



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL PLAY PALEOCENO WILCOX,
AREA CHINA- BARRILETE, NUEVO LEÓN, MÉXICO**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA – INGENIERÍA PETROLERA Y GAS
NATURAL**

P R E S E N T A:

HÉCTOR GILBERTO LÓPEZ CÉSPEDES

TUTOR:

DR. JOAQUÍN EDUARDO AGUAYO CAMARGO



2006



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

En la elaboración de la presente tesis, el autor expresa su agradecimiento a las siguientes personas:

Al Ingeniero Arturo Soto Cuervo, administrador del Activo Regional de Exploración Marina, de Petróleos Mexicanos, por haberme dado la oportunidad de cursar esta maestría.

A la Ingeniera María Alicia Cruz Rodríguez, Coordinadora de Prospectos del AREM, por darme las facilidades para concluir este trabajo.

Al Doctor Joaquín Eduardo Aguayo Camargo, mi director de tesis, por sus oportunos consejos en el transcurso de la elaboración de este trabajo. Sin la ayuda del Dr. Aguayo, la tarea habría sido más ardua.

A mis sinodales, los Profesores: M. en C. Noel Holguín Quiñones, Ing. Jaime Felipe León Islas, Ing. Miguel Juárez Casas y M. en I. Alfredo Fausto Treviño Rodríguez, por sus atinadas observaciones al contenido de la tesis.

A mis padres, que me han animado a superarme a lo largo de todos estos años. Para ellos todo mi cariño y agradecimiento.

A mi esposa Elba y a mis hijos Héctor David, Moisés y Ana, por haber permanecido junto a mi a lo largo de esta empresa. Ellos son la verdadera razón por la que sigo en el camino.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL PLAY PALEOCENO WILCOX ÁREA CHINA-BARRILETE, NUEVO LEÓN, MÉXICO

CONTENIDO

	Página
AGRADECIMIENTOS	4
RESUMEN	5
I INTRODUCCIÓN	6
I.1 Localización	6
I.2 Antecedentes y trabajos previos	7
I.3 Objetivos de la tesis	13
I.4 Marco geológico regional	14
• I.4.1 Clasificación de la cuenca	14
• I.4.2 Elementos tectónicos del Noreste de México	14
• I.4.3 Evolución tectonoestratigráfica de la Cuenca de Burgos	21
II DESARROLLO	29
II.1 Método de trabajo	29
II.2 Marcadores sísmicos	33
II.3 Estilo estructural	37
II.4 Elementos estructurales característicos	39
• II.4.1 Fallas lístricas normales	39
• II.4.2 Niveles de despegue y paquetes expandidos	48
• II.4.3 Clasificación de fallas	49

II.5 Descripción de secciones sísmicas	52
• II.5.1 Inline 450	53
• II.5.2 Inline 910	57
• II.5.3 Inline 1480	61
II.6 Construcción de secciones a profundidad	66
II.7 Restauración y balanceo estructural de secciones a profundidad	71
• II.7.1 Introducción	71
• II.7.2 Restauración estructural de la sección 910 (CB-25)	77
• II.7.3 Restauración estructural de la sección 1480 (CB-30)	85
III RESULTADOS	91
• III.1 Evolución estructural del área China-Barrilete	91
• III.2 Tabla de eventos tectonoestratigráficos para el área China-Barrilete	96
• III.3 Tipos de trampas y relación con probables plays del Paleoceno Wilcox en el área China-Barrilete	98
IV CONCLUSIONES	105
V BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	107

