nuevo y el cráter de impacto Chicxulub están asociadas a discontinuidades a nivel cortical debido a su correlación en ambos métodos y a que se mantienen inalteradas en los mapas de continuación ascendente de 10 y 5 km en gravimetría y magnetometría, respectivamente.

- ◆ La anomalía de Isla Mujeres en la zona de Holbox, es de naturaleza cortical y se puede asociar a fallamiento lateral ocurrido durante la evolución de la placa del Caribe.

- ◆ Las anomalías gravimétricas de Cayo Arenas y la Terraza de Campeche, tienen correlación con las características de la batimetría; por lo que su origen puede estar asociado a fallamiento normal.

- ◆ El escarpe de Campeche es la frontera que divide la corteza continental del bloque de Yucatán y la corteza oceánica del Golfo de México

- ◆ La anomalía Lagartos tiene un carácter regional con correlación en ambos métodos potenciales y es la superposición de fuentes con diferentes longitudes de onda.

7. Bibliografía

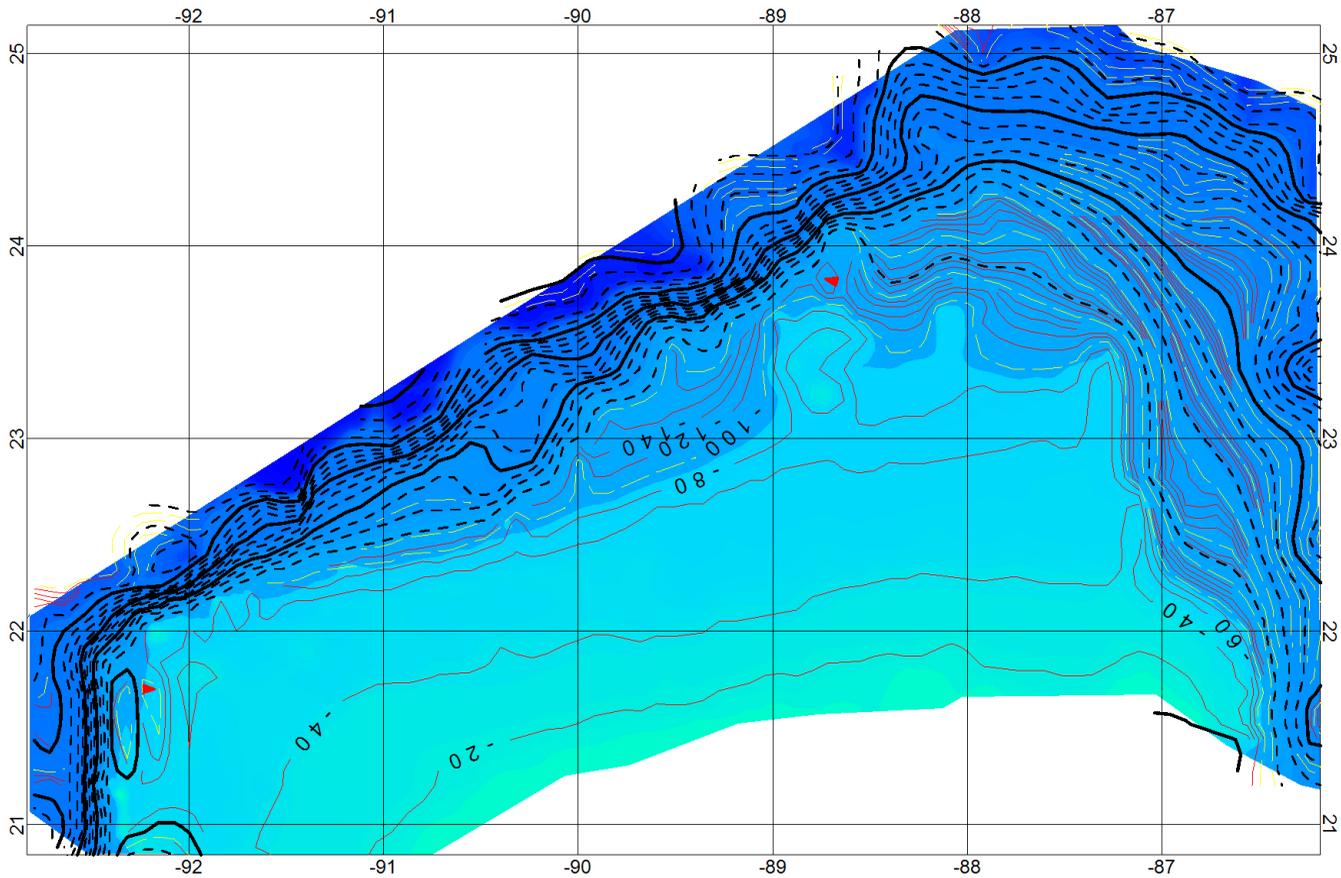
- Abdeslem-García, Juan (1990). Spectral Analysis and Ridge-Regression of Magnetic Anomalies from the Northern Continental Margin of the Yucatan Peninsula. Mexico. Tesis de Doctorado (Septiembre de 1990). University of Oregon.
- Alvarado-Omaña, Miguel Angel (1986). Gravity and crustal structure of the South-central Gulf of Mexico, The Yucatan Peninsula, and adjacent areas, from 17°N to 26°N and from 84°W to 93°W. Tesis de Maestría (Junio de 1986). University of Oregon.
- Álvarez, L. W., Álvarez W., Asaro F., Michel H.V., 1980, Extraterrestrial cause for the Cretaceous–Tertiary extinction. *Science*, 208, P. 1095–1108.
- Blakely, R. J. (1996). Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge University Press, U. K.
- Bahlburg, H., Weiss, R., Wünnemann, K. (2010). Low energy deposition in the Chicxulub crater during the impact to post-impact transition. *Earth and Planetary Science Letters*.
- Bonvalot, S., Balmino, G. and Briais, A. (2012). Spherical harmonic modelling to ultra-high degree of Bouguer and isostatic anomalies. *Journal of Geodesy*. July 2012, Vol. 86, Issue 7, P. 499-520.
- Christopher, G., Kendall, Schlager, W. (1981). Carbonates and relative changes in sea level. *Marine Geology*. Vol. 44. P. 181-212.
- Fairhead, J. D., Odegard, M. E. (2001). Satellite-derived gravity having an impact on marine exploration. *The Leading Edge*. August 2001, P. 873-876.
- Green, C. M., Maus, S. (1998). Satellite-derived gravity: Where we are and what's next. *The Leading Edge*. January 1998. P. 77-79.
- Gulick, S. P. S., Christeson, G.L., Barton, P. J., Grieve, R.A.F., Morgan, J.V., Urrutia-Fucugauchi, J. (2014). Geophysical characterization of the Chicxulub impact crater. *Reviews of Geophysics*. Vol. 51 (2013), P. 31 – 52.

- Hildebrand A. R., Penfield G.T., Kring D.A., Pilkington M., Camargo-Zanoguera A., Jacobsen S.B., Boynton W.V., 1991, Chicxulub Crater: A possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatan Peninsula, Mexico. *Geology*. 19, 867-871.
- Hildebrand, A. R., Pilkington, M., Connors, M., Ortiz-Aleman, C., Chavez, R. E. (1995). Size and structure of the Chicxulub crater revealed by horizontal gravity gradients and cenotes. *Nature*. Vol. 376, (August 1995).
- Hsu, S. K., Sibuet, J. C., Shyu, C. T. (1996). High-resolution detection of geologic boundaries from potential-field anomalies: An enhanced analytic signal technique. *Geophysics*. Vol. 61, No. 2 (March-April 1996), P. 373 – 386.
- Li, Xiong. (2006). Understanding 3D analytic signal amplitude. *Geophysics*. Vol. 71 No. 2, P. L13-L16.
- Lopez Ramos, E. (1973). Geological summary of the Yucatan Peninsula. *Boletín Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*. Vol. 25, No. 1 – 3, (1973), P. 257 – 281.
- Nabighian, M. N. (1972). The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*. Vol. 37, No. 3 (June 1972), P. 507 – 517.
- Nava-Flores, Mauricio (2010). Modelado por métodos potenciales de estructuras salinas inferidas por sismología de reflexión. Tesis de Maestría (Enero de 2010). Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM.
- Ness, G., Dauphin, P., Abdeslem-García, J., Alvarado-Omana, M.A. (1991). Bathymetry and Gravity and Magnetic anomalies of the Yucatan Peninsula and adjacent areas. *Geological Society of America*. Map and chart series.
- Padilla-Sánchez, Ricardo (2007). Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Tomo 59, Núm. 1, 2007, P. 19-42

- Paull, Charles K., Caress, David W., Gwiazda, Roberto., Urrutia-Fucugauchi, Jaime., Rebolledo-Vieyra, Mario., Lundsten, Eve., Anderson, Krystle., (1995). Cretaceous – Paleogene boundary exposed: Campeche Escarpment, Gulf of Mexico. *Marine Geology*. Vol. 357 (2014), P. 392 – 400.
- Penfield, G. T., A. Camargo-Zanoguera. (1981) Definition of a major igneous zone in the central Yucatán platform with aeromagnetism and gravity, en *Technical Program, Abstracts and Bibliographies, 51st Annual Meeting*, p.37, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma
- Pilkington, Mark., Hildebrand, Alan R. (1994). Gravity and magnetic field modeling and structure of the Chicxulub Crater, Mexico. *Journal of geophysical research*. Vol. 99, No. E6 (June 1994), p. 13, 147 – 13, 162.
- Pindell, J., Kennan, L., (2000). Putting it all together again Pt. 4. Geophysical corner, *Explorer* (October, 2000).
- Pindell, J., Kennan, L., (2000). Building quantitative plate kinematic frameworks for regional exploration assessments. Pt. 3. Geophysical corner, *Explorer* (August, 2000).
- Pindell, J., Kennan, L., (2000). Kinematics a key to unlocking plays. Pt. 2. Geophysical corner, *Explorer* (July, 2000).
- Pindell, J., Kennan, L., (2000). Regional plate kinematics: Arm waving, or underutilized exploration tool? -Kinematic analysis: the next step. Pt. 1. Geophysical corner, *Explorer* (June, 2000).
- Pindell, James L. (1994). Evolution of the Gulf of Mexico and the Caribbean. *Caribbean Geology: An Introduction*. P. 13 – 38.
- Roest, W. R., Verhoerf, J., and Pilkington, M. (1992). Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*. Vol. 57, No. 1 (January 1992), p. 116 – 125.
- Spector, A. Grant, F. S. (1979). Statistical Models for Interpreting Aeromagnetic Data; *Geophysics*, Vol. 35, No. 2 (April, 1979), P. 293 – 302.
- Sharpton, V.L., et al, (1992) New links between the Chicxulub impact structure and the Cretaceous/Tertiary boundary, *Nature*, 359, 819-821.

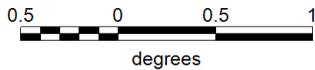
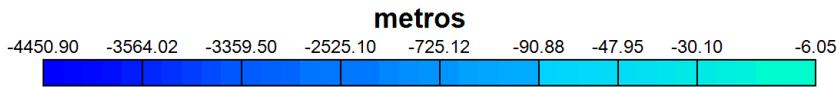
- Sharpton, V.L. et al., (1993) Chicxulub multiring impact basin: Size and other characteristics derived from gravity analysis, *Science*, 261, 1564-1567.
- Sheridan, R. Geophysical recognition and structure of carbonate platforms and platform edges on passive continental margins. (1981). *Marine Geology*. Vol. 44. P. 171-180.
- Urrutia-Fucugauchi, J., L. Marin, A. Trejo-Garcia, 1996. UNAM scientific drilling program of Chicxulub impact structure - Evidence for a 300 kilometer crater diameter, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 1565-1568, 1996.
- Urrutia-Fucugauchi, Jaime, Camargo-Zanoguera, Antonio., Pérez-Cruz, Ligia., Pérez-Cruz, Guillermo. (2011). The Chicxulub multi-ring impact crater, Yucatan carbonate platform, Gulf of Mexico. *Geofísica Internacional*. Vol. 50, No. 1, (December 2010), P. 99 – 127.
- Verduzco, B., Fairhead, J. D., MacKenzie, C. (2004). New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*. February 2004. P. 116-119.
- Weidie, A. E., (1985). *Geology of Yucatan Platform*. University of New Orleans.
- National Centers for Environmental Information, Marine Trackline Geophysical Data, Recuperado de <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/geodas/trackline.html>
- International Gravimetric Bureau, World Gravity Map model. Recuperado de <http://bgi.omp.obs-mip.fr/data-products/Grids-and-models/wgm2012>

8. Anexo Digital

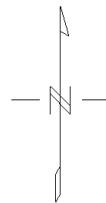


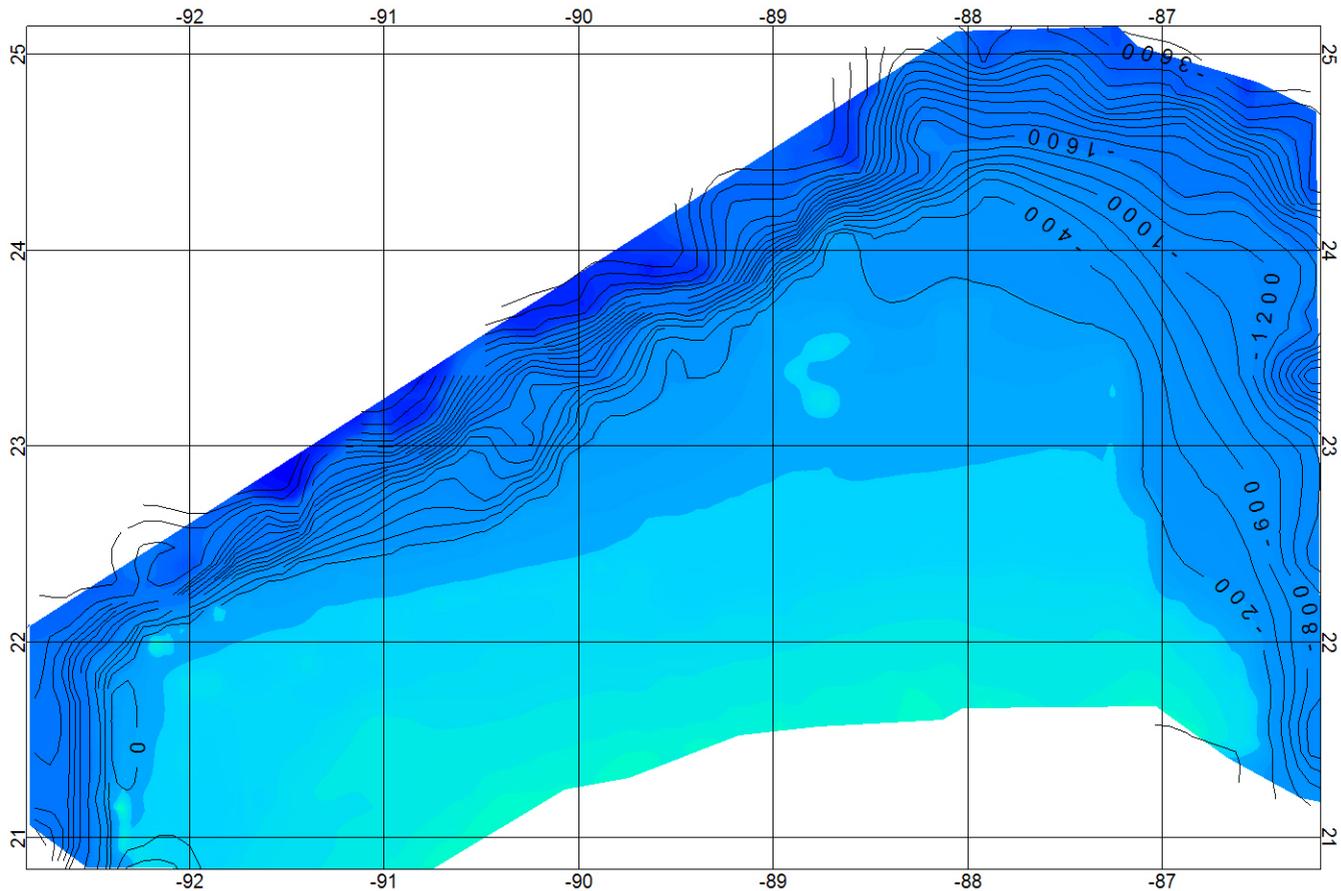
Isobatas (m)

