



## Rasgos tectónicos de la Cuenca de La Popa y de las estructuras que la rodean en el noreste de México derivados de campos geofísicos potenciales

Antonio Tamez Ponce<sup>1,\*</sup>, Vsevolod Yutis<sup>2</sup>, Konstantin Krivosheya<sup>2</sup>,  
Edilberto Román Hernández Flores<sup>3</sup>, Andrey A. Bulychev<sup>4</sup>, Antonio Tamez Vargas<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Posgrado en Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Carretera a Cerro Prieto km 8, Ex-Hacienda de Guadalupe, 67000 Linares, Nuevo León, México.

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Carretera a Cerro Prieto km 8, Ex-Hacienda de Guadalupe, 67000 Linares, Nuevo León, México.

<sup>3</sup> PEMEX PEP, Región Norte, Interior del Campo Pemex, Edificio principal, 93300 Poza Rica, Veracruz, México.

<sup>4</sup> Facultad de Geología, Universidad Estatal de Moscú, Lomonósov, Vorobióvy Gory, 141400 Moscú, Rusia.

<sup>5</sup> Instituto Tecnológico de Linares, Carretera Nacional km 157, 67700 Linares, Nuevo León, México.

\* geo\_tony\_1@hotmail.com

### Resumen

En este trabajo se presenta el análisis integral de datos gravimétricos y aeromagnéticos en el área de la Cuenca de La Popa y las estructuras geológicas que la rodean. El análisis fue complementado con un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) que, combinado con la revisión de estudios geológicos previos, sirvió para comparar las estructuras en superficie y bloques del basamento en el área de estudio. Se hizo la separación de los bloques tectónicos más importantes, llegando por último al desarrollo de dos modelos geológicos-geofísicos 2.5D que representan de manera general las características estructurales más importantes del noreste de México.

Palabras clave: anomalía de Bouguer, anomalía magnética, evaporitas jurásicas, modelo geológico-geofísico, noreste de México, Cuenca de La Popa.

### Abstract

*In this work, the integral analysis of gravity and aeromagnetic data in the La Popa Basin and the adjacent geologic structures is presented. The analysis was complemented with a Digital Model of Elevations that, combined with the review of previous geological studies, served to compare the surface structures and basement blocks in the study area. The most important tectonic blocks were distinguished and finally two 2.5D geological-geophysical models were developed. These models represent in a general way the most important structural characteristics of the northeast of Mexico.*

*Keywords: Bouguer anomaly, magnetic anomaly, Jurassic evaporites, geological-geophysical model, northeast of Mexico, La Popa Basin.*

## 1. Introducción

La cuenca de La Popa se localiza en el antepaís (*foreland*) de la Sierra Madre Oriental a 85 km al noroeste de la ciudad de Monterrey, Nuevo León, abarcando parte de los estados de Nuevo León y Coahuila, ubicándose al noreste de la Cuenca de Parras y al Sur de la Cuenca de Sabinas (Figura 1). Esta cuenca es dominada por tectónica salina que es de gran interés para la industria del petróleo (Hudec y Jackson, 2007), debido a que grandes yacimientos de hidrocarburos en el mundo se encuentran ubicados en cuencas salinas (por ejemplo, el Golfo de México, el Golfo Pérsico, el Mar del Norte, la Cuenca Inferior del Congo, la Cuenca Campos, y la Cuenca Pricaspiana; Warren, 1999). En México, la Cuenca de La Popa representa el mejor análogo del Golfo de México (Willis *et al.*, 2001) y aunque en esta cuenca no se han encontrado depósitos de gas o petróleo, el estudio

y conocimiento de su estructura profunda y su evolución geológica puede ser aplicado a áreas semejantes, con la ventaja de que se encuentra en el continente y no debajo de un tirante de agua importante. Por esta razón es de interés tanto científico como petrolero el conocer la respuesta geofísica que tiene la Cuenca de La Popa.

El objetivo de este trabajo fue realizar un análisis cualitativo de campos potenciales (gravimétrico y aeromagnético) regionales abarcando la Cuenca de La Popa y los elementos tectónicos que la rodean, como lo son la Curvatura de Monterrey, la Cuenca de Parras, la Isla de Coahuila, la Isla de Monclova (Goldhammer y Johnson, 2001) y el Cinturón Intrusivo Candela-Monclova. Lo anterior se logró a partir del análisis de mapas 2D de la anomalía de Bouguer y la anomalía magnética total, así como el filtrado (pasa altas y pasa bajas) que se les aplicó a éstos, para finalmente poder observar la repuesta geofísica

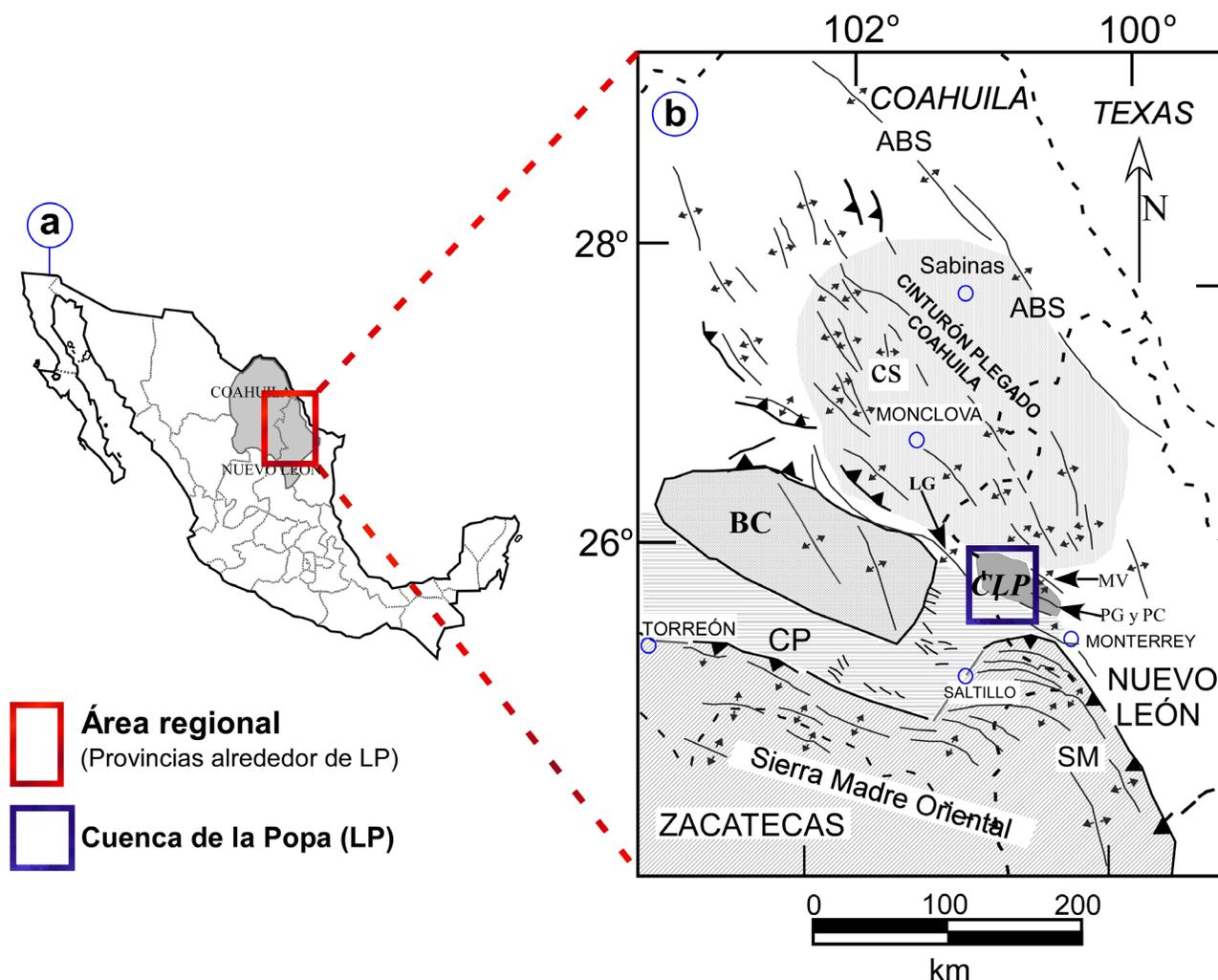


Figura 1. (a) Localización del área de estudio dentro de los estados de Nuevo León y Coahuila marcada con un rectángulo rojo. (b) Ubicación de la Cuenca de La Popa en el promontorio de la Sierra Madre Oriental marcada con un recuadro azul. Abreviaciones: BC = Bloque de Coahuila; LG = Anticlinal de la Gavia; CLP = Cuenca de La Popa; SM = Saliente de Monterrey; PG y PC = Anticlinales Potrero de García y Potrero Chico; MV = Anticlinal Minas Viejas; CP = Cuenca de Parras; CS = Cuenca de Sabinas; ABS = Archipiélago Burro-Salado. Además se ubica al cinturón plegado de Coahuila y, con un círculo azul, las ciudades más importantes: Monterrey, Saltillo, Torreón, Monclova y Sabinas (tomado de Lawton *et al.*, 2001).

que tiene la Cuenca de La Popa y los elementos tectónicos que la rodean, con lo cual se pudieron desarrollar dos modelos geológico-geofísicos que representan de manera general las características más importantes del área de estudio.