RESUMEN

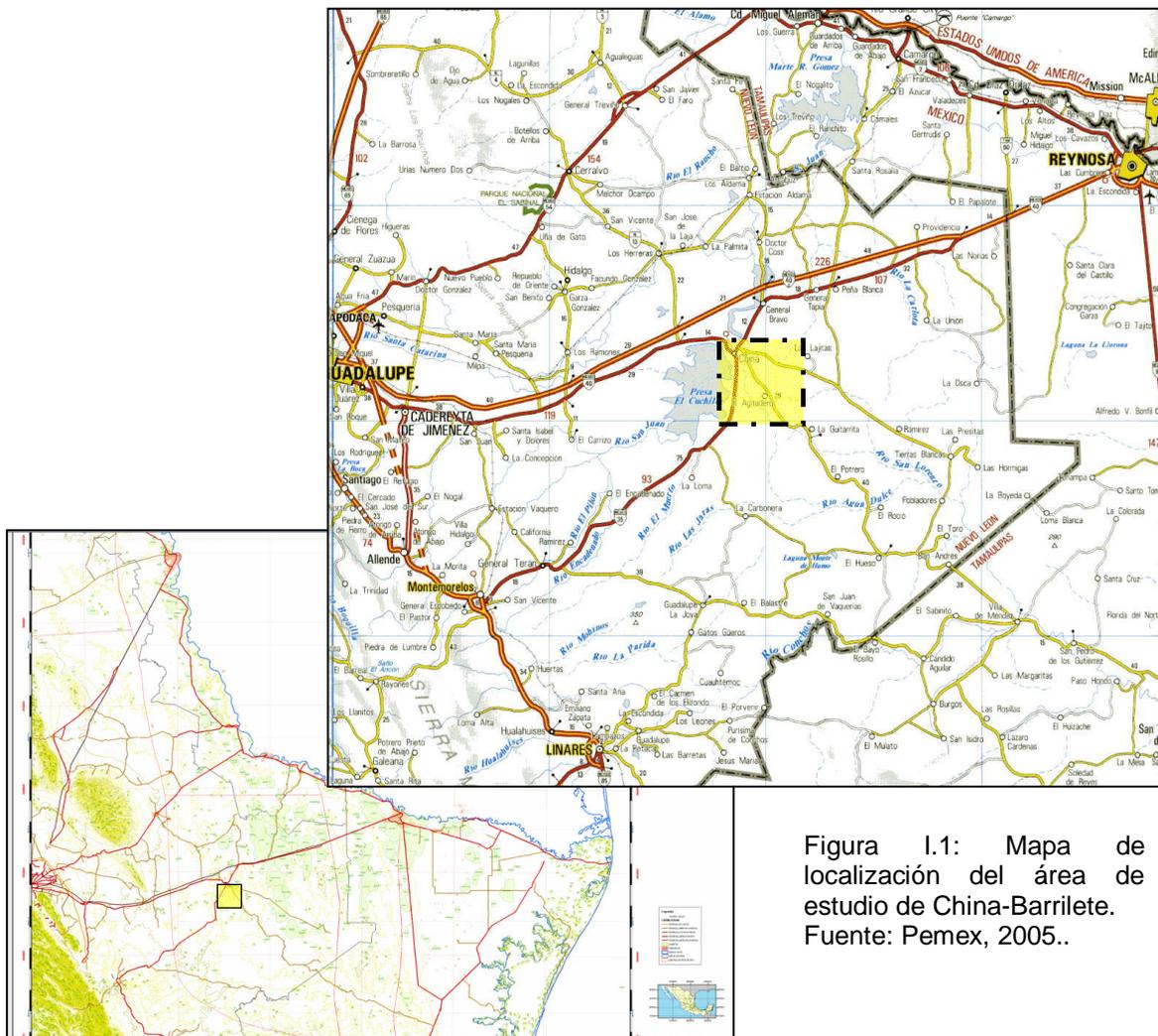
Se propone un modelo de evolución estructural para el Cenozoico y una jerarquización de trampas de hidrocarburos para las rocas del Paleoceno Superior en el área China-Barrilete del Oriente de Nuevo León, México con base en el análisis estructural a partir de interpretar imágenes sísmicas de reflexión. El estilo estructural del área es el de fallamiento normal despegado, donde la columna terciaria clástica, cuya posición estratigráfica abarca desde Paleoceno Inferior a Eoceno Superior, muestra deformación gravitacional en forma de fallas normales lítricas con nivel de despegue principal en las lutitas de la Formación Midway, causando desacoplamiento con respecto a la secuencia mesozoica y el basamento cristalino, que conforman un monoclinal con buzamiento hacia el oriente. Con base en la restauración y balanceo de dos secciones, se propone que la deformación ocurrió en tres etapas: en la primera, ocurrida en el Paleoceno Tardío, las fallas generaron rotación de la unidad Midway a favor del echado y el aporte sedimentario favoreció el desarrollo de cuñas sin-cinemáticas en la unidad Paleoceno Wilcox. La segunda etapa consistió en actividad episódica discreta de algunas fallas paleocénicas en el Eoceno Temprano y Medio, mientras que la última etapa reactivó la mayoría de las fallas paleocénicas por basculamiento regional proveniente del orógeno Iaramídico, que significó levantamiento y erosión de la plataforma clástica del Eoceno Tardío. La configuración estructural definitiva del área produjo dos tipos principales de trampas de hidrocarburos en la unidad Paleoceno Wilcox, localizadas en igual número de zonas: estratigráficas en forma de truncación erosional en bloque basculado, y estructurales-estratigráficas donde actuaron fallas de crecimiento con desarrollo de cuñas sin-cinemáticas susceptibles de contener cuerpos arenosos.