- 20
- 100
- 250
- 1000



Batimetría

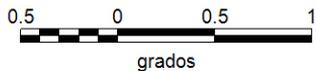




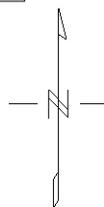
Isóbatas cada 200 m

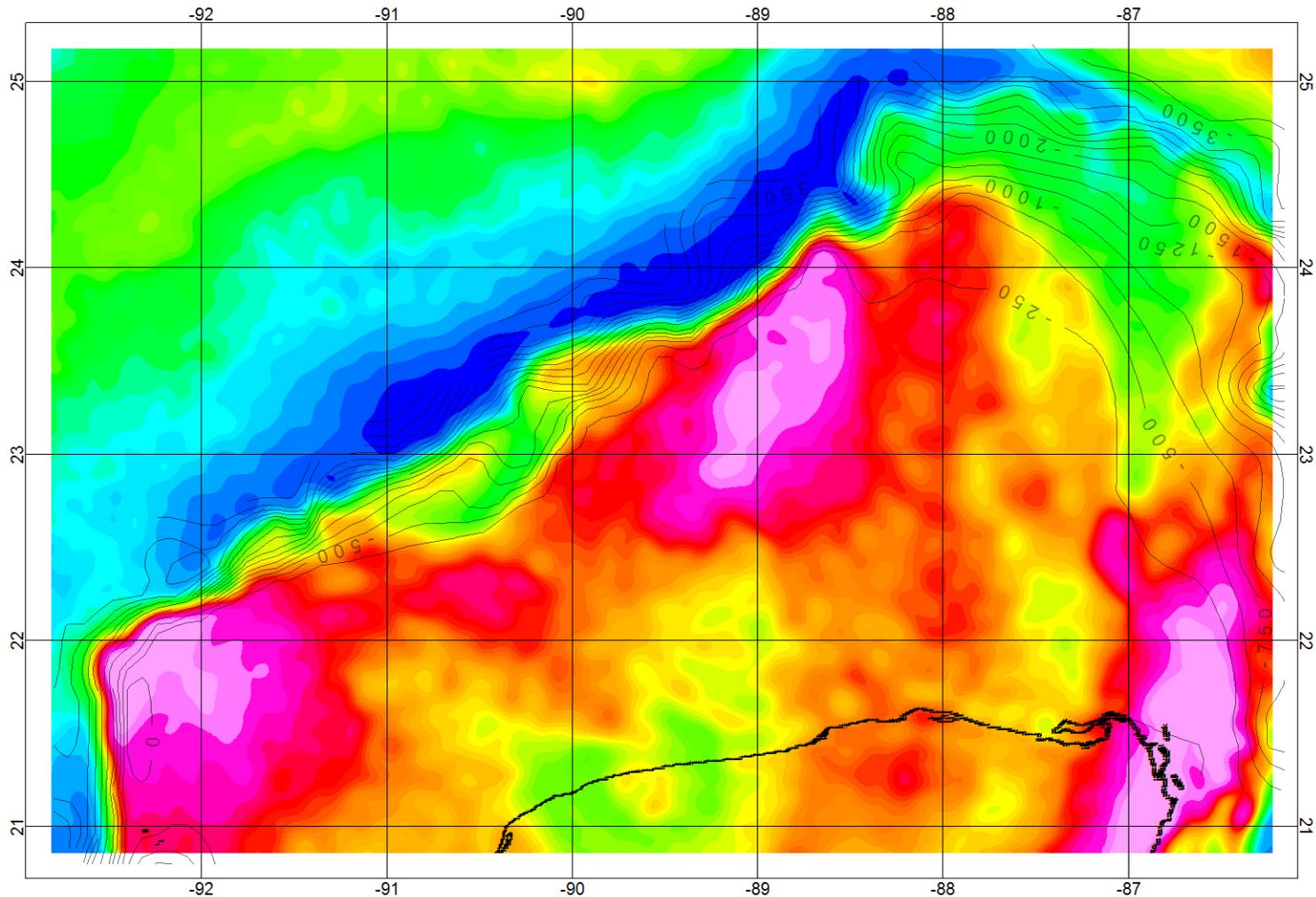
metros

-4450.90 -3564.02 -3359.50 -2525.10 -725.12 -90.88 -47.95 -30.10 -6.05

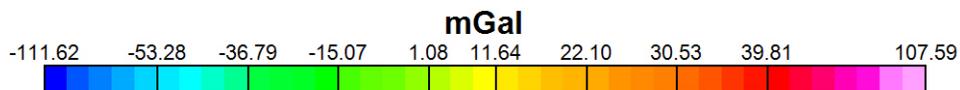
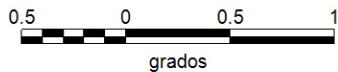


Batimetría

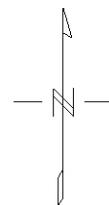


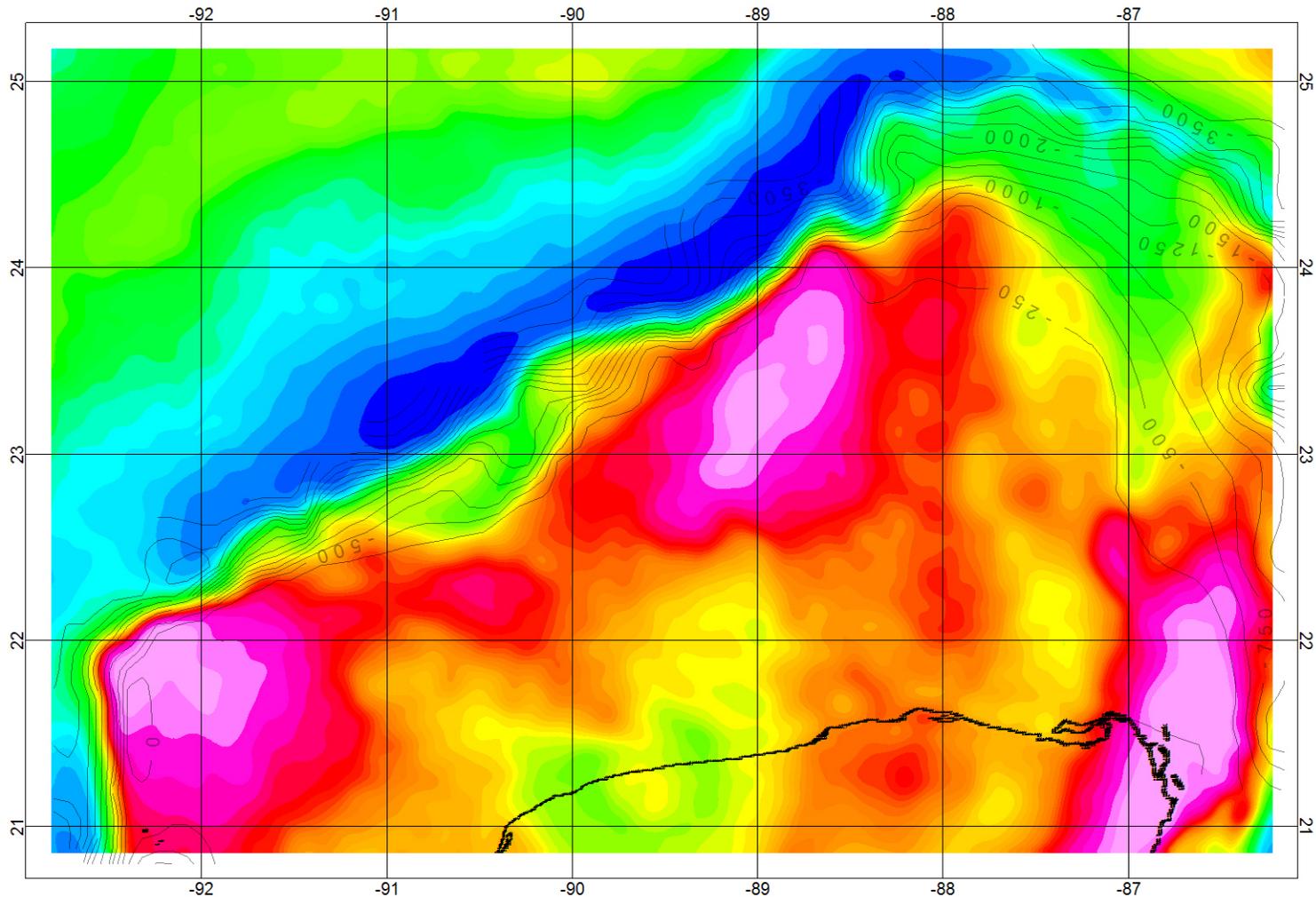


Isóbatas cada 250 m

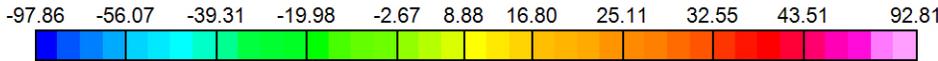


Anomalia de Aire Libre

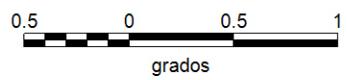




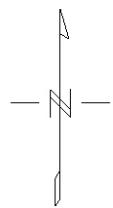
mGal

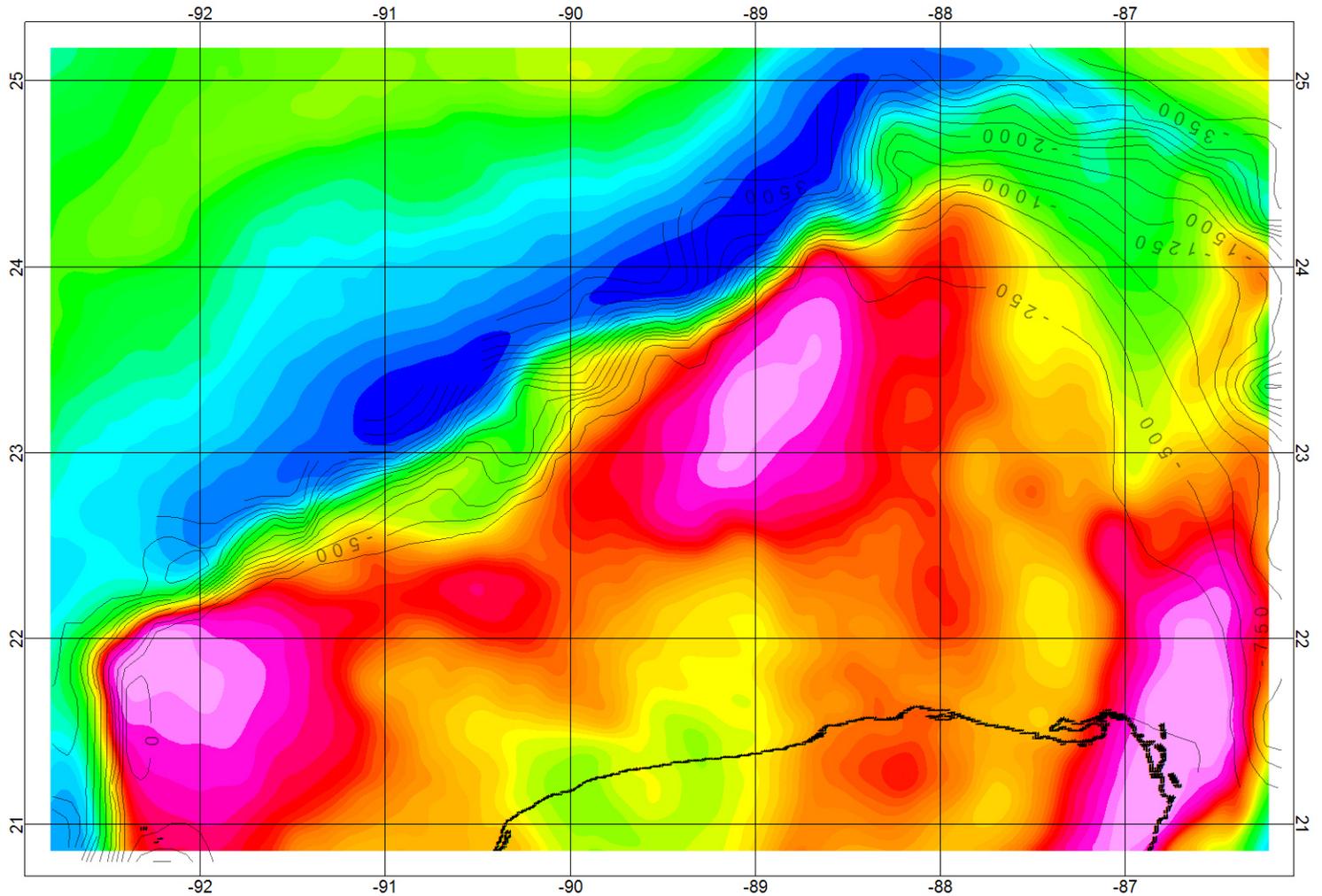


Isóbatas cada 250 m



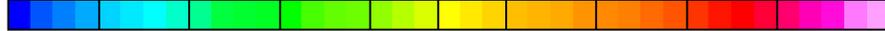
Anomalia de Aire Libre
 Regional
 Continuación Ascendente 3 Km



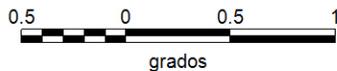


mGal

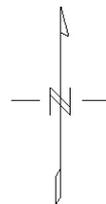
-88.14 -52.92 -37.08 -19.27 -3.31 8.37 16.32 24.15 30.87 40.95 83.11