## 2. Área de estudio

En el noreste de México la evolución tectono-sedimentaria está ligada de una manera muy estrecha a la apertura y desarrollo del Golfo de México (González Sánchez *et al.*, 2007), proceso que dio origen a algunos de los altos del basamento incluidos en el área de estudio como el Bloque o Isla de Coahuila, y la Isla de Monclova.

En el área de estudio afloran principalmente rocas ígneas y sedimentarias del Mesozoico, del Terciario y suelos cuaternarios (Lawton *et al.*, 2001). Las rocas sedimentarias son de origen marino y continental, las rocas ígneas son intrusivas y extrusivas. Si se toma en cuenta la topografía se puede decir que los afloramientos del Mesozoico conforman anticlinales alargados, con una dirección predominante NW-SE, así como algunos sinclinales estrechos, ambos constituidos por calizas, areniscas y lutitas en menor proporción. Por otra parte las rocas ígneas intrusivas se encuentran en la parte norte del área y se distribuyen de occidente a oriente en la parte conocida como Cinturón Intrusivo Candela-Monclova (Chávez-Cabello, 2005).

Para comparar las estructuras en superficie y bloques de basamento fue utilizado un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) tomado de *The Consortium for Spatial Information* (CGIAR-CSI, 2009), basado en mediciones satelitales con separaciones de 90 m entre cada punto de medición. Éstas están originalmente referidas en grados y minutos, DATUM WGS84, por lo cual fue necesario convertirlas a coordenadas UTM en metros, DATUM NAD27, para poder comparar estructuras en superficie con los mapas gravimétricos y magnéticos. Este modelo consta de una base de datos de 72 202 000 puntos, dentro del que se ubicaron las estructuras más importantes, como la Cuenca de La Popa, y las estructuras que la rodean: la Curvatura de Monterrey, las islas de Coahuila y de Monclova, las cuencas de Parras y de Sabinas, los anticlinales de Minas Viejas, Potrero de García, Potrero Chico, Las Gomas-Bustamante, La Gavia, de Enmedio, y Lapazos-Sabinas (Eguiluz de Antuñano, 2001), y el Cinturón de Intrusivos Candela-Monclova, mostrando la distribución de estas estructuras en el área de estudio y ubicándolos en el Modelo Digital de Elevación (Figura 2).

## 3. Geología superficial

Como se mencionó anteriormente, el área de estudio refleja en superficie una cubierta sedimentaria marina depositada entre el Jurásico Medio-Tardío y el Cretácico

Tardío (Figura 3; Padilla y Sánchez, 1986; Salvador, 1987; Pindell *et al.*, 1988; Winkler y Buffler, 1988; Pindell y Barrett, 1990; Wilson, 1990; Dickinson y Lawton, 2001). La deformación que se observa en estos bloques y en muchas partes del noreste de México es compleja debido a despegues sedimentarios sobre secuencias evaporíticas (Formación Minas Viejas), la incorporación local del basamento en la deformación, y por la reactivación de algunas fallas antiguas del basamento como la Falla San Marcos (Padilla y Sánchez, 1986; McKee *et al.*, 1990). Parte de esta falla es abarcada por la malla de datos gravimétricos y magnéticos (Yutsis *et al.*, 2009).

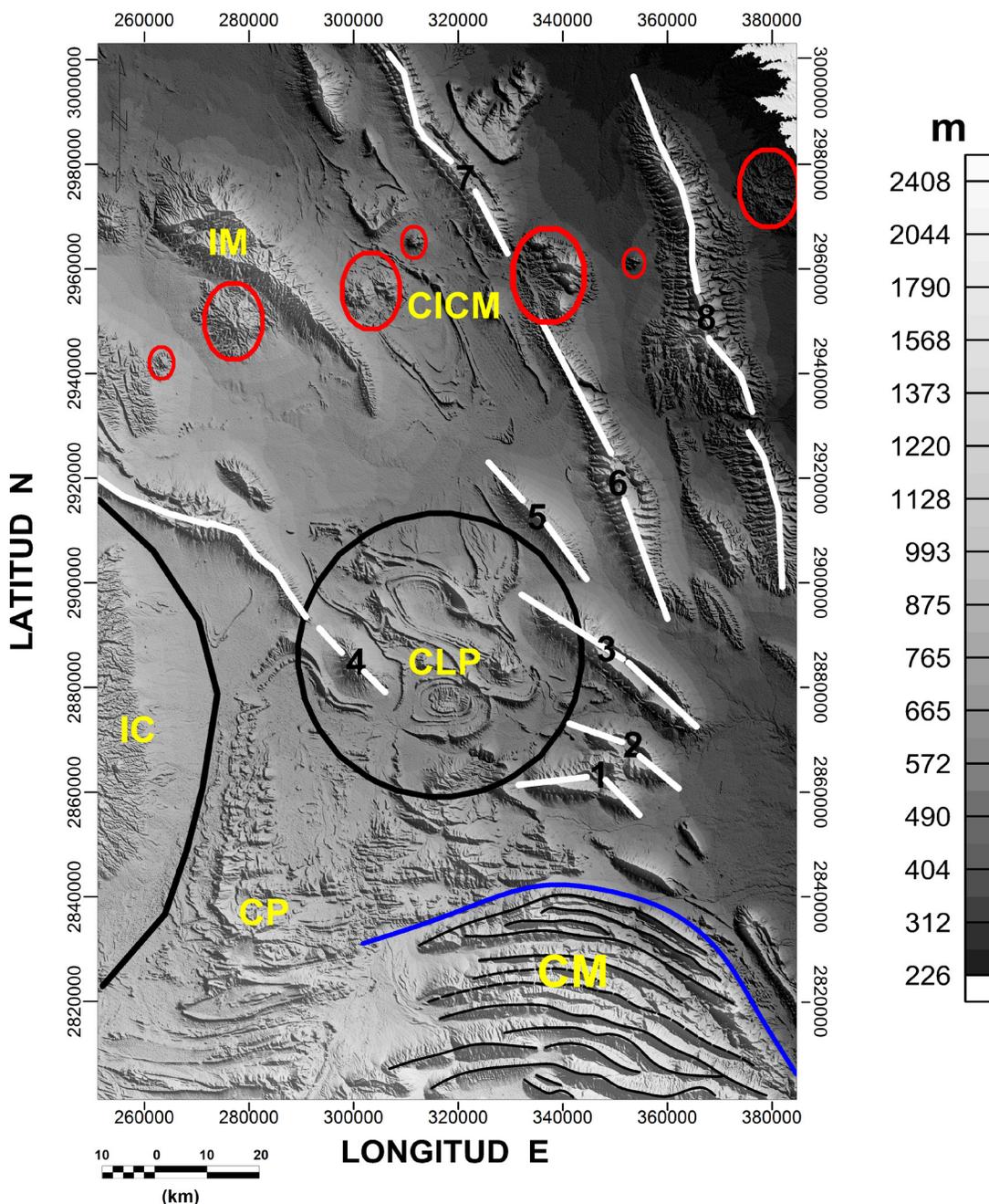
La Cuenca de La Popa es de tipo *foreland* y está localizada al frente de la Curvatura de Monterrey que forma parte de la Sierra Madre Oriental, provincia que representa el alto estructural. La Cuenca de Parras está localizada al oeste de la Curvatura de Monterrey y al sur del Bloque de Coahuila, que a su vez colinda con la Cuenca de Sabinas en la parte norte del área. Las cuencas de La Popa y de Parras contienen rocas sedimentarias siliciclásticas de grano fino y carbonatos de agua profunda del Cretácico Tardío-Terciario Temprano. Estas unidades sobreyacen a carbonatos de plataforma del Cretácico Temprano. Las rocas del Cretácico Tardío subyacen al Grupo Difunta y a la Lutita Parras (McBride *et al.*, 1974; Vega-Vera y Perrilliat, 1989; Ye, 1997). Esta secuencia se depositó al frente de la Sierra Madre Oriental durante su levantamiento producto de la orogenia Laramide (Vega-Vera y Perrilliat, 1989; Vega-Vera *et al.*, 1989; Ye, 1997). Además, existen algunos bloques tectónicos o paleoaltos permo-triásicos, como el Bloque de Coahuila (Tardy, 1980; Charleston, 1981) y la Isla de Monclova, los cuales representan altos de basamento según Goldhammer y Johnson (2001).

La falla mas importante en el área es la Falla de San Marcos, definida por Charleston (1981), quien ha sugerido que experimentó movimientos laterales en el Jurásico Tardío y normales en el Cretácico Temprano. Además, separa estructuralmente al Bloque de Coahuila del Cinturón Plegado de Coahuila (McKee *et al.*, 1990); dentro de este cinturón se encuentra el Cinturón de Intrusivos Candela-Monclova, con orientación casi E-W (Figura 3).

## 4. Datos gravimétricos y aeromagnéticos

Para realizar esta investigación se utilizó una malla de datos gravimétricos que consta de una base de datos con 9857 puntos medidos en superficie con una distancia de separación entre cada punto de 500 m (Figura 4). En base a esta información y a su análisis, se interpretaron las características del bloque sedimentario mesozoico que, en la Cuenca de La Popa tiene como base a la Formación Minas Viejas, constituida principalmente por evaporitas.