I INTRODUCCIÓN

I.1 Localización

El área de estudio está localizada en la porción oriental del estado de Nuevo León, aproximadamente a 100 kilómetros al Suroeste de la ciudad de Reynosa, Tamaulipas y colindando hacia el Oeste con la presa El Cuchillo (figura I.1). El nombre del estudio proviene del poblado de China, situado geográficamente en el extremo occidental del levantamiento sísmico tridimensional.

El área cubierta por el estudio sísmico es cercana a los 300 km².



I.2 Antecedentes y trabajos previos

Para realizar el presente estudio, se ha tenido primeramente que recurrir a un número de trabajos sobre aspectos tectónicos y estructurales que han sido publicados en años pasados sobre la Cuenca de Burgos, y que en mayor o menor medida fueron llevados a cabo a partir de información obtenida dentro del área de estudio o en zonas colindantes dentro de la misma cuenca. Teniendo en cuenta que son pocos los estudios que tratan con cierto detalle aspectos estructurales del Paleoceno Wilcox en la cuenca de Burgos, las fuentes consultadas resultan de gran ayuda para construir un primer modelo conceptual. Antes de pasar a comentar los aspectos particulares del estudio, conviene hacer una revisión de dichas fuentes.

La sub-provincia geológica que alberga la zona de estudio (fig. I.2) ha sido objeto de exploración de hidrocarburos desde principios del siglo veinte, pero es hasta la introducción de técnicas de visualización del subsuelo, como la sísmica de reflexión, que el entendimiento de la arquitectura de los materiales ha permitido replantear los modelos geológicos que benefician la exploración de hidrocarburos. Según López Ramos, 1981, la Cuenca de Burgos, una de las cinco sub-provincias que conforman la Provincia Geológica del Noreste de México, junto con la Sierra de Tamaulipas, la Sierra Madre Oriental, la Plataforma Burro-Picachos y la Cuenca Tampico-Misantla, se localiza en la porción Sur de la cuenca del Río Bravo (*Río Grande Embayment*), que se extiende desde el Sur de Texas hasta la actual planicie costera de la porción NE del estado de Tamaulipas, siendo sus límites geográficos: al Norte el Río Bravo, al Sur-Suroeste el Río Soto La Marina y

el extremo oriental de la Sierra de Cruillas, y al Oriente el Golfo de México. El límite occidental lo formaría una línea que, partiendo del flanco oriental de la mencionada Sierra de Cruillas pasara al oriente de Montemorelos y que siguiese hacia el Norte para terminar al poniente de Nuevo Laredo. Dicha línea representaría el contacto Cretácico-Eoceno que ha podido ser reconocido en afloramientos.