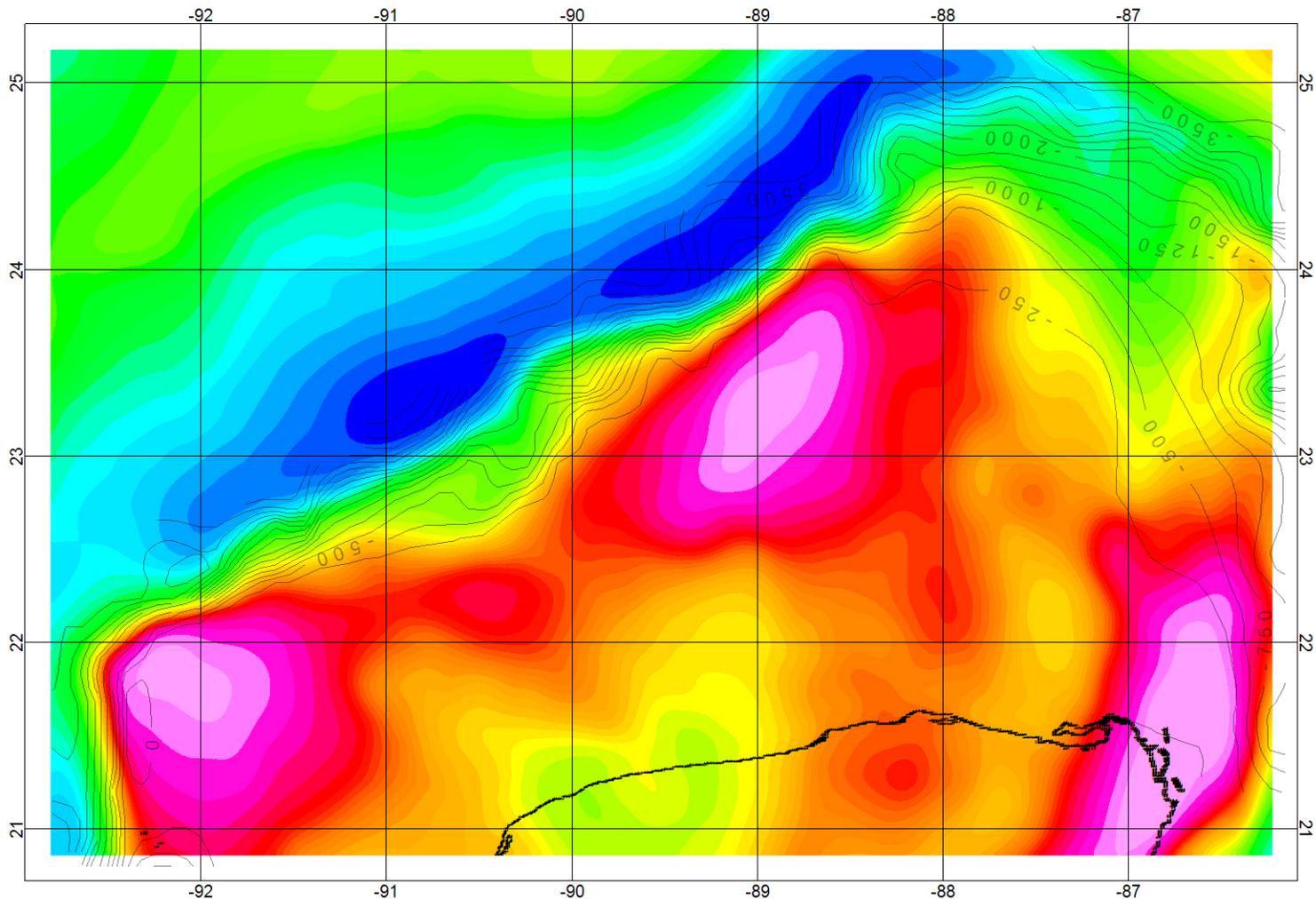


Isóbatas cada 250 m

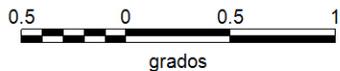


Anomalia de Aire Libre
Regional
Continuación Ascendente 6 Km

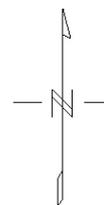


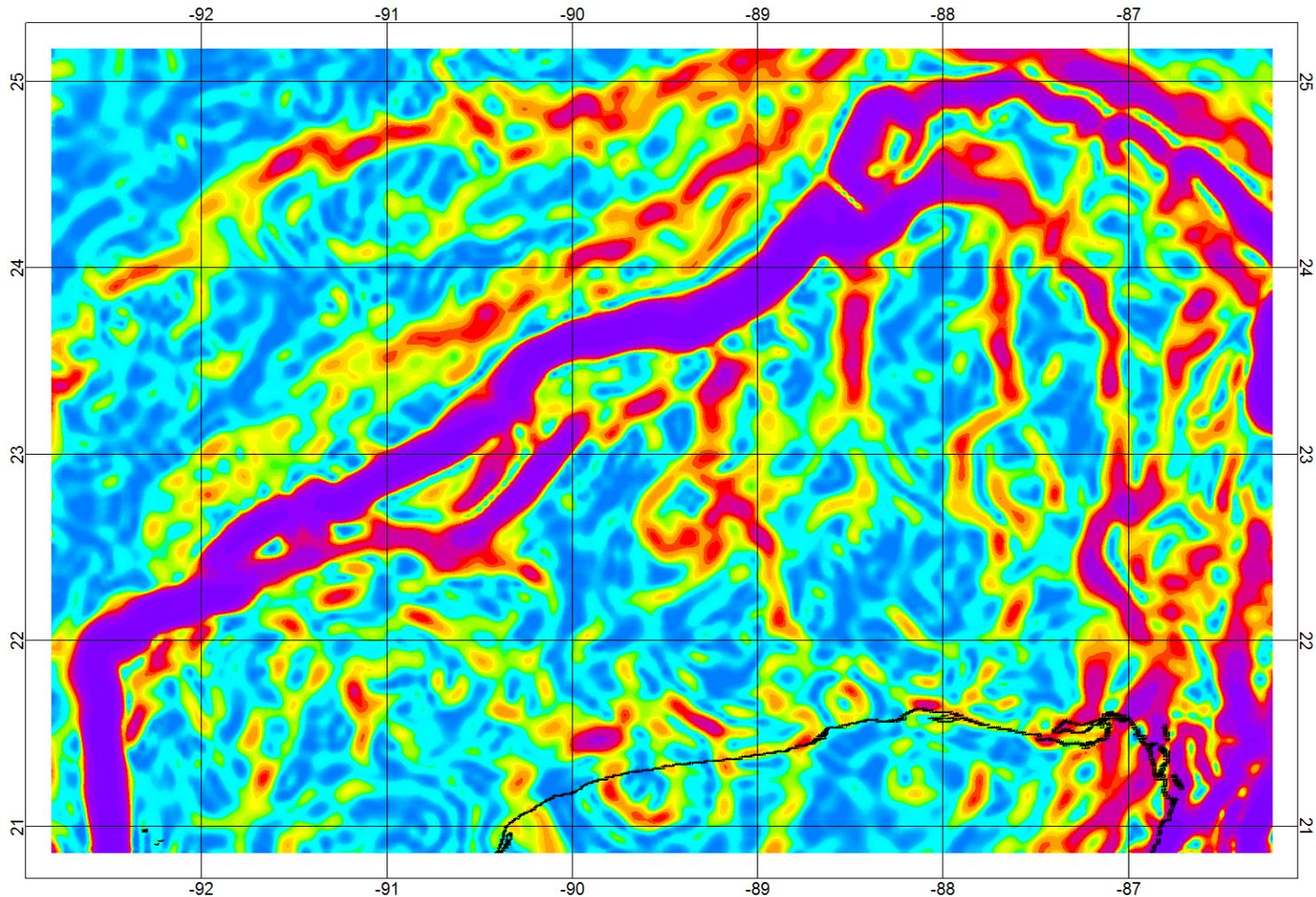


Isóbatas cada 250 m



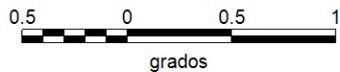
Anomalia de Aire Libre
Regional
Continuación Ascendente 10 Km





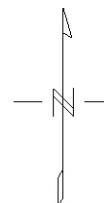
mGal/km

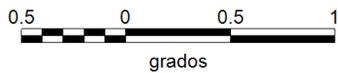
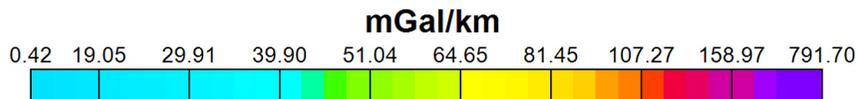
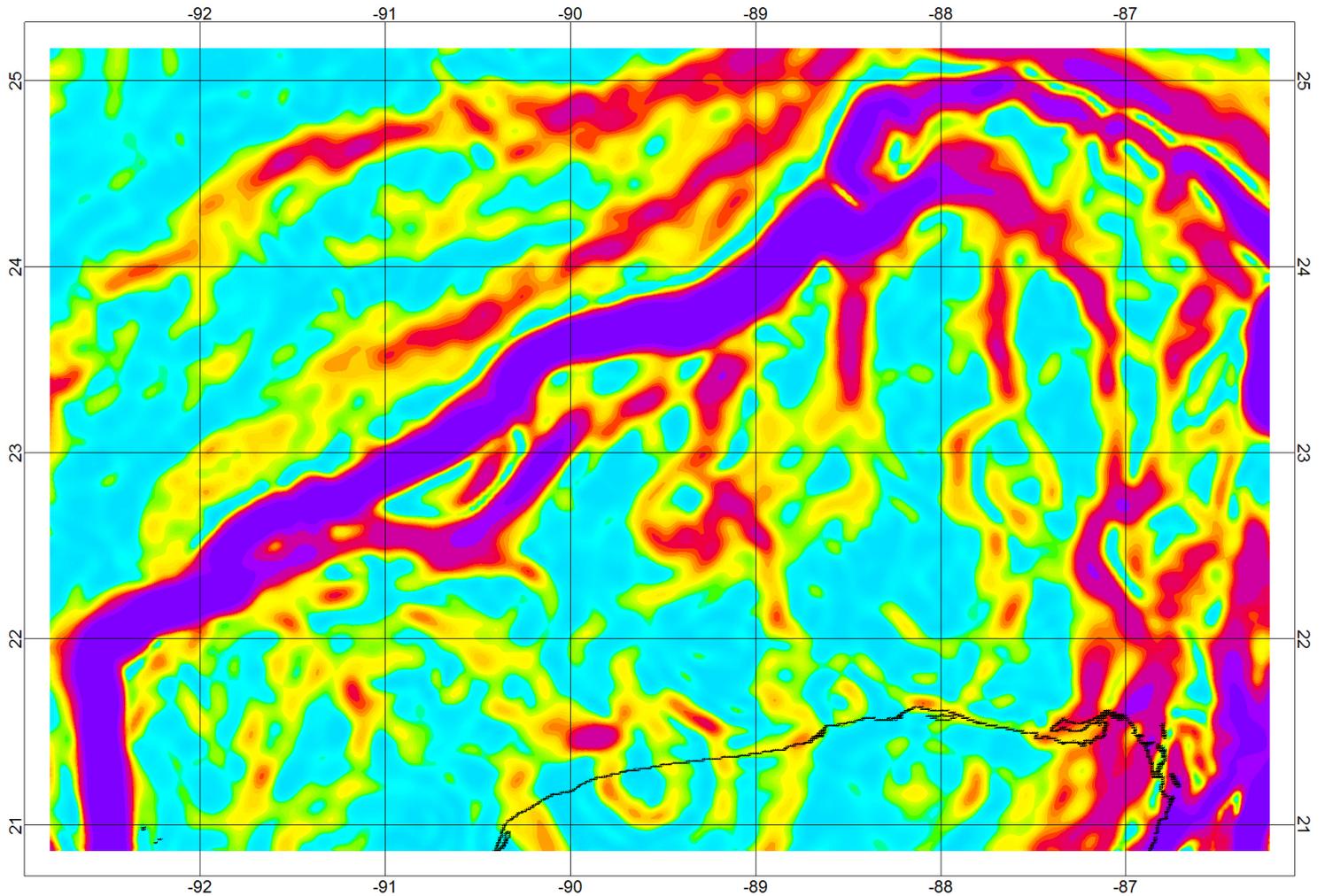
1.14 29.20 42.32 55.51 69.95 87.78 109.69 145.91 1170.78



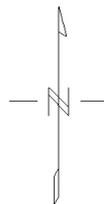
grados

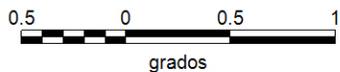
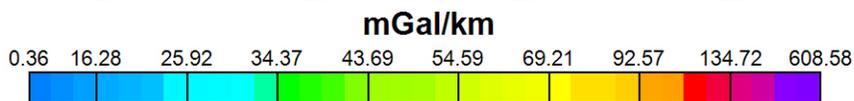
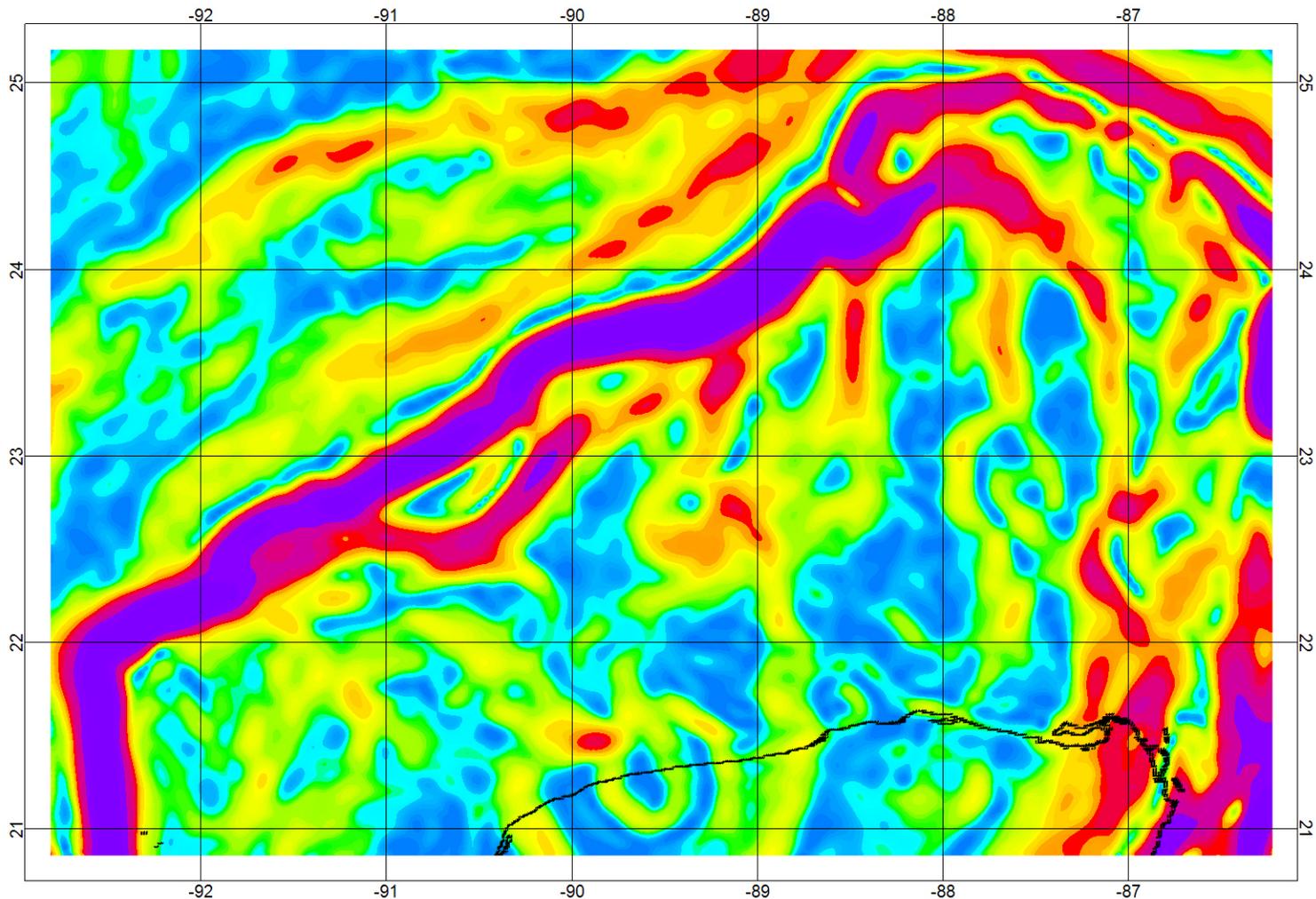
Anomalia de Aire Libre
Gradiente Horizontal