Se utilizaron también datos aeromagnéticos del Servicio Geológico Mexicano (SGM), los cuales se midieron en vuelos realizados a una altura constante de 300 m, y la



Coordenadas UTM en m

DATUM NAD27

Figura 2. Estructuras geológicas ubicadas en el Modelo de Elevación Digital. Abreviaciones: CM = Curvatura de Monterrey; CP = Cuenca de Parras; IC = Isla o Bloque de Coahuila; CLP = Cuenca de La Popa; IM = Isla de Monclova; CICM = Cinturón de Intrusivos Candela Monclova (marcados con círculos en color rojo). Anticlinas: 1.- Potrero de García, 2.- Potrero Chico, 3.- Minas Viejas, 4.- La Gavia, 5.- de Enmedio, 6 y 7.- Las Gomas – Bustamante, 8.- Lampazos – Sabinas; algunos ejes de anticlinas están marcados con líneas de color negro y blanco.

distancia entre cada punto de medición fue de 200 m teniendo una base de datos de 540 000 puntos medidos. Se utilizó este método debido a que basa su principio en las variaciones de las propiedades magnéticas de las rocas en el subsuelo (Reynolds *et al.*, 1990; Blakely, 1995), por lo que

se analizó el contraste de esta propiedad física en las rocas cristalinas debajo del bloque sedimentario mesozoico para poder relacionar el mapa aeromagnético con el basamento cristalino.

El área con información gravimétrica y aeromagnética

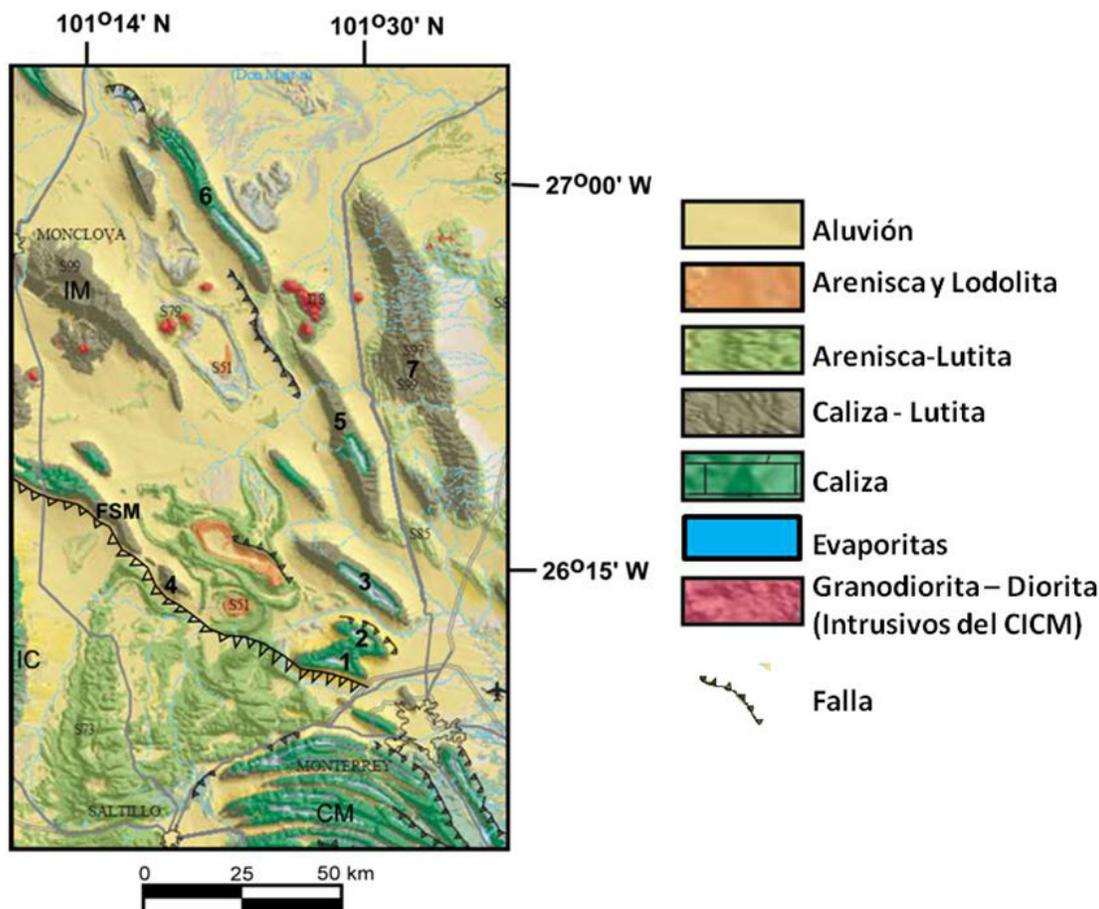


Figura 3. Mapa generalizado de la geología superficial de la Cuenca de La Popa y las estructuras que la rodean. La traza de la Falla de San Marcos (FSM) se observa debajo de la Cuenca de La Popa y el cinturón de Intrusivos Candela Monclova (CICM) en la parte norte (tomado de la Carta geológica de México, INEGI, 2007). Ver claves en la Figura 2 para la numeración y las abreviaciones.

está ubicada entre las coordenadas 260 000 E y 375 000 E, 2 810 000 N y 29 900 000 N (Coordenadas UTM en m, DATUM: NAD27) sin embargo en algunas partes se observa la ausencia de información gravimétrica debido a que corresponden con altos topográficos y la adquisición resultó complicada.

#### 4.1 Análisis de la anomalía de Bouguer

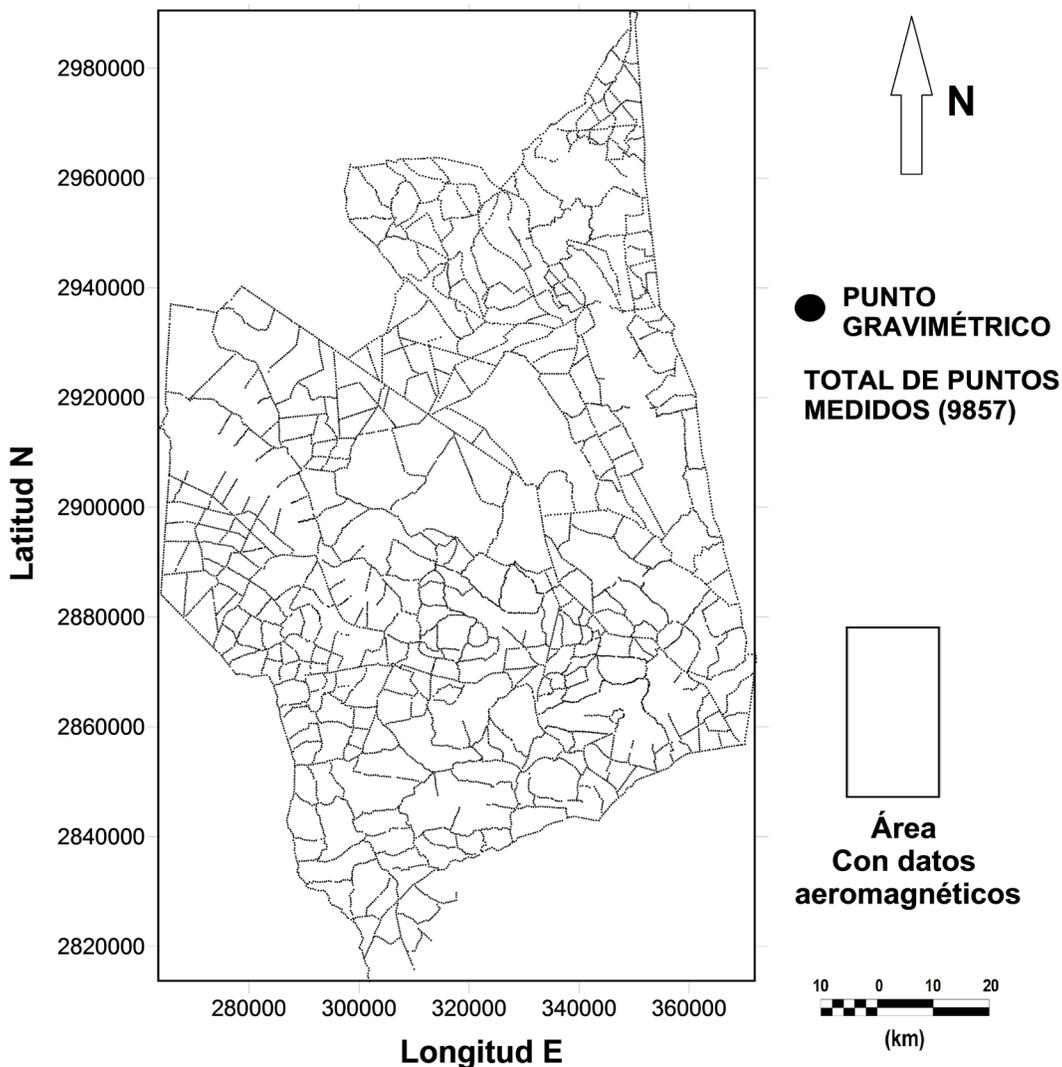
Se realizó la reducción a los datos gravimétricos y se obtuvo el mapa de la anomalía de Bouguer, con una densidad de  $2.4 \text{ g/cm}^3$  obtenida mediante el método de Nettleton, para posteriormente aplicar la corrección por terreno utilizando el método de Hammer (Burger, 1992), ya que existe variación de elevaciones de 300 a 1500 m. En este mapa gravimétrico se observa que los valores de occidente a oriente se hacen más negativos dentro de un rango de -43 a -165 mGal (Figura 5b), lo cual se interpreta como una variación en el espesor cortical entre 33 a 38 km según Bartolini y Mickus (2001). Además se realizó la separación regional-residual de la anomalía de Bouguer (*i.e.*, Reynolds, 1997). Con el objetivo de analizar las estructuras más someras se utilizó

el residual de la anomalía de Bouguer, obtenido al aplicar un filtro pasa altas con una longitud de onda de corte de 50 000 m al mapa de la anomalía de Bouguer, obteniendo como resultado un mapa con valores que van de 5 a -17 mGal (Figura 5d).