Ortiz y Tolson, 2004, citando a Yzaguirre, anotan que “la distribución de las rocas cenozoicas dentro de la cuenca, dependiendo de su edad, se restringe a la zona comprendida desde su área de afloramiento hacia el oriente, manifestando un echado regional y profundizando continuamente hacia el Este, además de un marcado aumento de espesor y una variación hacia facies de mayor batimetría”. Estos autores observan que el basamento y las rocas mesozoicas en la zona tienen un comportamiento similar, ya que profundizan gradualmente hacia el oriente, llegando a estar sepultadas profundamente hacia el centro de la cuenca. Como resultado de lo anterior, “hacia la zona central de la cuenca no se conocen de manera directa las características de las rocas cenozoicas más antiguas, de las rocas mesozoicas y las del basamento. Lo mismo sucede con el detalle de la arquitectura de la cuenca, que prácticamente no se manifiesta superficialmente, debido al bajo relieve de la zona y a las escasas y aisladas áreas de afloramiento. En consecuencia, tanto las características estratigráficas de las rocas que componen la cuenca como la estructura de ésta han sido descritas básicamente a partir de información sísmica y de pozo” (Fig. I.3).

De acuerdo con Echánove, 1976, 1986, “la Formación Paleoceno Wilcox se distribuye en forma de una franja con orientación aproximada Norte-Sur situada en

la margen occidental de la cuenca. En dicha franja se han identificado numerosas fallas y varias discordancias; la mayoría de las fallas son de gravedad, normales y con caída hacia la cuenca, y algunas se observan con caídas hacia el poniente, formando una serie de bloques complejos. Las fallas han sido