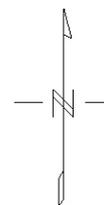


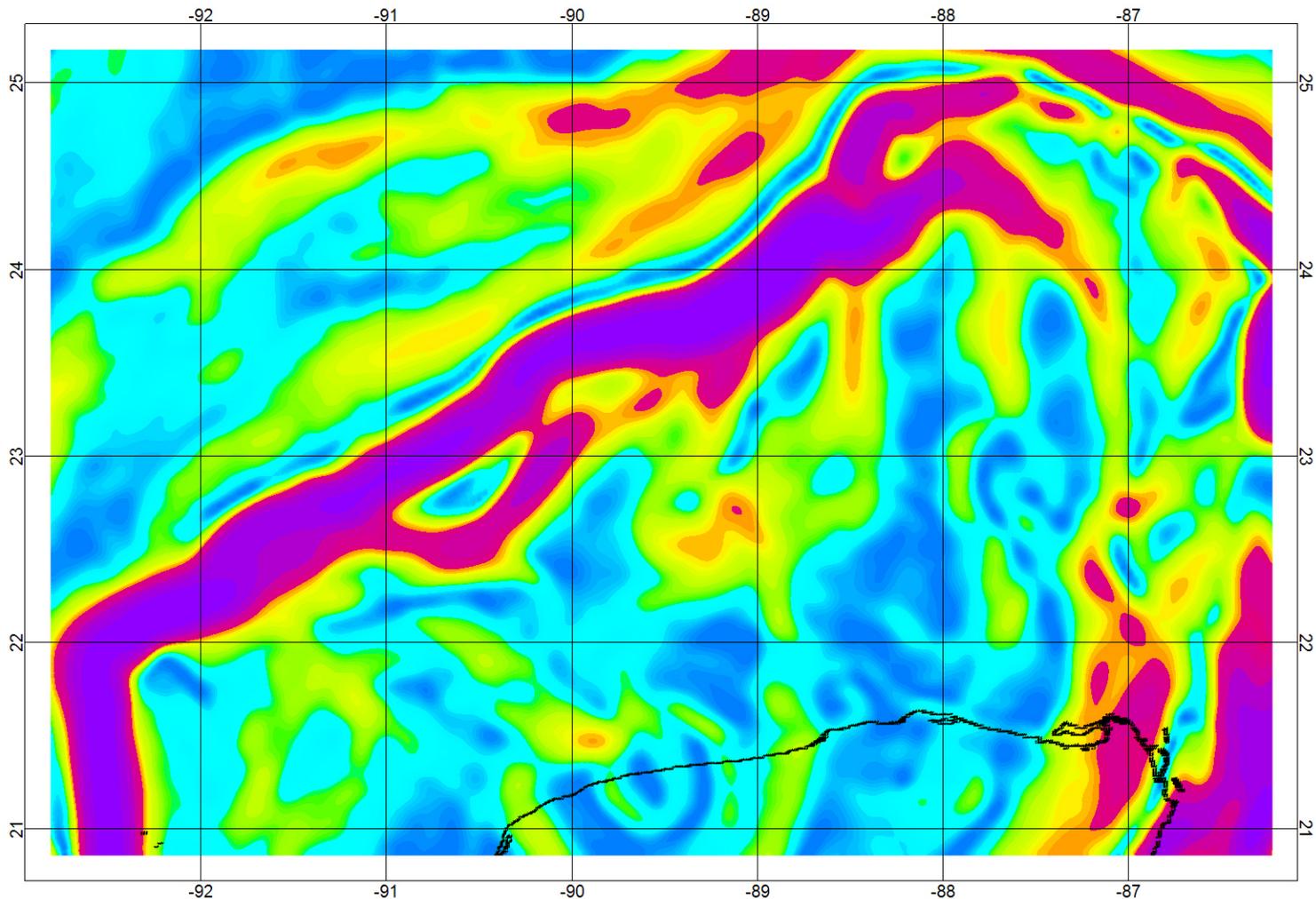
Anomalia de Aire Libre
Gradiente Horizontal
Continuación Ascendente 3 Km





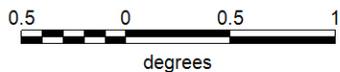
Anomalia de Aire Libre
Gradiente Horizontal
Continuación Ascendente 6 Km



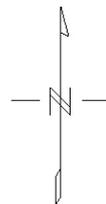


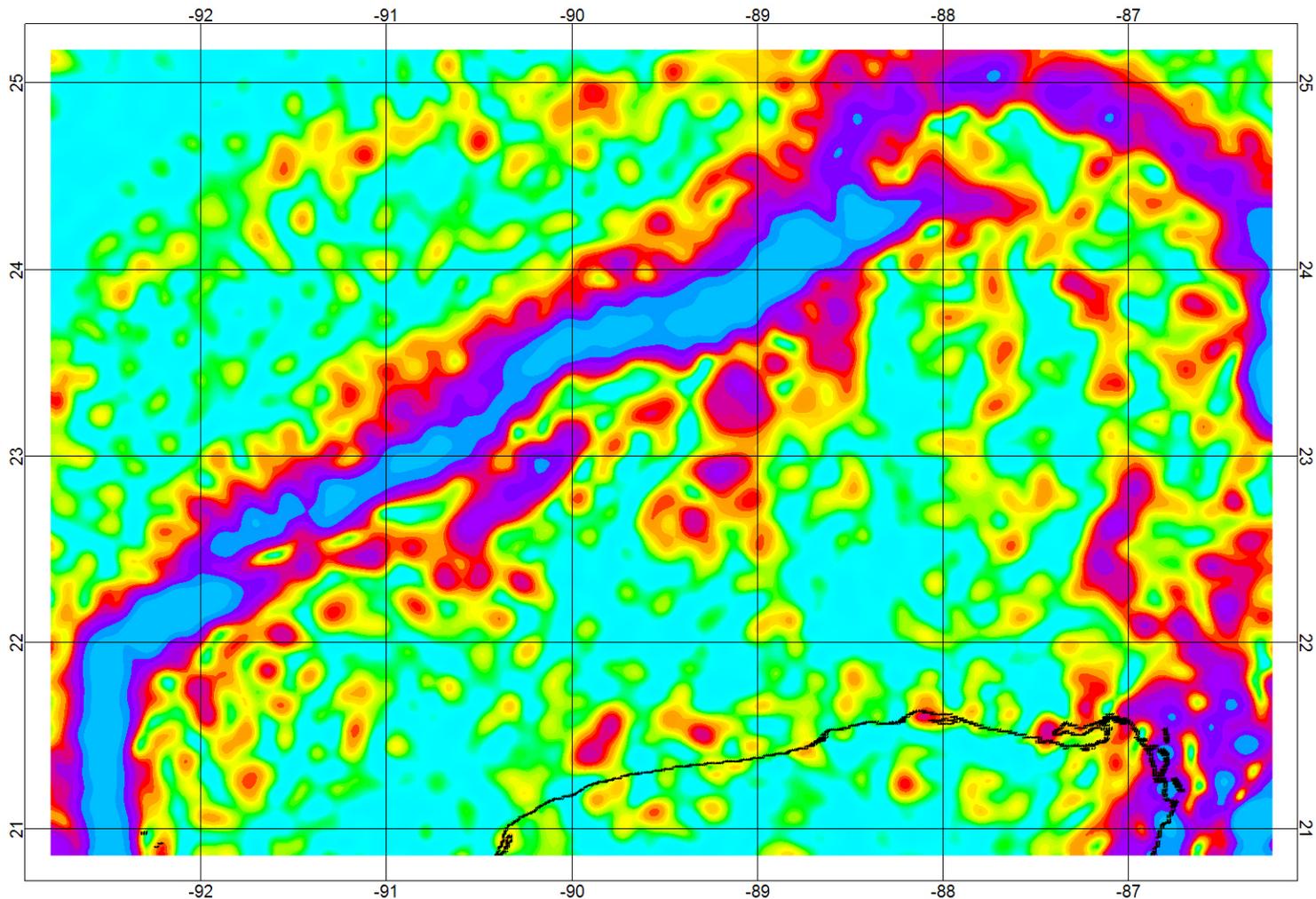
mGal/km

0.47 14.50 23.00 30.01 37.48 45.97 59.53 78.99 117.33 451.73



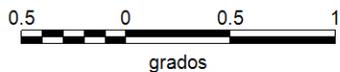
Anomalia de Aire Libre
Gradiente Horizontal
Continuación Ascendente 10 Km



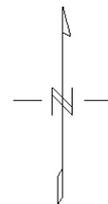


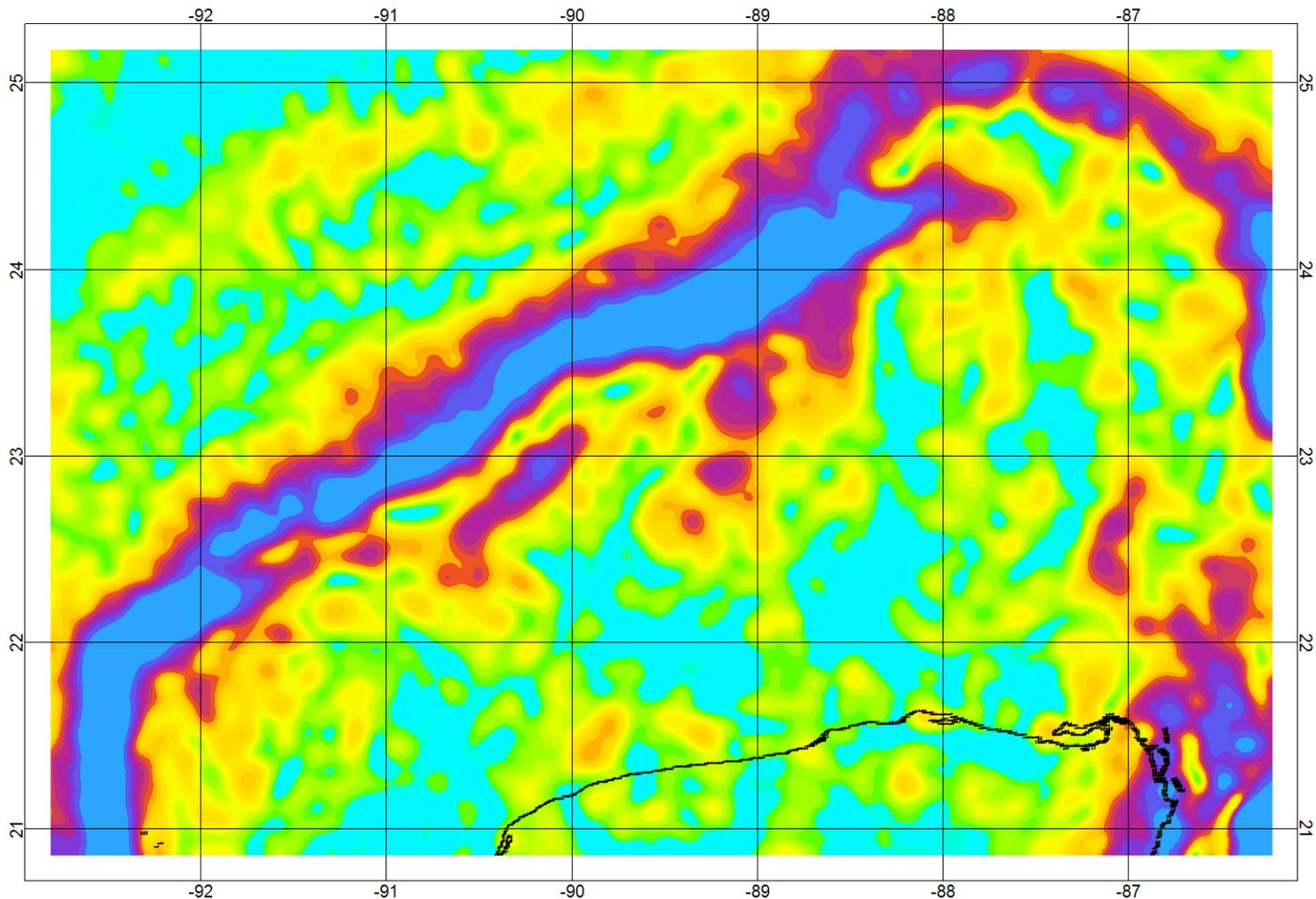
mGal/km

4.52 49.96 72.85 93.65 114.63 140.58 174.97 232.20 1242.04



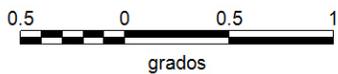
Anomalia de Aire Libre
Amplitud de la Señal Analítica





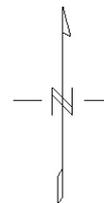
mGal/km

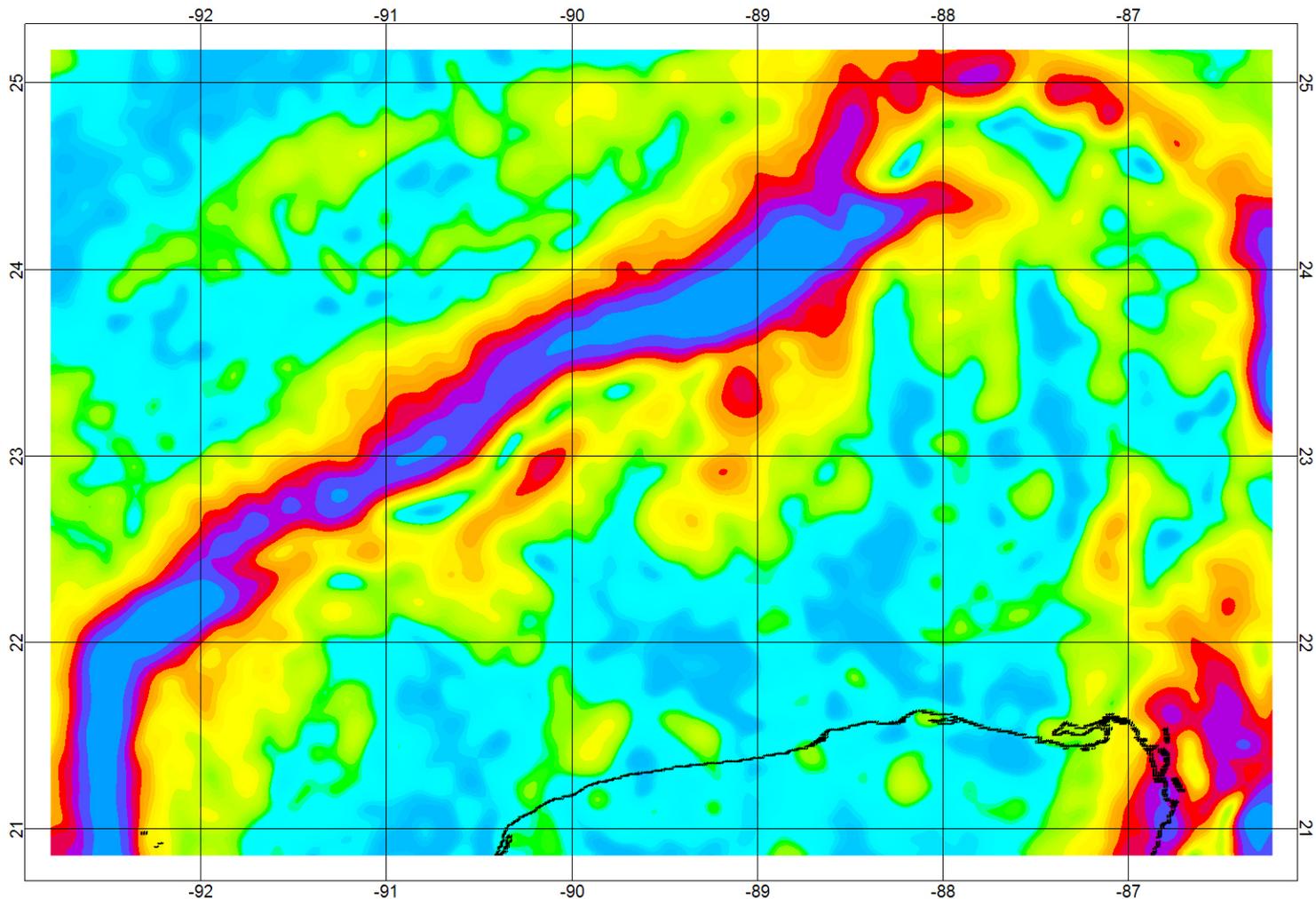
2.21 39.51 58.42 73.87 90.01 110.12 140.86 191.00 293.14 847.74