#### 4.2 Residual de la anomalía de Bouguer

Para el estudio de los cuerpos someros en el área de estudio, se analizó el mapa del residual de la anomalía de Bouguer, sobre el cual se ubicó a la Cuenca de La Popa y las estructuras geológicas que la rodean, con lo que se observó que los mínimos gravimétricos que van de -2 a -17 mGal se acomodan casi idealmente en algunos anticlinales como los de Potrero de García, Potrero Chico, Minas Viejas, Las Gomas-Bustamante y La Gavia (Figura 5d). Estas estructuras se encuentran nucleadas por evaporitas, lo cual permite correlacionar los mínimos gravimétricos con algunas de las acumulaciones más importantes de evaporitas en el área de estudio.

Además, los mínimos gravimétricos más importantes en el mapa residual de la anomalía de Bouguer se ubican



**Coordenadas UTM en metros**

**DATUM NAD27**

Figura 4. Área que abarca la malla gravimétrica facilitada por PEMEX PEP en la cual se grafican los puntos que en total suman 9857 mediciones; en esta misma región y en todas las partes que aparecen en blanco en el mapa son abarcadas por la malla de datos aeromagnéticos.

en la periferia de la Cuenca de La Popa, delimitados por algunos bloques de basamento permo-triásicos como el Bloque de Coahuila y la Isla de Monclova (Goldhammer y Johnson, 2001). Esto ocurrió probablemente después de ser depositada la sal en el Jurásico Superior y posteriormente a la depositación de la secuencia sedimentaria sobre ésta; la sal comenzó a ser expulsada hacia su periferia y, combinado con procesos de deformación, se acomodó en el núcleo de algunos anticlinales. Se observa también que estos mínimos gravimétricos se encuentran rodeados por máximos gravimétricos, lo que refleja el contraste de densidades entre la sal y rocas como las calizas, lutitas y areniscas, que son más densas.

#### 4.3 Análisis de la anomalía magnética

El análisis del basamento cristalino del área de estudio fue realizado usando el mapa de anomalía magnética, tomando en cuenta que la secuencia sedimentaria presenta un efecto magnético muy bajo, siendo su respuesta casi nula. La anomalía magnética total es la suma de los cuerpos de basamento magnetizados de distintos tamaños, los cuales presentan profundidades variables. Con lo anterior es posible tener una idea general de la morfología del basamento.

Analizando el mapa de la anomalía magnética total, con

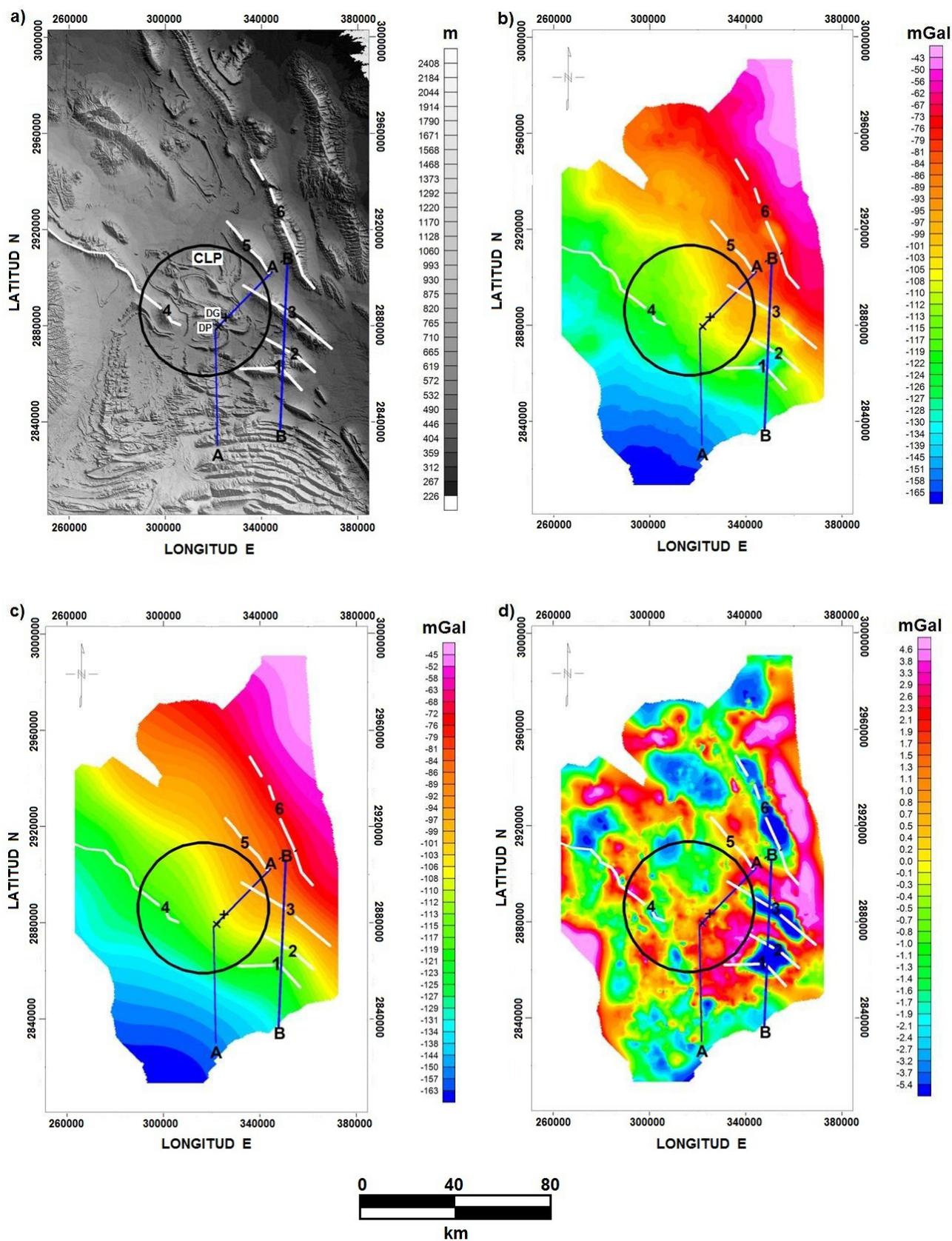


Figura 5. (a) Modelo digital de elevaciones en donde se ubica a la Cuenca de La Popa (CLP) dentro de la cual se encuentran los diapiros El Gordo (DG) y El Papatote (DP), los perfiles (A-A') y (B-B'), así como algunos anticlinales. Ver claves en la Figura 2. (b) Mapa de la anomalía de Bouguer 2.4 g/cm<sup>3</sup>. (c) Mapa de la distribución regional de la anomalía de Bouguer. (d) Mapa del residual de la anomalía de Bouguer.