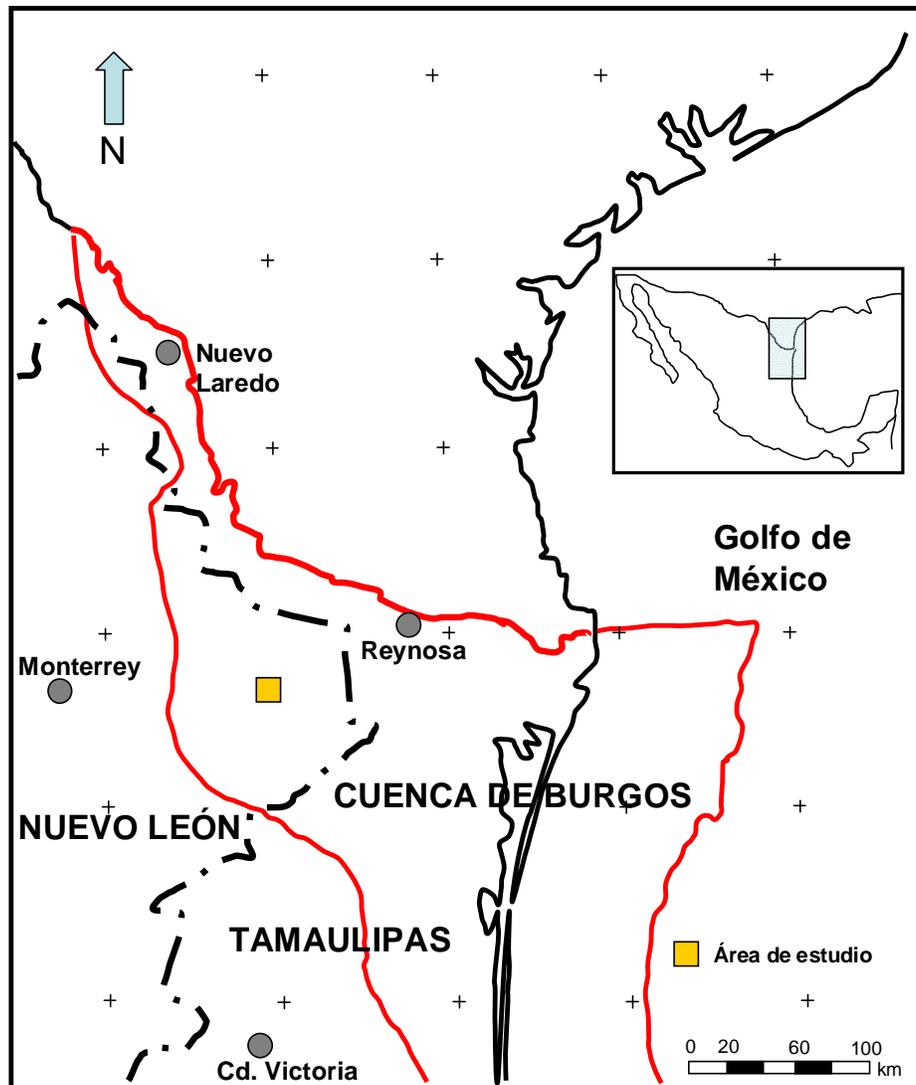


Figura I.2: Mapa de ubicación de la Cuenca de Burgos (contorno de color rojo). Modificado de Ortiz y Tolson, 2004.

identificadas tanto del tipo de crecimiento como post-depositacionales, con desplazamientos que varían entre unas decenas de metros hasta más de 600 metros”. El autor interpreta a la Formación Wilcox como “el producto de varios sistemas de barras con una marcada progradación de poniente a oriente, depositados sobre una plataforma amplia y extensa, de bajo relieve y en una etapa predominantemente regresiva”.

Ziga et al., 1999, consideran que “durante el Paleoceno, la existencia de una plataforma inestable con movimientos verticales y basculamientos, favoreció el desarrollo de fallas normales escalonadas al oriente. Para el Paleoceno Tardío, un evento regresivo provocado por una caída del nivel del mar, así como el ajuste regional del depocentro del Río Houston, dan lugar al desarrollo de cuerpos arenosos dentro de la secuencia arcillo-arenosa que constituye la Formación Wilcox”. Los autores apuntan que el inicio de la formación de fallas normales de crecimiento ocurre en el Eoceno Inferior, mientras que la actividad de este tipo de fallamiento se desplaza hacia el oriente de la cuenca en el Eoceno Medio-Superior.

Pérez Cruz, 1992, interpreta que un cuerpo de arcilla de gran espesor, conteniendo cuerpos arenosos de plataforma externa (la Formación Midway) se depositó en un marco tectónico del tipo margen pasivo durante el Paleoceno. El basculamiento suave de las rocas mesozoicas desencadenó la expansión moderada en torno a fallas de crecimiento con desarrollo hacia la cuenca (*“A thick shale containig outer platform sand bodies was deposited in a passive-margin tectonic setting during the Paleocene. Gentle eastward tilting of the top Cretaceous surface triggered moderate expansion along down-to-the-basin growth faults”*).

Para este autor, el depósito de cuerpos arenosos y arcillosos en el Eoceno Temprano y Medio, correspondientes a las formaciones Eoceno Wilcox, Queen City y Reklaw ocurrió en un margen pasivo caracterizado por fallas de crecimiento con desarrollo hacia la cuenca, las cuales tuvieron su nivel de despegue sobre la cima del Cretácico. Asimismo, el autor observa que algunas fallas normales de edad paleocénica fueron reactivadas en el Eoceno (*“lower to middle Eocene deposition of sand and shale of the Upper Wilcox, Queen City, and Reklaw formations took place in a passive margin setting characterized by down-to-the-basin growth faults which detached over the top of the Cretaceous surface. Some Paleocene normal faults were reactivated in the Eocene”*).

Hentz et al., 2004, proponen que “... la definición temprana de la proto-cuenca de Burgos tiene consecuencias importantes para la historia local de sedimentación. En esta cuenca se depositó la sal más antigua (posiblemente en el Calloviano), así como también la sección arcillosa del Cenozoico Inferior que se produjo en relación con la deformación y el levantamiento de edad laramídica del Arco de Tamaulipas. La carga sedimentaria posterior, desde el Oligoceno hasta el presente, dio como resultado la migración de este material hacia la cuenca y un cinturón de diapiros arcillosos activos y pasivos que define el margen moderno oriental de la cuenca”.