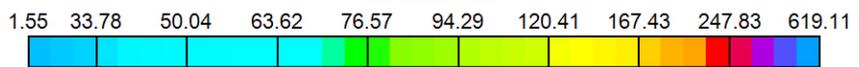
grados

Anomalia de Aire Libre
Amplitud de la Señal Analítica
Continuación Ascendente 3 Km

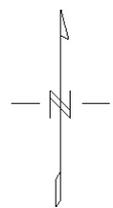


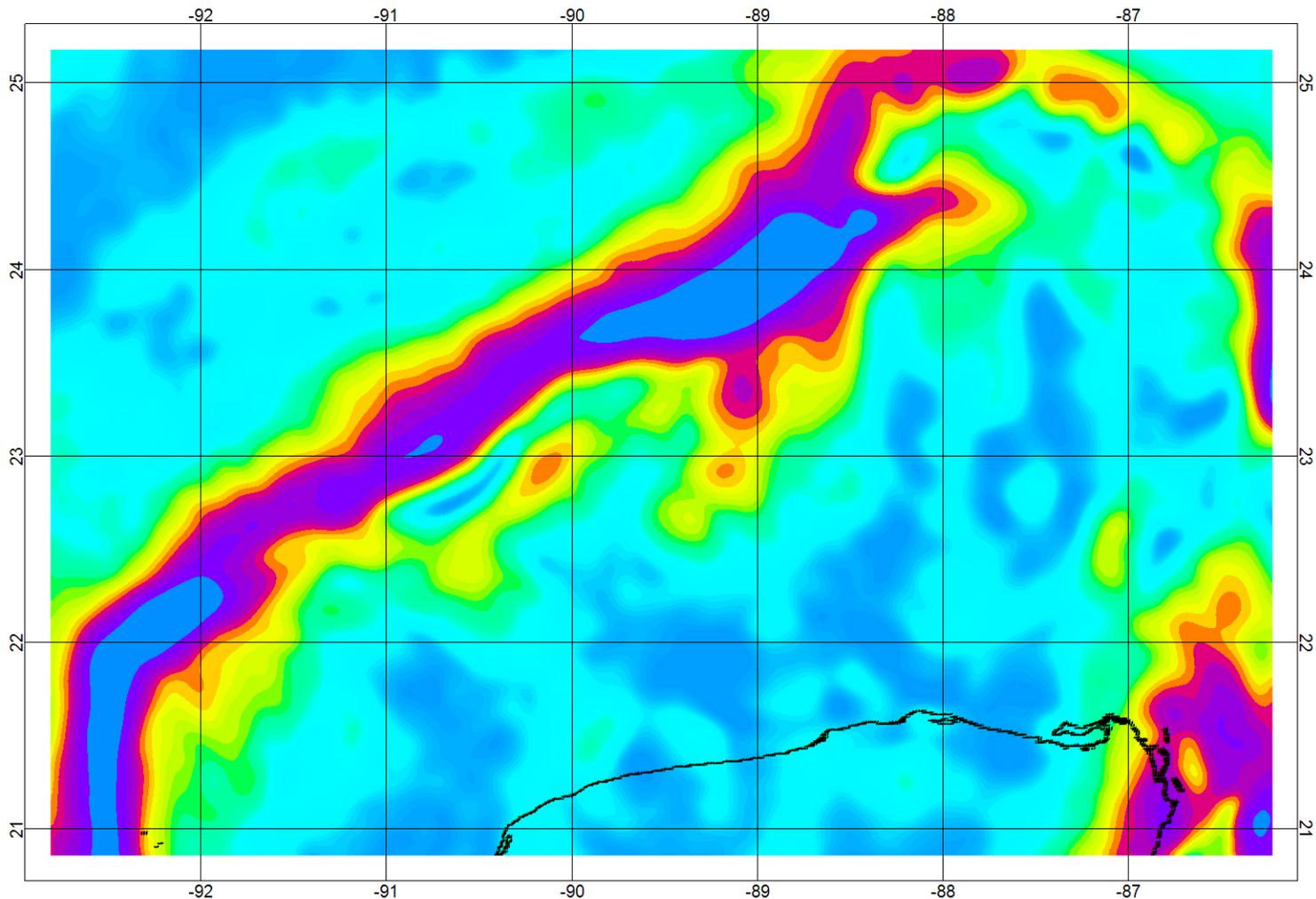


mGal/km



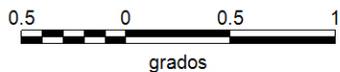
Anomalia de Aire Libre
Amplitud de la Señal Analítica
Continuación Ascendente 6 Km



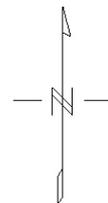


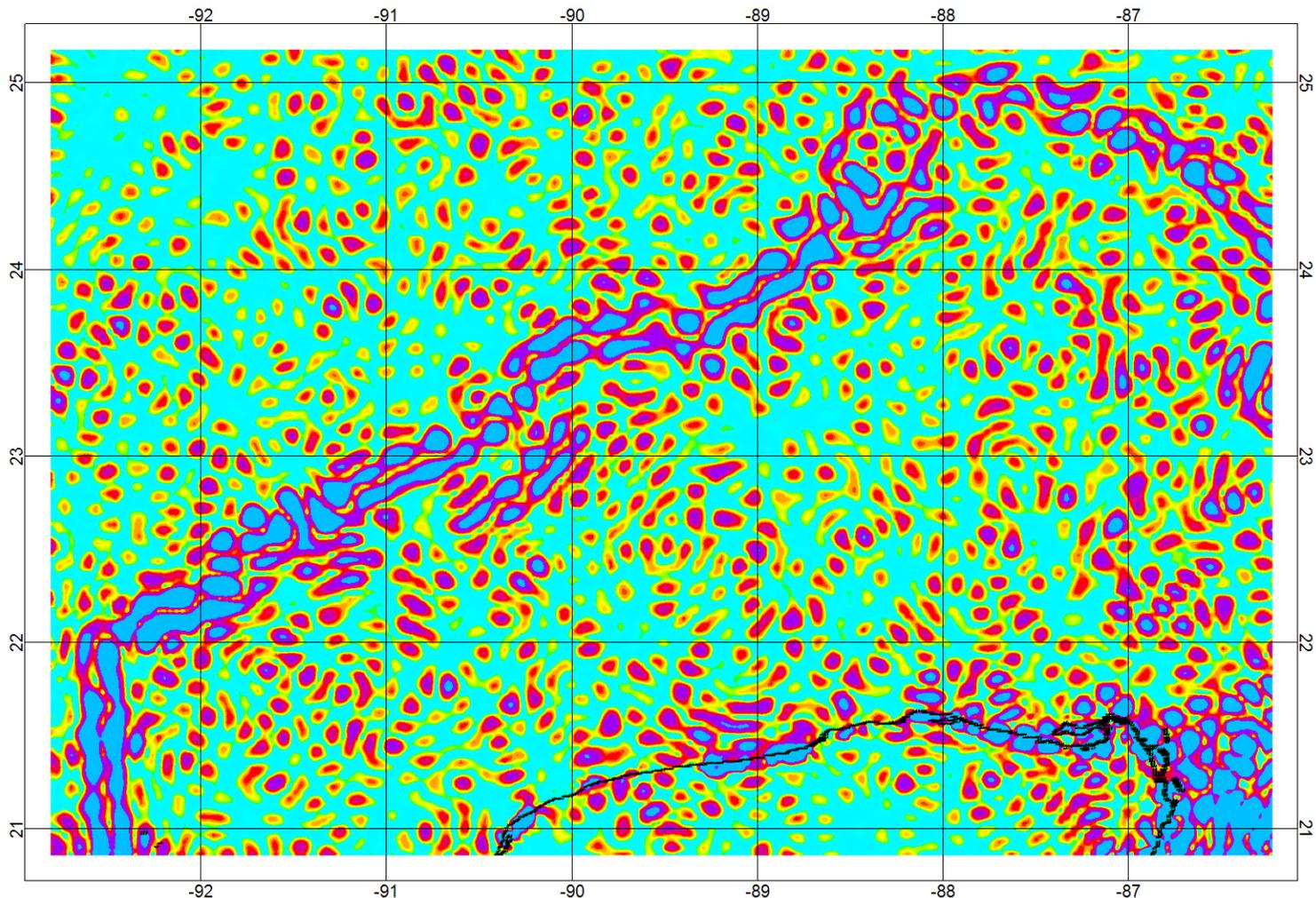
mGal/km

3.30 28.81 42.43 54.45 66.65 81.18 104.32 143.96 207.70 456.80

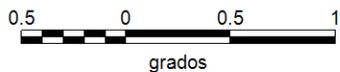
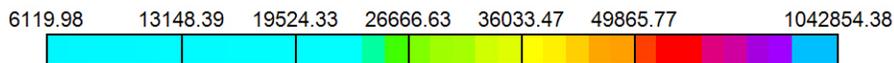


Anomalia de Aire Libre
Amplitud de la Señal Analítica
Continuación Ascendente 10 Km

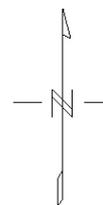


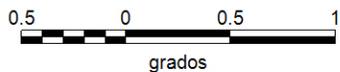
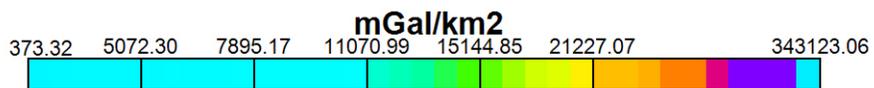
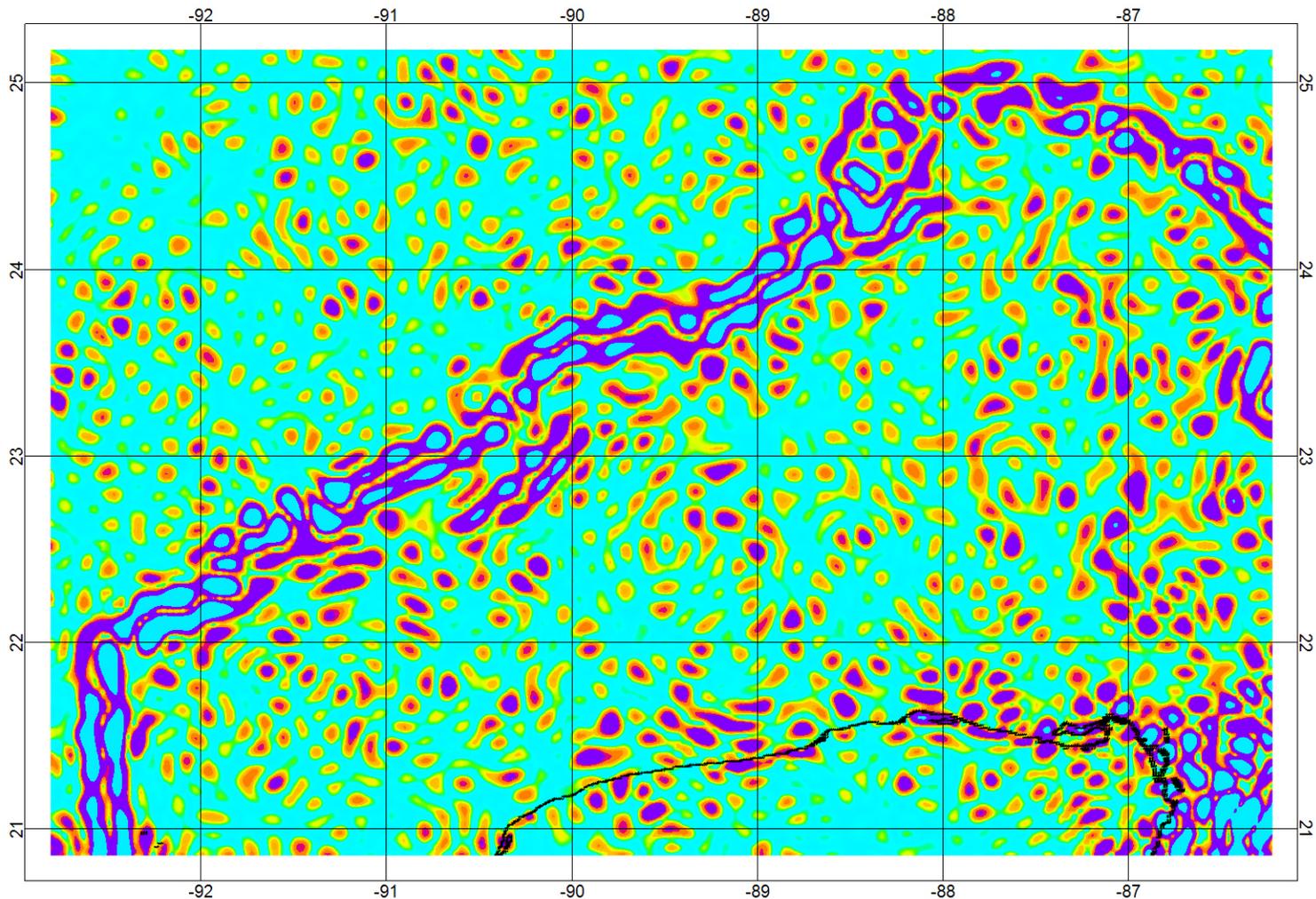