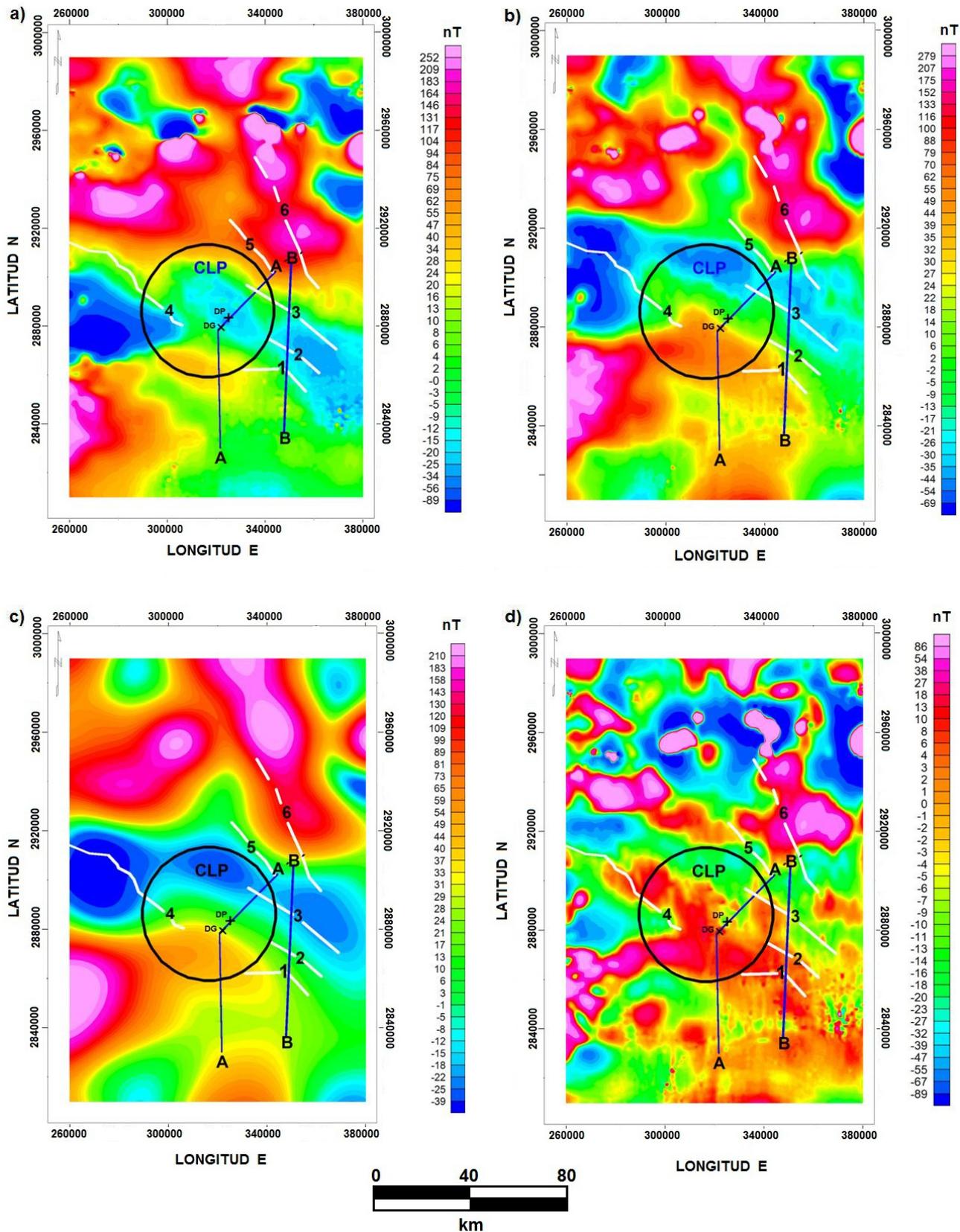


Figura 6. (a) Mapa de la anomalía magnética total en donde se ubica la Cuenca de La Popa (CLP) dentro de la cual se encuentran los diapiros El Gordo (DG) y El Papatote (DP), los perfiles (A-A') y (B-B'), así como algunos anticlinales. Ver claves en la Figura 2. (b) Mapa de la anomalía magnética total reducida al polo. (c) Mapa de la distribución regional de la anomalía magnética reducida al polo. (d) Mapa del residual de la anomalía magnética reducida al polo.

variaciones en el rango de 252 a -89 nT, se observa que la Cuenca de La Popa refleja valores mínimos, desde -8 hasta -14 nT; estos mínimos se encuentran en toda la parte central del mapa con dirección E-W. Hacia el norte de la cuenca se incrementan los valores, observándose altos magnéticos con valores de 10 a 200 nT, mientras que en la parte sur del mapa se encuentran bajos magnéticos en su sector este y altos magnéticos en la parte suroeste. Además se observa un alto aislado exactamente en la parte sur de la Cuenca de La Popa. Con este análisis es posible limitar la Cuenca de La Popa hacia el sur y al norte por altos magnéticos (Figura 6a).

Se aplicó la reducción al polo a la anomalía magnética para centrar las anomalías en los cuerpos que las producen (Figura 6b) y posteriormente se hizo la división de sus componentes regional y residual, de las cuales se utilizó la componente residual obtenida al aplicarle un filtro pasa altas con una longitud de onda de corte de 50 000 m a la anomalía magnética total reducida al polo (Figura 6d). Con lo anterior, se confirmó que la Cuenca de La Popa se ubica entre altos magnéticos hacia el norte y sur.

## 5. Modelos geológico-geofísicos regionales

Debido a que las anomalías observadas contienen el efecto de los cuerpos someros y profundos que se manifiestan en la respuesta gravimétrica como la suma de cortas y largas longitudes de onda, se realizó un análisis cualitativo y se seleccionaron dos perfiles para la elaboración de modelos 2.5D que representaran de manera general el área de estudio a una profundidad máxima de 15 km.

Los modelos aquí presentados fueron realizados con base en la anomalía magnética total, la anomalía de Bouguer y el residual de la anomalía de Bouguer, apoyados en el trabajo de Aranda-García *et al.* (2008), quien realizó una compilación de las secciones estructurales publicadas por Echanove (1965), Padilla y Sánchez (1986), Gray *et al.* (2001), Millán-Garrido (2004) y Latta y Anastasio (2007), en donde se integraron conceptos estructurales regionales que convergen en la región. Para la interpretación de estas secciones fueron considerados los estilos estructurales de cobertura de cada sector y una interpretación de su basamento para ajustar la relación entre ambas deformaciones. Las estructuras aflorantes en este sector muestran una variedad genética de dos orígenes evidentes: (1) pliegues contraccionales nucleados por evaporitas, con despegue regional dentro o en la base de las mismas como lo son los anticlinales de Potrero de García, Potrero Chico y Minas Viejas, y (2) estructuras halocinéticas en un régimen contraccional que varían desde cuerpos diapíricos despegados (diapiros El Gordo y El Papalote), domos fracturados radialmente, paredes de evaporitas y soldaduras de expulsión.

Los métodos utilizados para calcular la respuesta gravimétrica y magnética que reflejan los modelos que comprenden los polígonos, a los cuales se les asignaron distintas densidades y susceptibilidades, se basan en Talwani

*et al.* (1959) y Talwani y Heirtzler (1964), y hacen uso de los algoritmos descritos por Won y Bevis (1987). El cálculo del modelo en 2.5D se basó en Rasmussen y Pedersen (1979).

Se utilizó la compilación regional realizada por Bartolini y Mickus (2001) en base a sísmica para asignar densidades al basamento, así como la revisión de trabajos geológicos previos para calcular un promedio de las variaciones de densidad en la secuencia sedimentaria mesozoica, combinado con la aplicación del método de Nettleton. Para asignar las susceptibilidades al basamento, así como el tipo de roca, se tomó como base el mapa de litología del basamento de la Cuenca de Sabinas elaborado con datos de aproximadamente 30 pozos, datos sísmicos y además datos levantados en geología superficial (Albarran *et al.*, 2008), trabajo que también abarca la Cuenca de La Popa.

### 5.1 Perfiles seleccionados para el modelado

La metodología para seleccionar los dos perfiles que se modelaron consistió en la selección de estructuras representativas del área de estudio. Además, se tuvo en cuenta que se pudiera verificar si las secciones estructurales compiladas por Aranda-García *et al.* (2008) concuerdan con la respuesta geofísica. Posteriormente se ubicaron sobre el MDE mapas gravimétricos y magnéticos que representan el efecto de las estructuras que cruzan los perfiles.

Fueron trazados el perfil (A-A'), que abarca desde la parte más al norte de la Curvatura de Monterrey, la parte noreste de la cuenca de Parras, los diapiros El Gordo y El Papalote dentro de la Cuenca de La Popa, terminando en la parte final del anticlinal de Minas Viejas, y el perfil (B-B') que abarca los anticlinales de Potrero de García, Potrero Chico y Minas Viejas (Figura 5a). Éstos también se colocaron en tres mapas gravimétricos para realizar un análisis cualitativo. En el mapa de la anomalía de Bouguer (Figura 5b) se observa sólo una tendencia en el incremento de los valores hacia el noreste y algunos mínimos aislados ubicados de manera general con la misma dirección de algunos ejes de anticlinales. El mapa regional de la anomalía de Bouguer (Figura 5c) únicamente presenta anomalías de baja frecuencia, lo cual indica un aumento en el espesor cortical hacia el noreste. Por último, en el mapa del residual de la anomalía de Bouguer (Figura 5d) se puede observar que los diapiros El Gordo y El Papalote, a los que cruza el perfil (A-A'), no presentan una respuesta gravimétrica negativa, por lo cual es posible que la evacuación de evaporitas haya sido casi total y que actualmente estén despegados de su fuente, permaneciendo en superficie únicamente un residuo de evaporitas.

Sin embargo, los anticlinales abarcados por el perfil (B-B') están ubicados sobre bajos gravimétricos ya que están nucleados por evaporitas (Figura 5d). Para modelar el basamento cristalino se ubicaron los perfiles en cuatro mapas magnéticos. En el mapa de la anomalía magnética total (Figura 6a) se observa que, en la latitud en la que los perfiles cruzan la Cuenca de La Popa y los anticlinales

Potrero de García, Potrero Chico y Minas Viejas, responden a un bajo magnético centrado casi con orientación E-W. Esta parte ha sido considerada como una fosa jurásica o un graben según las interpretaciones cualitativas de las secciones estructurales compiladas por Aranda-García *et al.* (2008). Se utilizó este mapa para el modelado y para verificar si esta estructura corresponde a un graben según su respuesta magnética. En el mapa de la reducción al polo de la anomalía magnética total (Figura 6b) se observa que las anomalías tienen un ligero desplazamiento ubicándolas debajo de los cuerpos que las originan. El mapa regional de la anomalía magnética reducida al polo (Figura 6c) sólo muestra el efecto de los cuerpos magnetizados más profundos, siendo éstos marcados por anomalías de bajas frecuencias y, además, se continúa observando el bajo magnético en la parte central. El mapa del residual de la anomalía magnética total reducida al polo (Figura 6d) es la respuesta de los cuerpos magnetizados más someros, como los intrusivos del Cinturón de Intrusivos Candela Monclova en la parte norte. En el resto del mapa, donde la secuencia sedimentaria tiene un efecto magnético mínimo, constituye el reflejo de la parte más superficial del basamento cristalino.