El área de estudio se sitúa en su mayor parte dentro de la franja de producción del Paleoceno, que se extiende desde los campos situados en el área de Nuevo Laredo hasta el sur de China, Nuevo León. El pozo Coli-1, localizado en el extremo oriental del estudio sísmico, ha sido registrado en reportes internos de PEMEX dentro del límite occidental de la franja de producción del Eoceno.

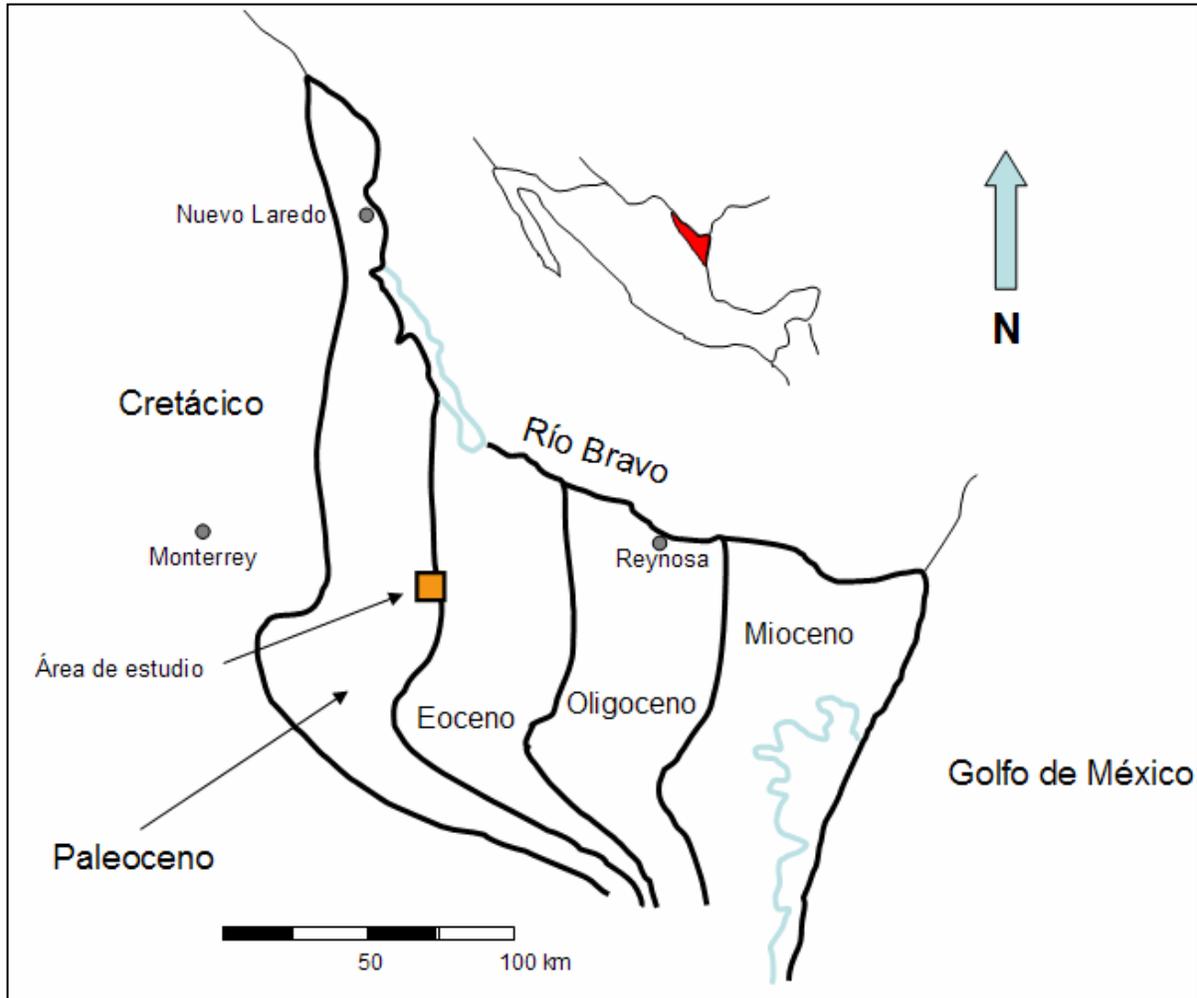


Figura I.3: División de la Cuenca de Burgos en “franjas” productoras de hidrocarburos, con la ubicación del área de estudio. Modificado de Echánove, 1986.

I.3 Objetivos de la tesis

Dentro de los objetivos que se plantearon al iniciar el presente trabajo se consideran los siguientes:

1.- Identificar las fallas principales presentes en la columna cenozoica, particularmente las que están relacionadas con el desarrollo de los bloques expandidos del Paleoceno Wilcox y, en caso de existir, el o los niveles de despegue sobre los que actuaron dichas fallas.

2.- Reconocer las etapas de deformación que sufrieron los materiales depositados en el área de estudio, especialmente los que tienen que ver con el desarrollo de las cuñas sedimentarias del Paleógeno.

3.- Interpretar un modelo conceptual que describa los fenómenos tectónicos ocurridos en el área de estudio, y que adicionalmente incluya un diagrama que ayude a ubicar la relación de éstos con el desarrollo de las cuñas sedimentarias desarrolladas en la Formación Paleoceno Wilcox.

4.- Proponer una división del área de estudio en zonas con características de la trampa comunes que permitan definir probables plays independientes bajo criterios estructurales.

I.4 Marco geológico regional

I.4.1 Clasificación de la cuenca