mGal/km²

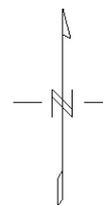


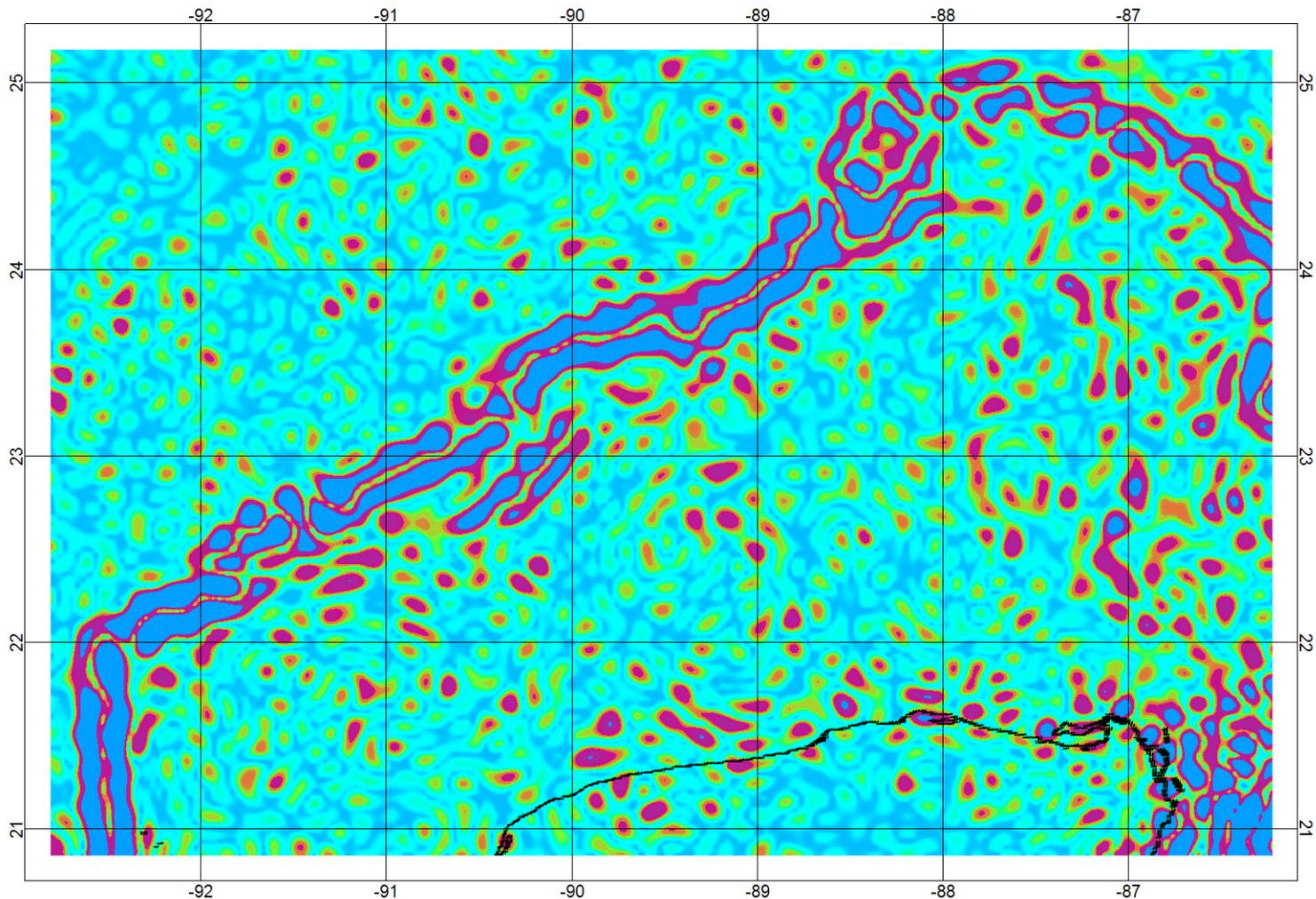
Anomalia de Aire Libre
Señal Analítica Mejorada de 1er Orden





Anomalia de Aire Libre
Señal Analítica Mejorada 1er Orden
Continuación Ascendente 3 Km





mGal/km²

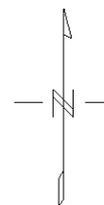
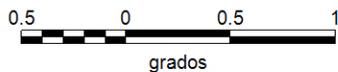
167.97 2326.89 3665.19 5253.48 7383.51 10567.23 165383.98

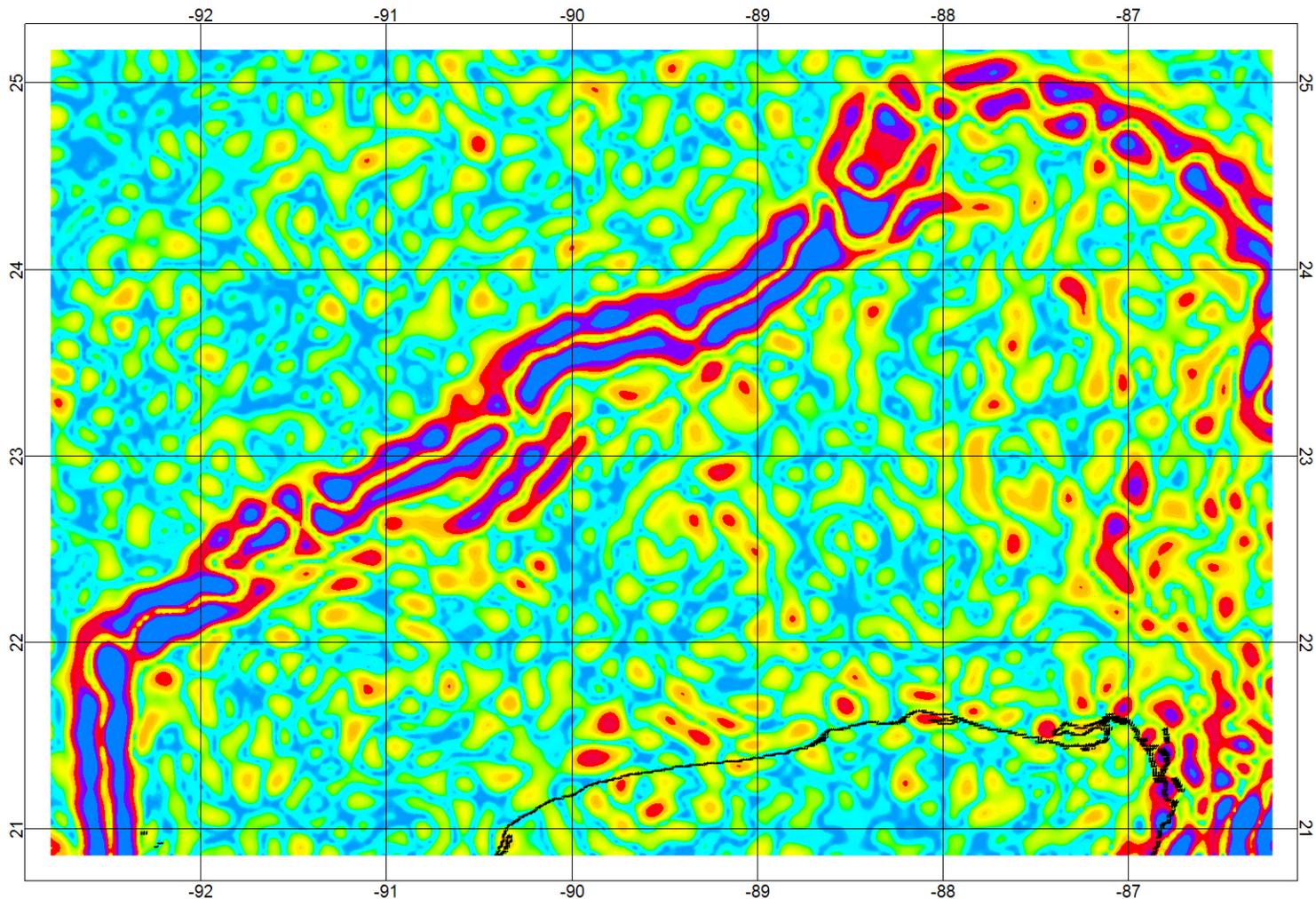


Anomalía de Aire Libre

Señal Analítica Mejorada de 1er Orden

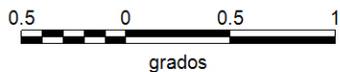
Continuación Ascendente 6 Km



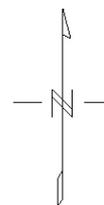


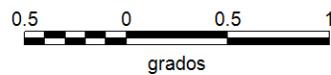
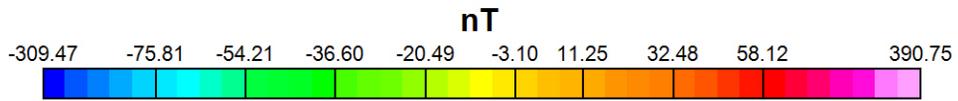
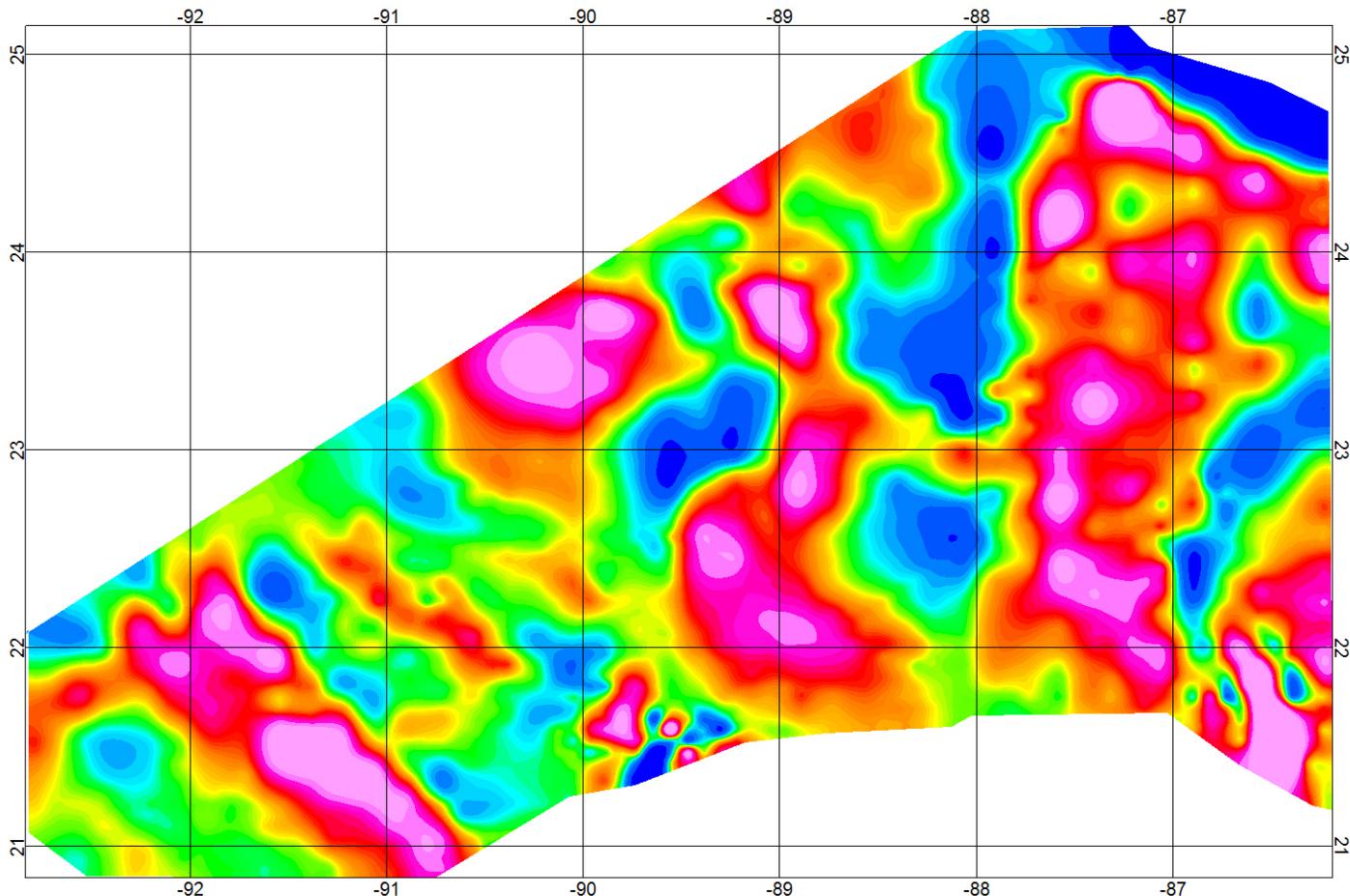
mGal/km²

113.45 944.89 1404.78 2103.02 3061.65 4500.73 7277.22 65963.54

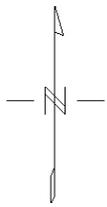


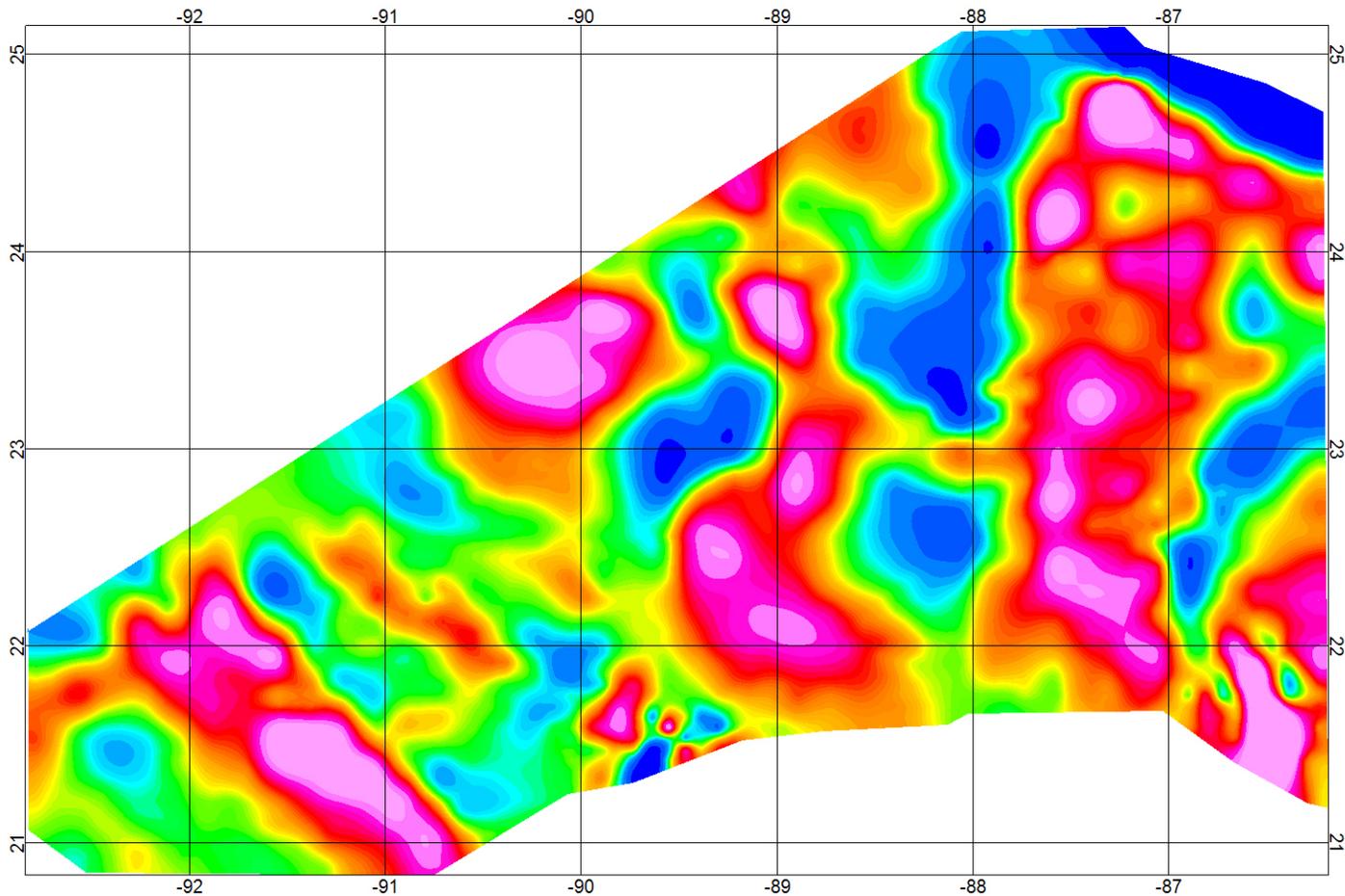
Anomalia de Aire Libre
Señal Analítica Mejorada 1er Orden
Continuación Ascendente 10 Km