### 5.2 Modelo (A–A´), diapiros despegados

El perfil (A–A´) es representativo, ya que permite observar seis estilos de plegamiento coexistiendo en el noreste de México:

1. el anticlinal de Los Muertos corresponde a un pliegue de despegue sobre evaporitas jurásicas;
2. el anticlinal Venado en la Cuenca de Parras, que sugiere ser un pliegue híbrido, donde primero se tuvo un pliegue de despegue y luego su flanco norte fue modificado por elevación de sal desarrollando un pliegue drape;
3. el sinclinal Delgado, desarrollado por evacuación de evaporitas;
4. el anticlinal Lobo o Gordo es un pliegue híbrido, donde posiblemente se formó una estructura halocinética por una pared de sal y fue posteriormente modificada durante la contracción a un pliegue de despegue con dos diapiros, uno en cada flanco del mismo (El Gordo y El Papalote);
5. la soldadura de la Popa, la cual se ha considerado una estructura halocinética (Giles y Lawton, 1999) por una pared de sal (pliegue La Popa), la cual evolucionó a una soldadura, la cual aflora en superficie; y por último
6. se propone una inversión de basamento el cual debe de ayudar al desarrollo de esta soldadura (Aranda-García *et al.*, 2008).

En el modelo se puede observar la secuencia sedimentaria del Mesozoico que descansa sobre la sal. Esta secuencia es alterada por las propiedades plásticas de la sal así como por su incompresibilidad, lo que originó la inversión de densidades presente en el área combinada con la presión litostática de esta secuencia, ocasionando la migración de sal hacia la periferia de la Cuenca de La Popa. Como se puede observar, las acumulaciones más importantes se

encuentran en los núcleos de algunos anticlinales como los de Potrero de García, Potrero Chico y Minas Viejas. En la parte del perfil que cruza la Cuenca de La Popa destacan los altos gravimétricos que muestran los diapiros El Gordo y El Papalote.

Según la revisión de trabajos previos (Giles y Lawton, 2002; Aranda-García *et al.*, 2008), dicho fenómeno se puede explicar como el efecto de una intensa evacuación de sal formando soldaduras secundarias debajo de estos residuos de evaporitas en superficie y, principalmente, debido al flujo de escombros arrastrados por el ascenso salino, sumado a la presencia de lentes carbonatados con relativamente alta densidad, ubicados debajo del desbordamiento en el flanco norte de los diapiros (Giles y Lawton, 2002). Además, en el modelo se ubica el basamento cristalino presente en el área de estudio, compuesto principalmente por esquistos y granitos (Figura 7).

### 5.3 Modelo (B–B´), anticlinales de despegue

El perfil (B–B´) está localizado al este de la Cuenca de La Popa, cruzando perpendicularmente los anticlinales de Potrero de García, Potrero Chico y Minas Viejas, los cuales representan pliegues de cobertera con despegue en las evaporitas jurásicas de la Formación Minas Viejas. Estructuras similares han sido reportadas en la Cuenca de Sabinas por Peterson-Rodríguez *et al.* (2008).

Para este modelo se utilizó el mapa de la anomalía de Bouguer, debido a que en éste las estructuras de interés son marcadas de manera clara por anomalías negativas de alta frecuencia, relacionadas a importantes acumulaciones de evaporitas en los núcleos de los anticlinales. Este efecto es contrario a lo observado en los diapiros El Gordo y El Papalote, abarcados por el modelo (A–A´), en donde fue necesario utilizar el residual de la anomalía de Bouguer para observar el efecto que las estructuras someras producían. Para el basamento se utilizó la anomalía magnética total.

El espesor de evaporitas que se esperaba modelar en el núcleo de los anticlinales era de más de 4 km. Ello, teniendo en cuenta que los núcleos de los anticlinales que abarca este perfil están erosionados y dentro de ellos existen afloramientos de evaporitas, combinado con los resultados del pozo Minas Viejas 1, el cual perforó una sección de evaporitas de 4500 m (Lawton *et al.*, 2001) y los valores bajos en el mapa residual de la anomalía de Bouguer acomodados en estas estructuras. Esto se comprobó en el modelo que se presenta en este trabajo, ya que el núcleo compuesto por evaporitas de los anticlinales Potrero de García y Potrero Chico están unidos y salen a superficie como dos ramificaciones de la principal acumulación de evaporitas. Esta acumulación muestra más de 5 km de espesor y una longitud de más de 4 km, la cual aumenta con la profundidad. El anticlinal Minas Viejas muestra en su núcleo, de igual manera, un espesor de más de 5 km y una longitud de 1-14 km (Figura 8).

En cuanto al basamento, en el modelo se comprobó

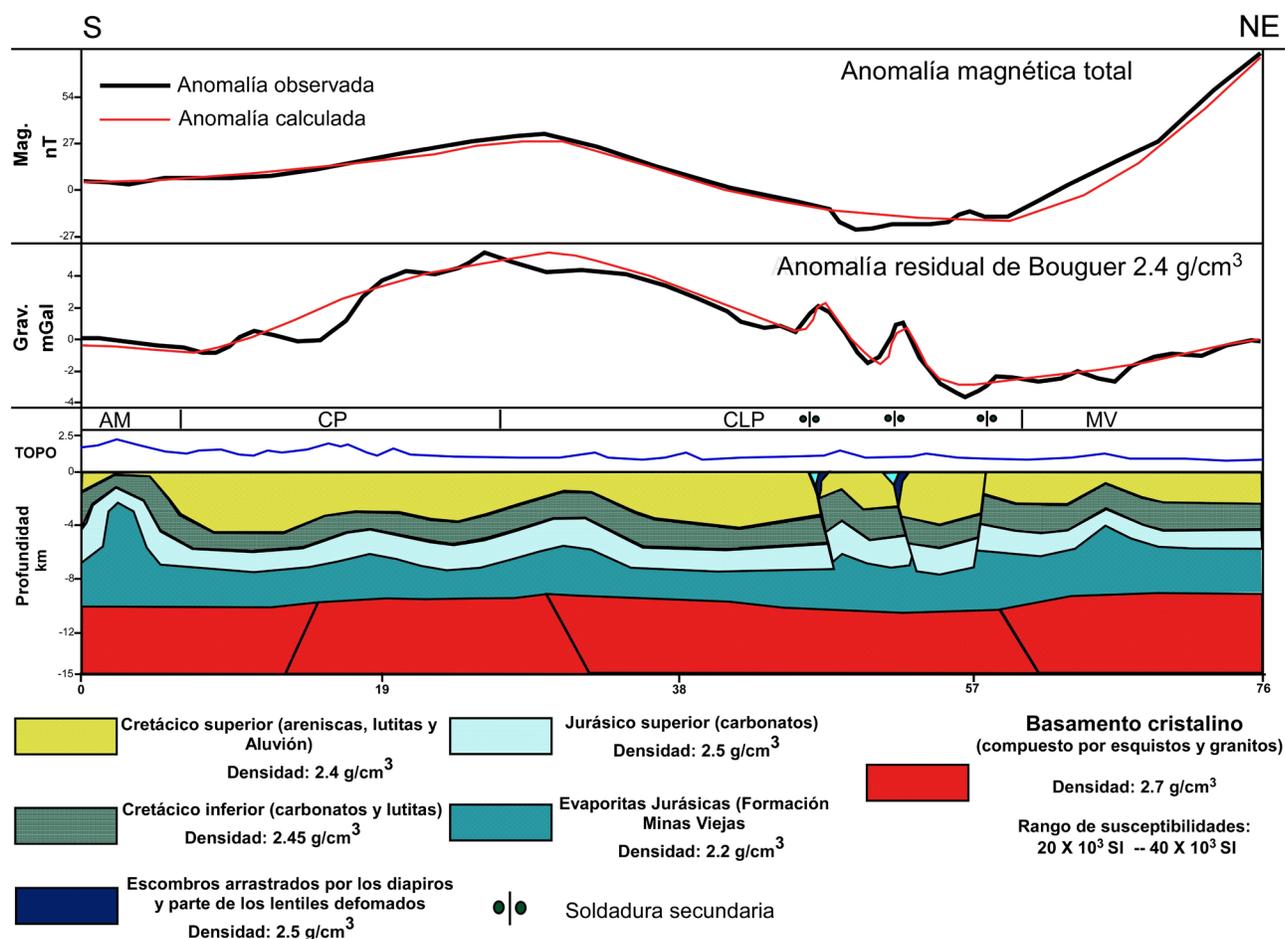


Figura 7. Modelo geológico-geofísico 2.5D (diapiros despegados), realizado por inversión de la anomalía magnética total y la anomalía residual de Bouguer 2.4 g/cm<sup>3</sup>. Abreviaturas: AM = anticlinal de los Muertos; CP = Cuenca de Parras; CLP = Cuenca de la Popa; MV = anticlinal Minas Viejas.

que la parte donde se ubican los anticlinales, al igual que la Cuenca de la Popa, representa una estructura que corresponde a un graben, estando compuesto principalmente por esquistos y granitos (Figura 8).