Bally y Snelson, 1980, *in* Allen y Allen, 1990, plantean una clasificación de cuencas sedimentarias basada en la posición de éstas con respecto a *mega-suturas* (zonas de subducción, generadoras de actividad orogénica con tectonismo compresional y lateral y que además producen actividad ígnea). De acuerdo con su esquema (figura I.4), la cuenca de Burgos forma parte de las cuencas localizadas sobre litósfera rígida y sin asociación directa con zonas de megasutura. Al subdividir este tipo de cuencas, se tiene una clasificación más fina, que incluye los **márgenes de tipo Atlántico** (plataforma, talud y cuenca), que descansan sobre corteza continental y oceánica y que adicionalmente están asociados con sistemas de rift ancestrales. Salvador, 1987, Goldhammer, 1999, y Pindell et al., 2004, han documentado los rasgos comunes de las cuencas que conforman el Golfo de México, incluyendo la Cuenca de Burgos, remarcando el rasgo ancestral compartido del *rift* del Triásico Superior-Jurásico Inferior.

I.4.2 Elementos tectónicos del Noreste de México

La compleja configuración estructural y estratigráfica que actualmente muestra la zona que engloba el área de estudio (la porción oriental de Coahuila, Nuevo León y buena parte del estado de Tamaulipas), es el resultado de una evolución tectónica que no ha sido entendida del todo (Pindell et al., 2004). Los diferentes autores que se han abocado a esta empresa han tratado de dividirla en diferentes

zonas con rasgos distintivos. Para el presente trabajo se toman en cuenta los estudios de Goldhammer, 1999, con sus provincias tectónicas principales, y de Pérez Cruz, 1992, que divide la región que comprende la cuenca de Burgos en sub-provincias.