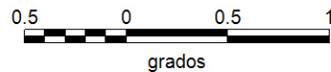


Anomalia de Campo Total
Regional

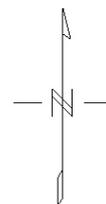


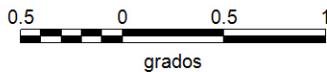
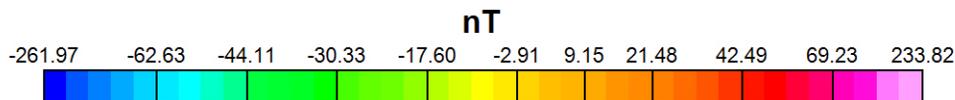
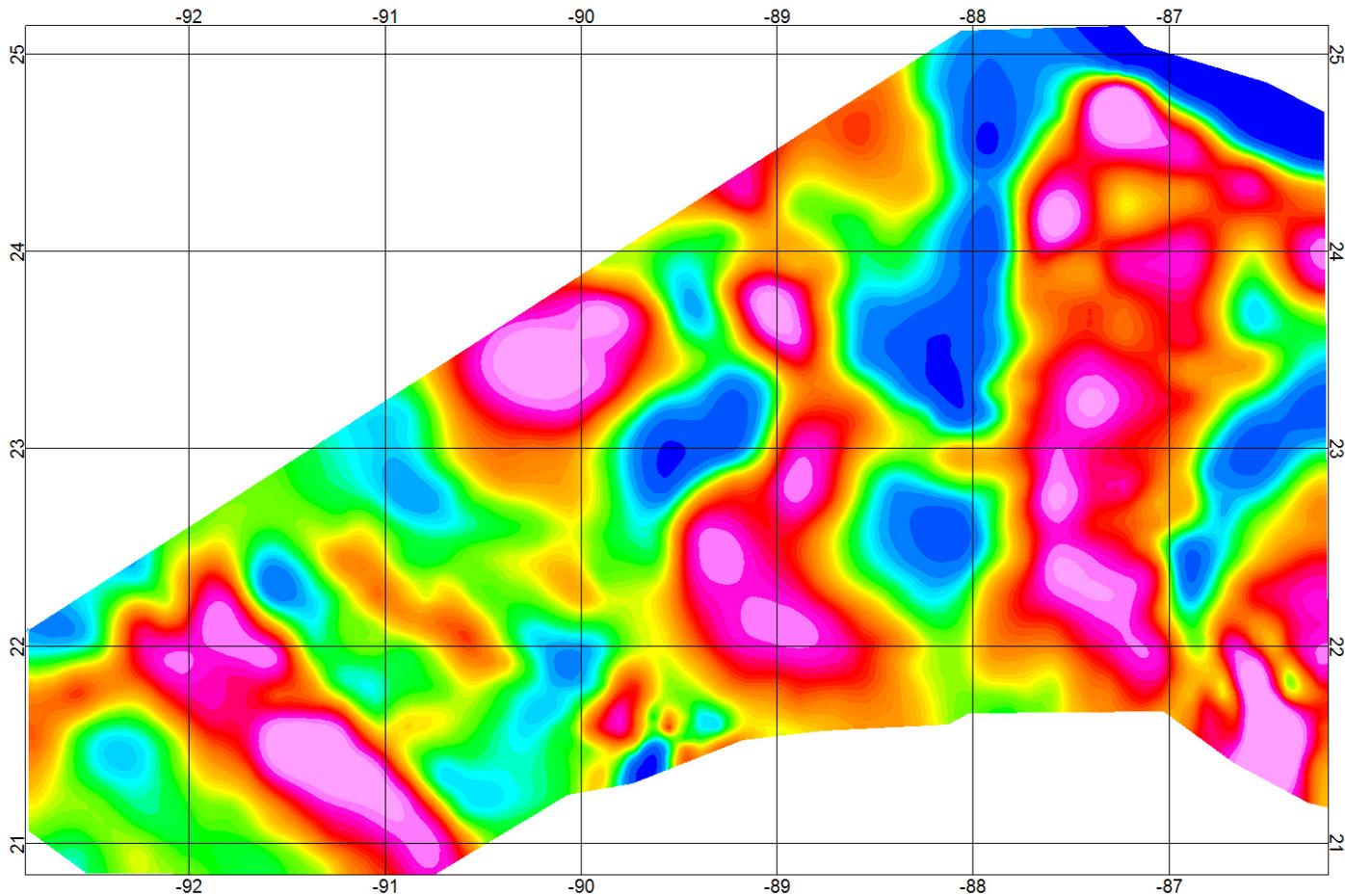


nT

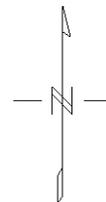


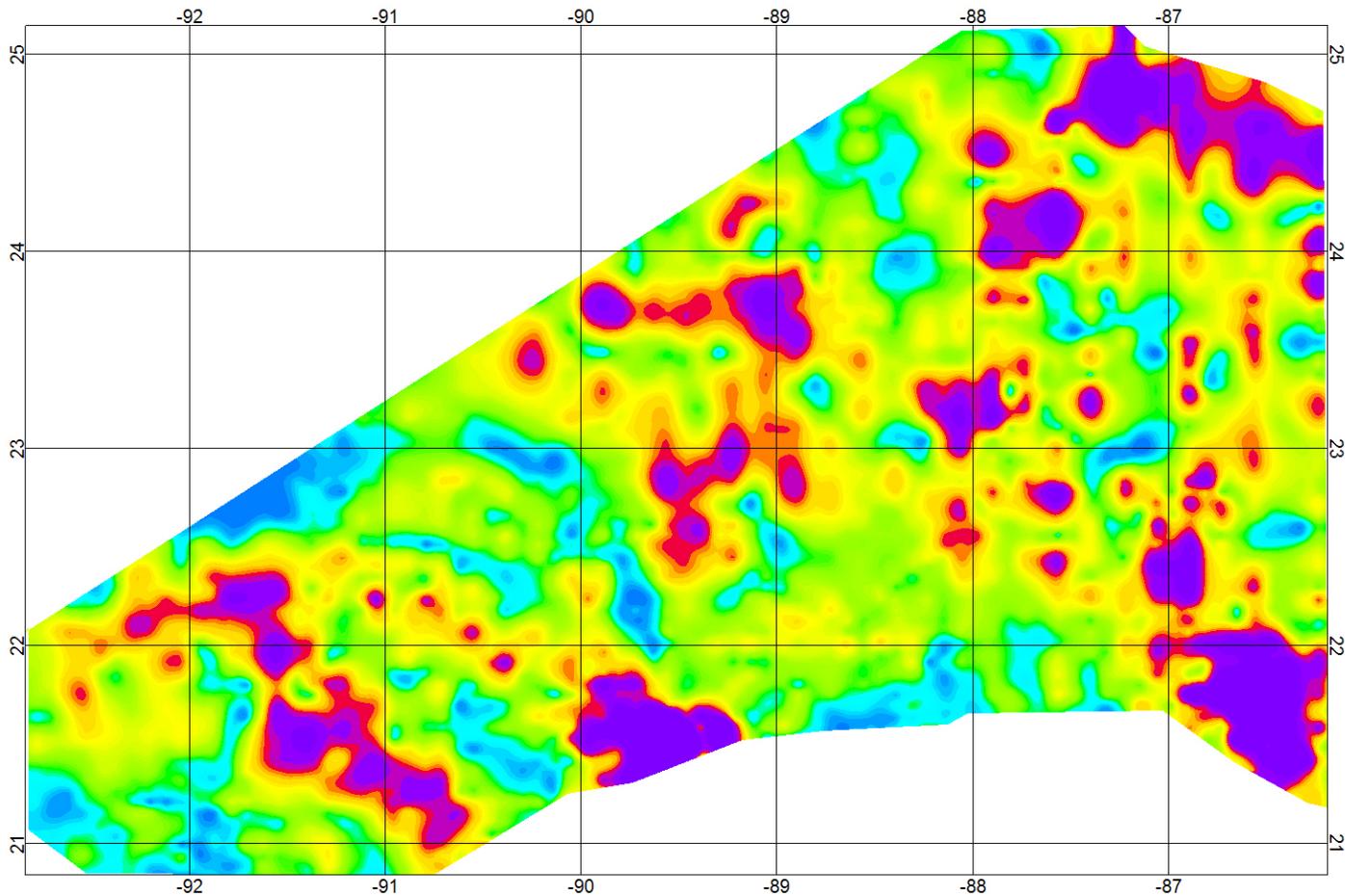
Anomalia de Campo Total
Regional
Continuación Ascendente 2km



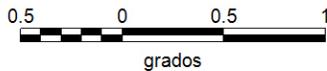
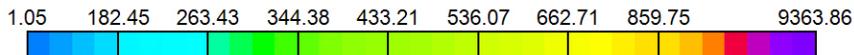


Anomalia de Campo Total
Regional
Continuación Ascendente 5 Km

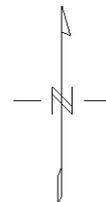


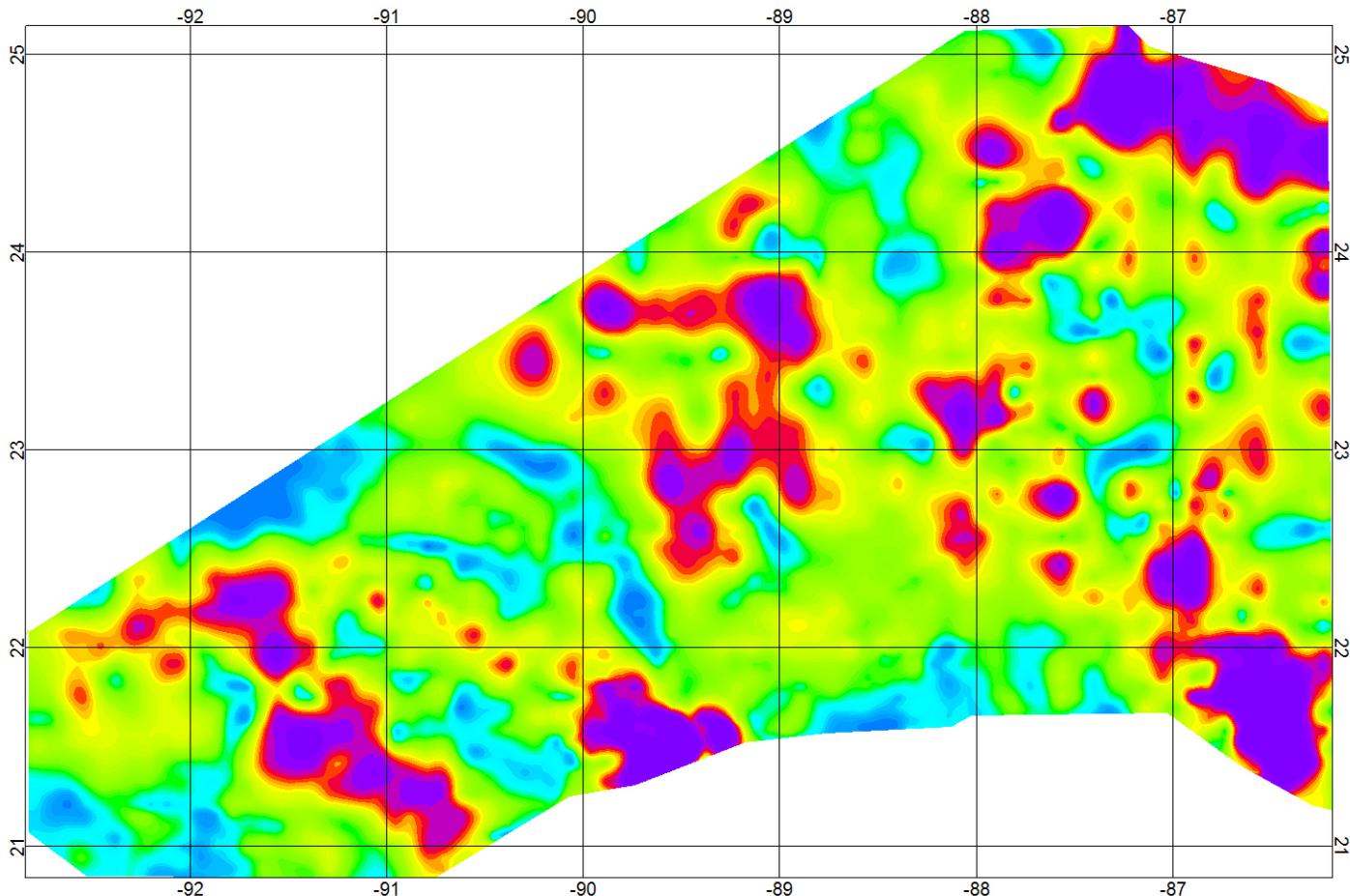


nT/km

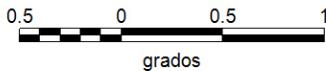


Anomalia de Campo Total
Amplitud Señal Analítica

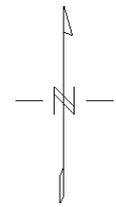


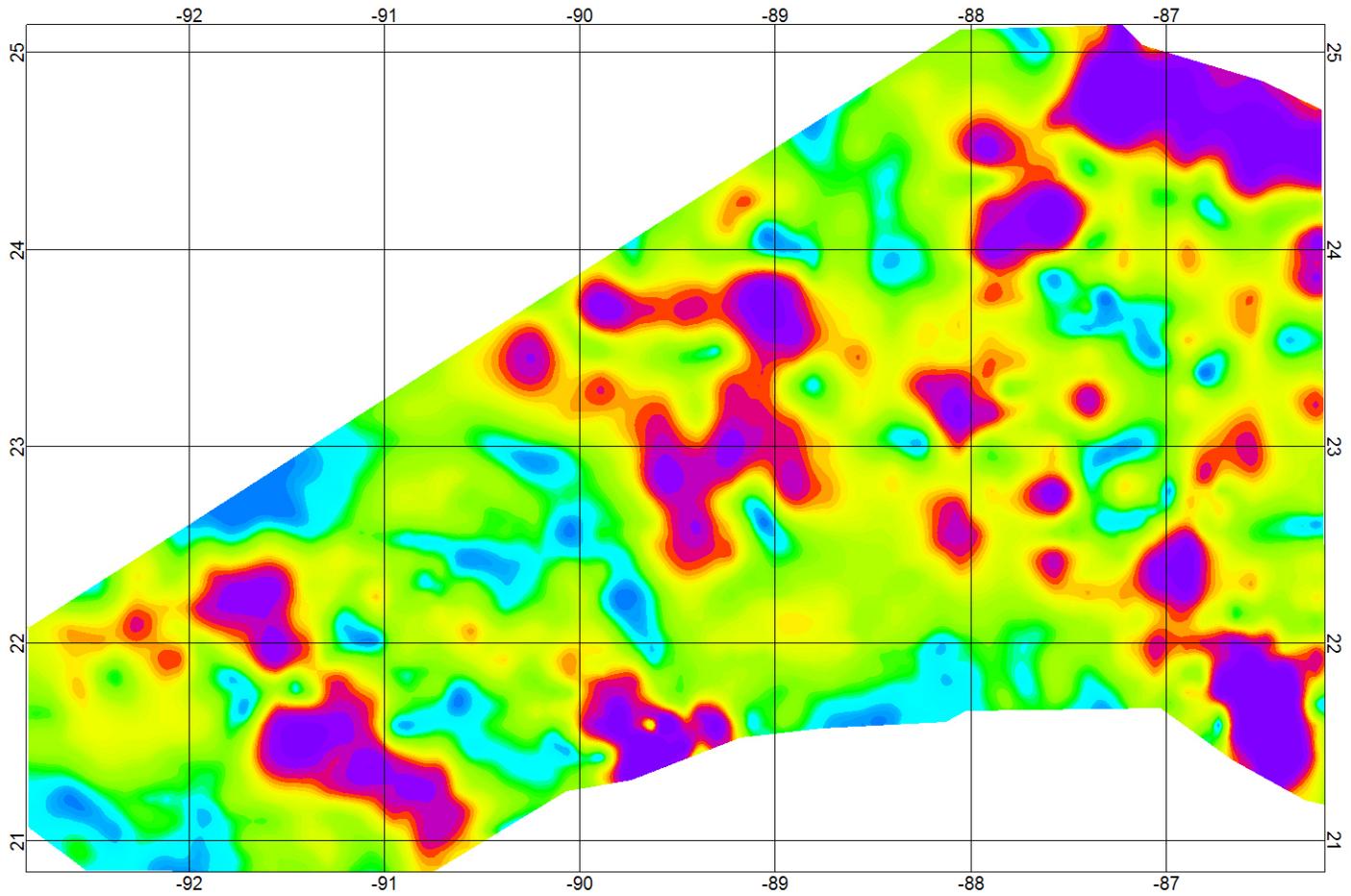


nT/km

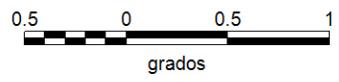
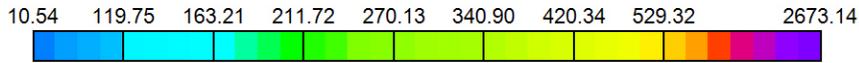