### 6. Conclusiones

El análisis cualitativo de datos de campos geofísicos potenciales, y su relación con las estructuras presentes en el área, mostró que algunos de los mínimos gravimétricos en el mapa residual de la anomalía de Bouguer se encuentran relacionados con las partes más altas topográfica y tectónicamente; en específico, con algunos anticlinales como los de Potrero de García, Potrero Chico y Minas Viejas. Como es bien conocido, el núcleo de los anticlinales representa una acumulación importante de evaporitas, por lo cual se propone que los mínimos gravimétricos se encuentran relacionados con las acumulaciones más importantes de sal en el área, como se comprobó en el modelo (B-B'). Estos mínimos se localizan en la periferia de la Cuenca de La Popa, por lo que se propone también

que dicha cuenca actuó como el depocentro de la sal y, posteriormente, la depositación de la secuencia sedimentaria mesozoica sobre la sal provocó una presión importante. Entonces, debido a que las evaporitas se comportan como un material plástico a la inversión de densidades y a la presión litostática, éstas migraron hacia la periferia de la Cuenca de La Popa. Evidencia de la importante evacuación de sal que ocurrió en la Cuenca de la Popa la constituyen los diapiros El Gordo y El Papalote. Para estos diapiros se concluye, en base al modelo (A-A'), que son diapiros despegados con escombros y lentes en sus bordes y parte inferior. Además, en la parte superficial del diapiro El Papalote se observan algunas inclusiones metaígneas. Por último, se ubicaron dos soldaduras secundarias debajo de los diapiros El Gordo y El Papalote, así como la soldadura que se encuentra en la parte norte de la Cuenca de La Popa, la cual aflora en superficie.

A partir del análisis magnético, se observó que la Cuenca de La Popa se encuentra limitada al norte y sur por altos magnéticos, y en los modelos se comprobó que esta estructura corresponde a un graben. Con lo anterior, se verificó la hipótesis de Aranda-García *et al.* (2008) quienes, en base a secciones estructurales y datos magnéticos,

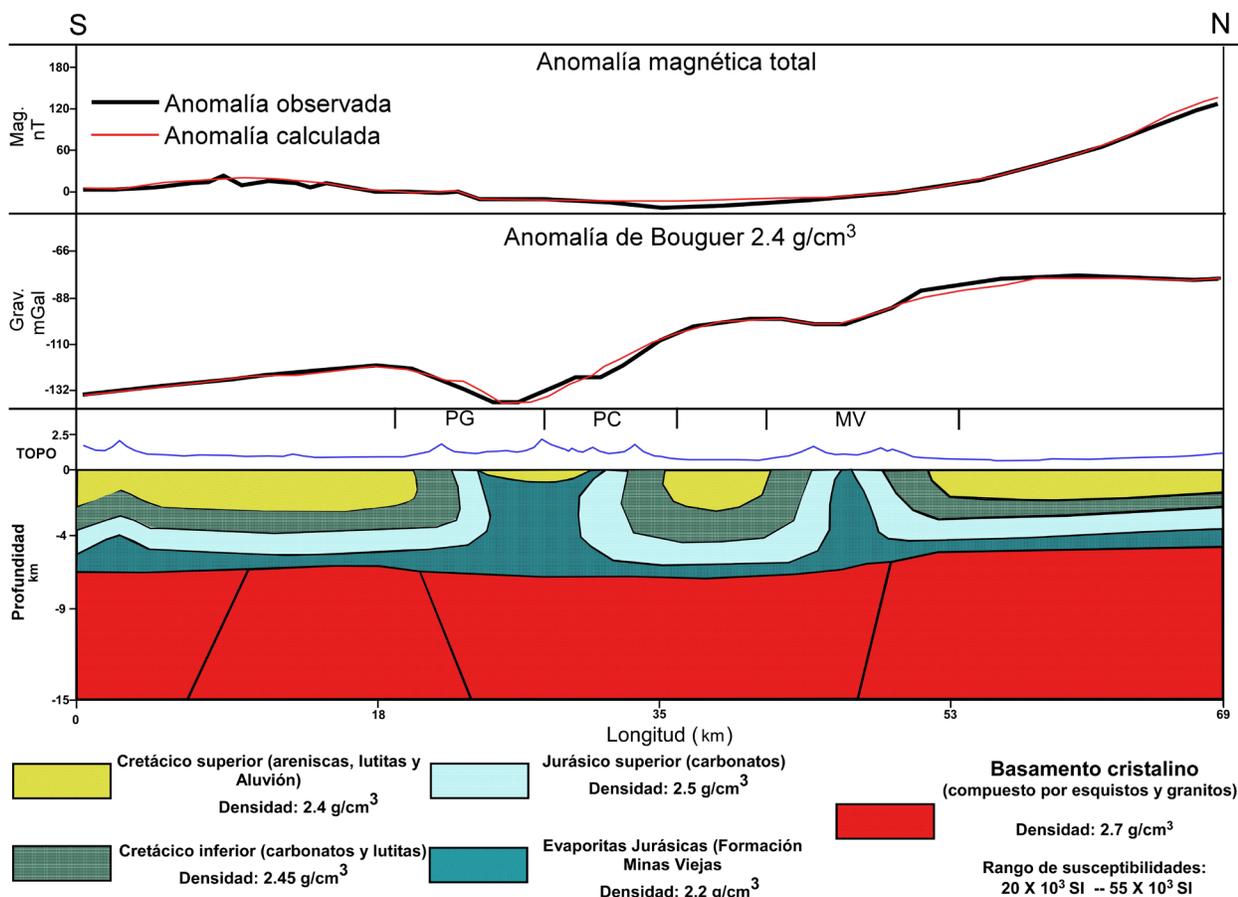


Figura 8. Modelo geológico-geofísico 2.5D (anticlinales de despegue), realizado por inversión de la anomalía de Bouguer  $2.4\text{ g/cm}^3$  y la anomalía magnética total. Abreviaturas: PG = Potrero de García; PC = Potrero Chico; MV = Minas Viejas.

ubicaron a la Cuenca de La Popa sobre un graben y, alternativamente, también la consideraron como una fosa jurásica.

La morfología del basamento, así como la variación de los espesores de la secuencia sedimentaria que se observaron en los modelos geológico-geofísicos, permiten visualizar de manera general algunas de las estructuras que combinan tectónica contraccional y halocinética en el área de estudio.

### Agradecimientos

Se agradece a PEMEX PEP, por el apoyo recibido y las facilidades de utilizar los datos gravimétricos presentados en este estudio, así como el uso de las instalaciones en Poza Rica, Veracruz. En especial, se agradece al Ing. Gerardo Basurto Borbolla por aprobar esta colaboración y al Dr. Pedro Tomas Gómez Cabrera por su apoyo incondicional desde el comienzo de este proyecto. También se agradecen las observaciones del Dr. Óscar Campos Enríquez y de un revisor anónimo, quienes fueron designados como árbitros para revisar este trabajo, contribuyendo significativamente a mejorar el manuscrito. Un agradecimiento especial a

quienes apoyaron esta investigación durante el desarrollo de este escrito: Dr. Ivan B. Lygin y a todo el Departamento de Gravimetría de la Universidad Estatal de Moscú por sus comentarios acerca de este proyecto, así como al Ing. Manuel Ángel Maldonado Leal, quien revisó el manuscrito.

### Referencias

- Albarrán, J.J., González-Pineda, J.F., Muñoz-Cisneros, R., Rosales-Rodríguez, J., 2008, Actualización petrológica del basamento cristalino de la cuenca de Sabinas, en Aranda-García, M., Peterson-Rodríguez, R.H. (eds.), Congreso Mexicano del Petróleo. Estructuras del Arco de Monterrey y cuenca de la Popa, en la Sierra Madre Oriental y sus analogías para la exploración de Hidrocarburos en el Golfo de México: Monterrey, Nuevo León, México, Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 130-135.
- Aranda-García, M., Eguiluz-de Antuñano, S., Peterson-Rodríguez, R.H., Chávez-Cabello, G., 2008, Estratigrafía Jurásico-Cretácica y estructuras del Arco de Monterrey de la Cuenca de La Popa en el Golfo de Sabinas, en Aranda-García, M., Peterson-Rodríguez, R.H. (eds.), Congreso Mexicano del Petróleo. Estructuras del Arco de Monterrey y Cuenca de la Popa, en la Sierra Madre Oriental y sus analogías para la exploración de Hidrocarburos en el Golfo de México: Monterrey, Nuevo León, México, Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 70-83.