Anomalia de Campo Total
Amplitud de la Señal Analítica
Continuación Ascendente 2 Km

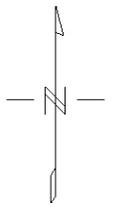


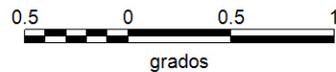
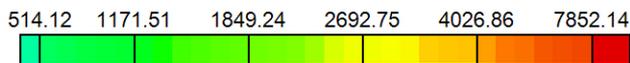
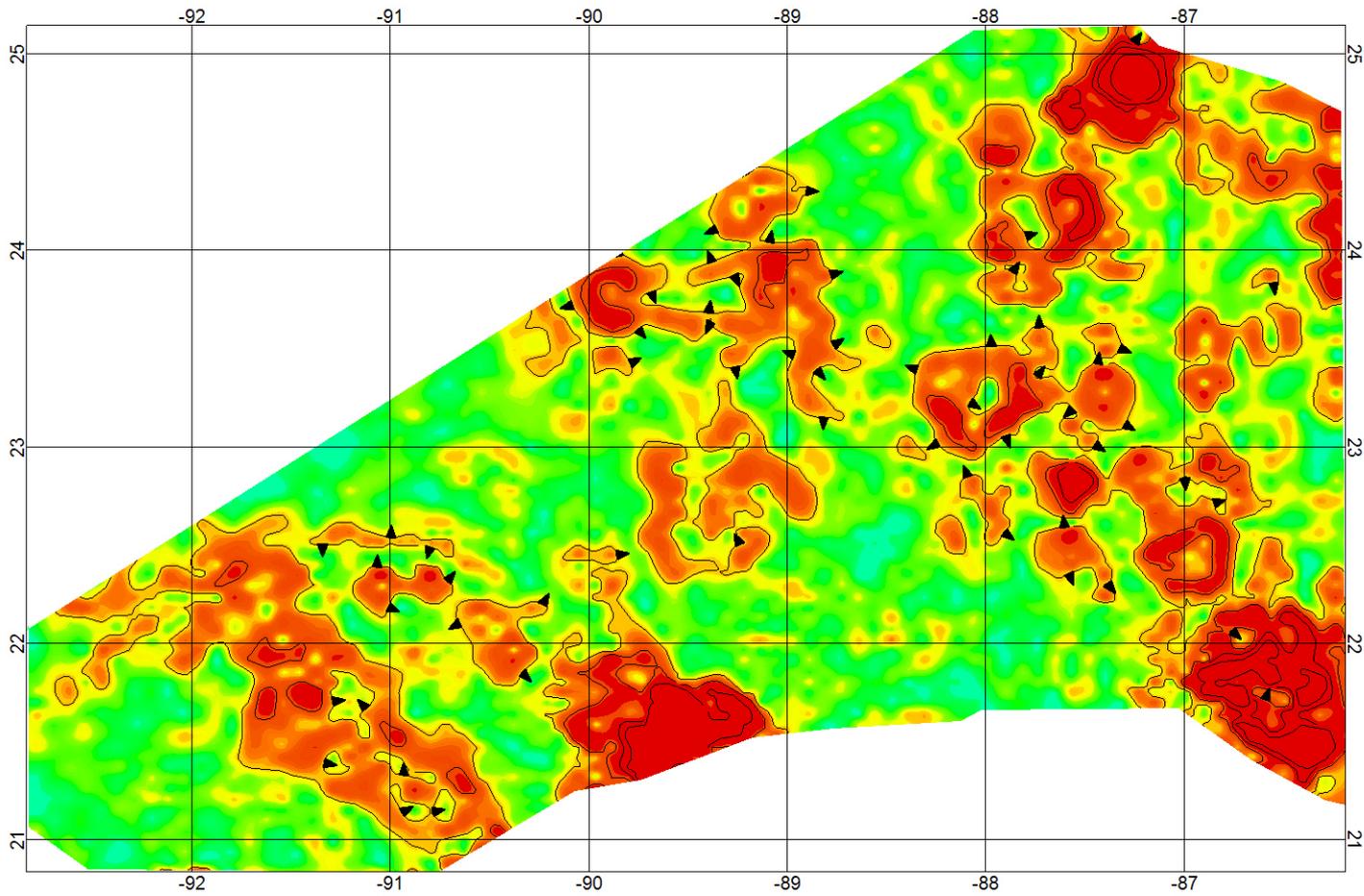


nT/km

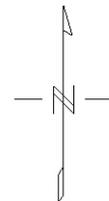


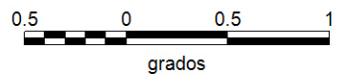
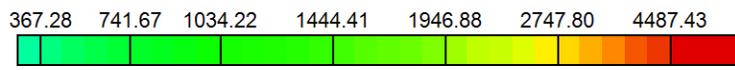
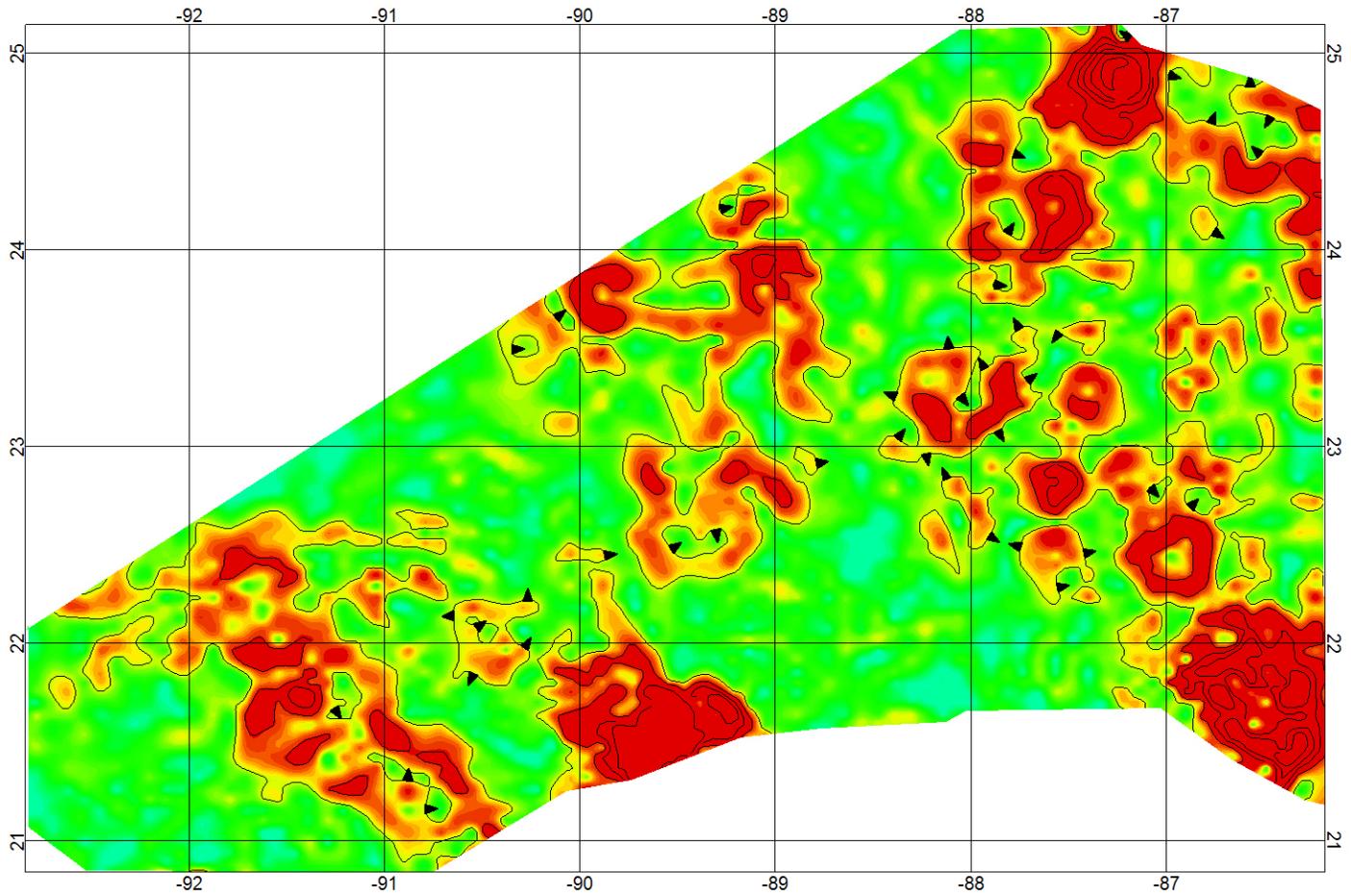
Anomalia de Campo Total
Amplitud de la Señal Analítica
Continuación Ascendente 5 Km



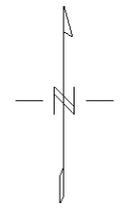


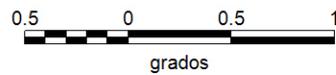
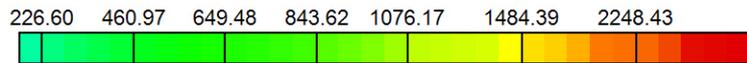
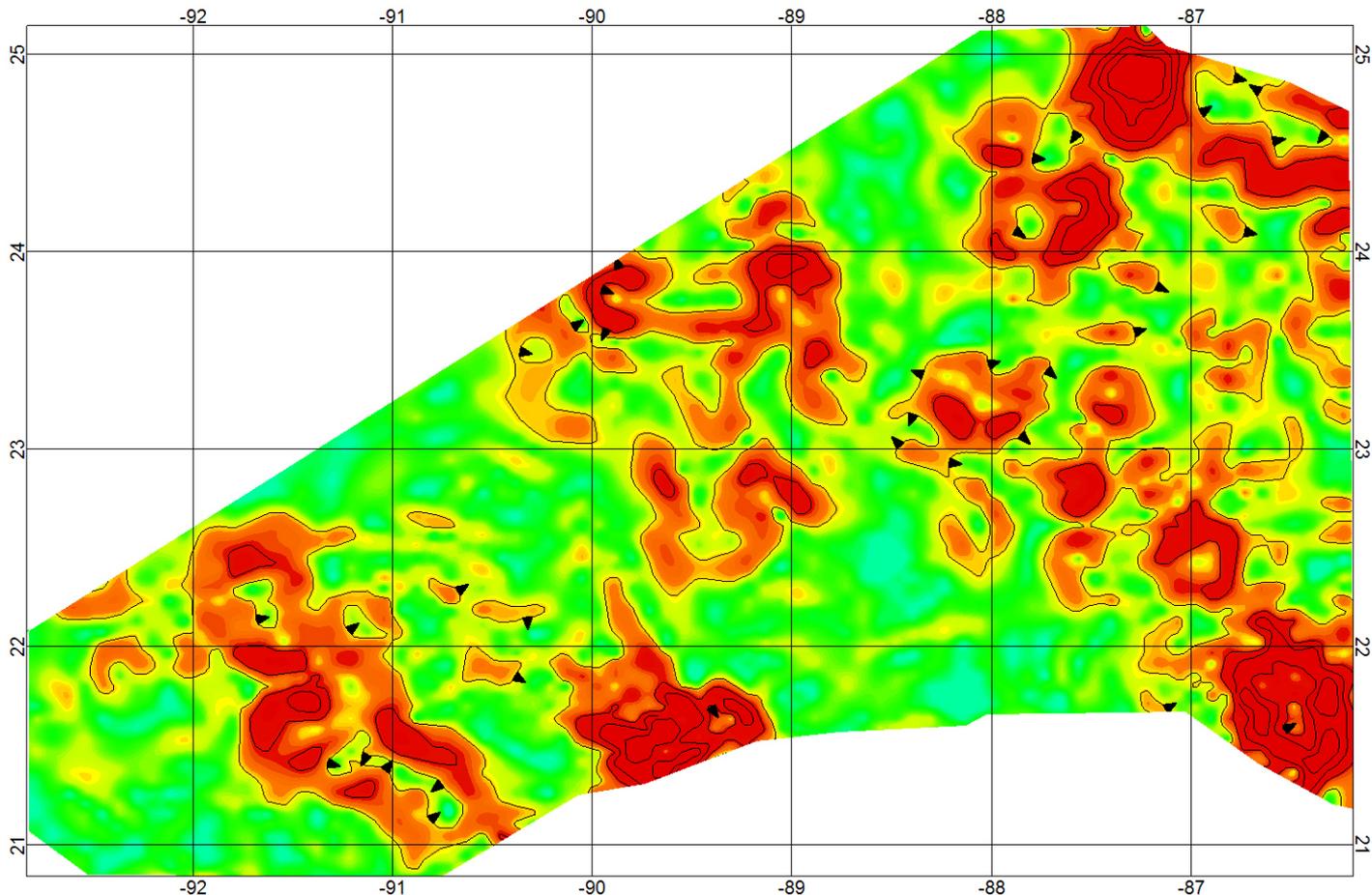
Anomalia de Campo Total
Gradiente Horizontal de la Señal Analítica





Anomalia de Campo Total
Gradiente Horizontal de la Señal Analítica
Continuación Ascendente 2 Km





Anomalía de Campo Total
Gradiente Horizontal de la Señal Analítica
Continuación Ascendente 5 Km