- Bartolini, C., Mickus, K., 2001, Tectonic blocks, magmatic arcs, and oceanic terrains: A preliminary interpretation based on gravity, outcrop, and subsurface data, northeast-central Mexico, *en* Bartolini, C., Buffler, R.T., Cantú-Chapa, A. (eds.), *The western Gulf of Mexico basin - tectonics, sedimentary basins, and petroleum systems*: American Association of Petroleum Geologists Memoir, 75, 29-43.
- Blakely, R.J., 1995, *Potential theory in gravity and magnetic applications*: Cambridge, Reino Unido, Cambridge University Press, 441 p.
- Burger, H.R., 1992, *Exploration geophysics of the shallow subsurface*: New Jersey, E.U.A, Prentice Hall, 489 p.
- Charleston, S., 1981, A summary of the structural geology and tectonics of the state of Coahuila, Mexico, *en* Smith, C.I., Katz, S.B., (eds.), *Lower cretaceous stratigraphy and structure, northern Mexico*: West Texas Geological Society Publication, 81-74, 85-88.
- Chávez-Cabello, G., 2005, *Deformación y magmatismo cenozoico en el sur de la cuenca de Sabinas, Coahuila, México*: Juriquilla, Querétaro, México, Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias, tesis doctoral, 226 p.
- Consortium for Spatial Information, Consultative Group for International Agriculture Research (CGIAR-CSI), 2009, NASA Shuttle Radar Topographic Mission, United States Geological Survey, disponible en <<http://www.cgiar-csi.org>>, consultado 15 de enero de 2010.
- Dickinson, W.R., Lawton, T.F., 2001, Carboniferous to Cretaceous assembly and fragmentation of Mexico: Geological Society of American Bulletin, 113, 1142-1160.
- Echanove, E.O., 1965, Informe fotogeológico del área de Monterrey, Nuevo León, Hoja G-6, NEM-960: Petróleos Mexicanos, informe inédito, 125-145.
- Eguiluz de Antuñano, S., 2001, Geologic evolution and gas resources of the Sabinas basin in northeastern México, *en* Bartolini, C., Buffler, R.T., Cantú-Chapa, A. (eds.), *The western Gulf of Mexico basin - tectonics, sedimentary basins, and petroleum systems*: American Association of Petroleum Geologists Memoir, 75, , 241-270.
- Giles, K.A., Lawton, T.F., 1999, Attributes and evolution of an exhumed salt weld, La Popa basin, northeastern Mexico: *Geology*, 27, 323-326.
- Giles, K.A., Lawton, T.F., 2002, Halokinetic sequence stratigraphy adjacent to the El Papalote diapir northeastern Mexico: American Association of Petroleum Geologist Bulletin, 86, 823-840.
- Goldhammer, R.K., Johnson, C.A., 2001, Middle Jurassic-Upper Cretaceous paleogeographic evolution and sequence-stratigraphic framework of the northwest Gulf of Mexico rim, *en* Bartolini, C., Buffler, R.T., Cantú-Chapa, A. (eds.), *The western Gulf of Mexico basin - tectonics, sedimentary basins, and petroleum systems*: American Association of Petroleum Geologists Memoir, 75, 45-81.
- González Sánchez, F., Puente Solís, R., González Partida, E., Camprubí, A., 2007, Estratigrafía del noreste de México y su relación con los yacimientos estratoligados de fluorita, barita, celestina y Zn-Pb: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59, 43-62.
- Gray, G.G., Pottorf, R.J., Yurewicz, D.A., Mahon, K.I., Pevear, D.R., Chuchla, R.J., 2001, Thermal and chronological record of syn- to post-Laramide burial and exhumation, Sierra Madre Oriental, Mexico, *en* Bartolini, C., Buffler, R.T., Cantú-Chapa, A. (eds.), *The western Gulf of Mexico basin - tectonics, sedimentary basins, and petroleum systems*: American Association of Petroleum Geologists Memoir, 75, 159-181.
- Hudec, M.R., Jackson, M.P.A., 2007, Terra infirma: Understanding salt tectonics: *Earth- Science Reviews*, 82, 1-28.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2007, Carta geológica de México, escala 1:2000000: Aguascalientes, Aguascalientes, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.
- Latta, K.D., Anastasio, D.J., 2007, Multiple scales of mechanical stratification and décollement fold kinematics, Sierra Madre Oriental foreland, northeast Mexico: *Journal of Structural Geology*, 29, 1241-1255.
- Lawton, T.F., Vega, F.J., Giles, K.A., Rosales-Dominguez, C., 2001, Stratigraphy and origin of the La Popa basin, Nuevo Leon and Coahuila, Mexico, *en* Bartolini, C., Buffler, R.T., Cantú-Chapa, A. (eds.), *The western Gulf of Mexico basin - tectonics, sedimentary basins, and petroleum systems*: American Association of Petroleum Geologists Memoir, 75, 219-240.
- McBride, E.F., Weidie, A.E., Wolleben, J.A., Laudon, R.C., 1974, Stratigraphy and structure of the Parras and La Popa basins, northeastern Mexico: Geological Society of America Bulletin, 85, 1603-1622.
- McKee, J.W., Jones, N.W., Long, L.E., 1990, Stratigraphy and provenance of strata along the San Marcos fault, central Coahuila, Mexico: Geological Society of America Bulletin, 102, 593-614.
- Millán-Garrido, H., 2004, Geometry and kinematics of compressional growth structures and diapirs in the La Popa basin of northeast Mexico: Insights from sequential restoration of a regional cross section and three-dimensional analysis: *Tectonics*, 23, TC5011.
- Padilla y Sánchez, R.J., 1986, Post-Paleozoic tectonics of northeast México and its role in the evolution of the Gulf of México: *Geofísica Internacional*, 25, 157-206.
- Peterson-Rodríguez, R.H., Aranda-García, M., Alvarado-Céspedes, A.J., 2008, Etapas y estilos de deformación que desarrollaron trampas estructurales en el sector centro-oriental de la Cuenca de Sabinas Coahuila, México, *en* Aranda-García, M., Peterson-Rodríguez, R.H., (eds.), *Congreso Mexicano del Petróleo. Estructuras del Arco de Monterrey y Cuenca de la Popa, en la Sierra Madre Oriental y sus analogías para la exploración de Hidrocarburos en el Golfo de México. Guía de campo y artículos relacionados*: Monterrey, Nuevo León, México, Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 200-265.
- Pindell, J.L., Barrett, S.F., 1990, Geological evolution of the Caribbean region; A plate tectonic perspective (resumen), *en* Dengo, G., Case, J. (eds.), *The Geology of North America, v. H, The Caribbean Region*: Boulder, Colorado, Geological Society of America, 405-432.
- Pindell, J.L., Cande, S.C., Pitman III, W.C., Rowley, D.B., Dewey, J.F., Labrecque, J., Haxby, W., 1988, A plate-kinematic framework for models of Caribbean evolution: *Tectonophysics*, 155, 121-138.
- Rasmussen, R., Pedersen, L.B., 1979, End corrections in potential field modeling: *Geophysical Prospecting*, 27, 749-760.
- Reynolds, J.M., 1997, *An Introduction to applied and environmental geophysics*: Chichester, Reino Unido, John Wiley & Sons, 806 p.
- Reynolds, R.L., Rosenbaum, J.G., Hudson, M.R., Fishman, N.S., 1990, Rock magnetism, the distribution of magnetic minerals in the earth's crust, and magnetic anomalies in geological applications of modern aeromagnetic surveys: United States Geological Survey Bulletin, 1924, 24-46.
- Salvador, A., 1987, Late Triassic-Jurassic paleogeography and origin of Gulf of Mexico basin: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 71, 419-451.
- Talwani, M., Heirtzler, J.R., 1964, Computations of magnetic anomalies caused by two dimensional bodies of arbitrary shape, *en* Parks, G.A. (ed.), *Computers in the mineral industry, Part I*: Stanford, California, EUA, Stanford University Publications, Geological Sciences, 9, 464-480.
- Talwani, M., Worzel, J.L., Landisman, M., 1959, Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone: *Journal of Geophysical Research*, 64, 49-59.
- Tardy, M., 1980, *Contribution a l'étude géologique de la Sierra Madre Oriental du Mexique*: Paris, Université Pierre et Marie Curie, tesis doctoral, 445 p.
- Vega-Vera, F.J., Perrilliat, M.C., 1989, La presencia del Eoceno marino en la cuenca de La Popa (Grupo Difunta), Nuevo León: Universidad Nacional Autónoma de México, *Revista del Instituto de Geología*, 8, 67-70.
- Vega-Vera, F.J., Mitre-Salazar, L.M., Martínez-Hernández, E., 1989, Contribución al conocimiento de la estratigrafía del Grupo Difunta (Cretácico superior-Terciario) en el noreste de México: Universidad Nacional Autónoma de México, *Revista del Instituto de Geología*, 8, 179-187.
- Warren, J., 1999, *Evaporites: Their Evolution and Economics*: Oxford, Inglaterra, Blackwell Science, 438 p.

- Willis, J.J., Lock, B.E., Ruberg, D.A., Cornell, K.C., 2001, Field Examination of exposed evaporite-related structures, United States and Mexico: Relations to subsurface Gulf of Mexico examples (resumen) en Gulf Coast Association of Geological Societies, annual meeting: Shreveport, Louisiana, E.U.A., Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 51, 399-408.
- Wilson, J.L., 1990, Basement structural controls on Mesozoic carbonate facies in northeastern México – a review, en Contribuciones al Cretácico de México y América Central: Linares, Nuevo León, México, Universidad Autónoma de Nuevo León, Actas de la Facultad de Ciencias de la Tierra, 4, 5-45.
- Winker, C.D., Buffler, R.T., 1988, Paleogeographic evolution of early deep-water Gulf of Mexico and margins, Jurassic to Middle Cretaceous (Comanchean): American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 72, 318-346.
- Won, I.J., Bevis, M.G., 1987, Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: Algorithms and Fortran subroutines: Geophysics, 52, 232-238.
- Ye, H., 1997, The arcuate Sierra Madre Oriental orogenic belt, NE Mexico: Tectonic infilling of a recess along the southwestern North American continental margin, en Soegaard, K., Giles, K., Vega, F., Lawton, T. (eds.), Structure, stratigraphy and paleontology of Late Cretaceous-early Tertiary Parras-La Popa foreland basin near Monterrey, Mexico: Dallas, Texas, American Association of Petroleum Geologists, Field Trip 10, 82-115.
- Yutsis, V.V., Jenchen, U., de León-Gómez, H., Izaguirre Valdez, F., Krivosheya, K., 2009, Paleogeographic development of the surroundings of Cerro Prieto water reservoir, Pabillo basin, NE Mexico, and geophysical modeling of the reservoirs subsurface: Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, 253, 41-59.

Manuscrito recibido: Junio 5, 2009.

Manuscrito corregido recibido: Mayo 10, 2010.

Manuscrito aceptado: Junio 13, 2010.