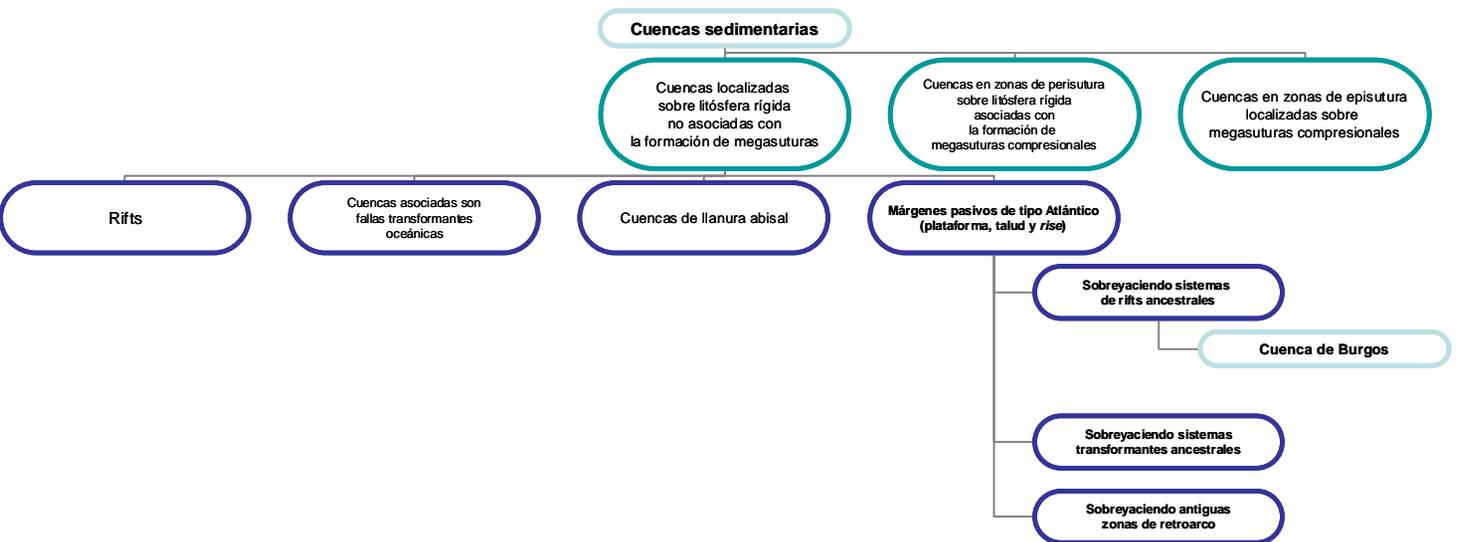


Figura I.4: La clasificación de Bally y Snelson, 1980, de las cuencas sedimentarias, incluyendo la posición de la Cuenca de Burgos dentro del grupo de cuencas de margen de tipo Atlántico. Modificado de Allen y Allen, 1990.

Goldhammer, 1999, enumera cuatro provincias estructurales principales que rodean a la Cuenca de Burgos (figura 1.5):

1.- El bloque Coahuila, un anticlinal dómico con rumbo SE que muestra deformación laramídica de baja intensidad principalmente en carbonatos del Cretácico. Este bloque somero del basamento rígido está soportado por cuerpos de granito y granodiorita del Carbonífero-Pérmico. En su porción occidental, aflora una potente sucesión de turbiditas y volcanoclásticos que posiblemente representa la continuación hacia el sur del cinturón orogénico Marathon-Ouachita, en forma de depósitos de arco-isla. El bloque de Coahuila permaneció como un alto de basamento durante todo el Mesozoico y no posee materiales que estén relacionados con el rift del Triásico Superior o con las evaporitas del Calloviano (Padilla, 1986).

2.- El cinturón de pliegues y cabalgaduras de la Sierra Madre Oriental, caracterizado por anticlinales alargados y napas limitadas por cabalgaduras, que al occidente de Coahuila y en Chihuahua muestran una orientación NW-SE, cambian a una orientación W-E en la zona de la Curvatura de Monterrey-Cuenca de Parras para pasar una vez más a NW-SE en la porción sur (plataforma de Valles-San Luis Potosí). La columna afectada por la deformación de edad laramídica (Cretácico Superior a Eoceno) incluye los materiales depositados en la cuenca a partir del Triásico Superior hasta el Cretácico Superior.

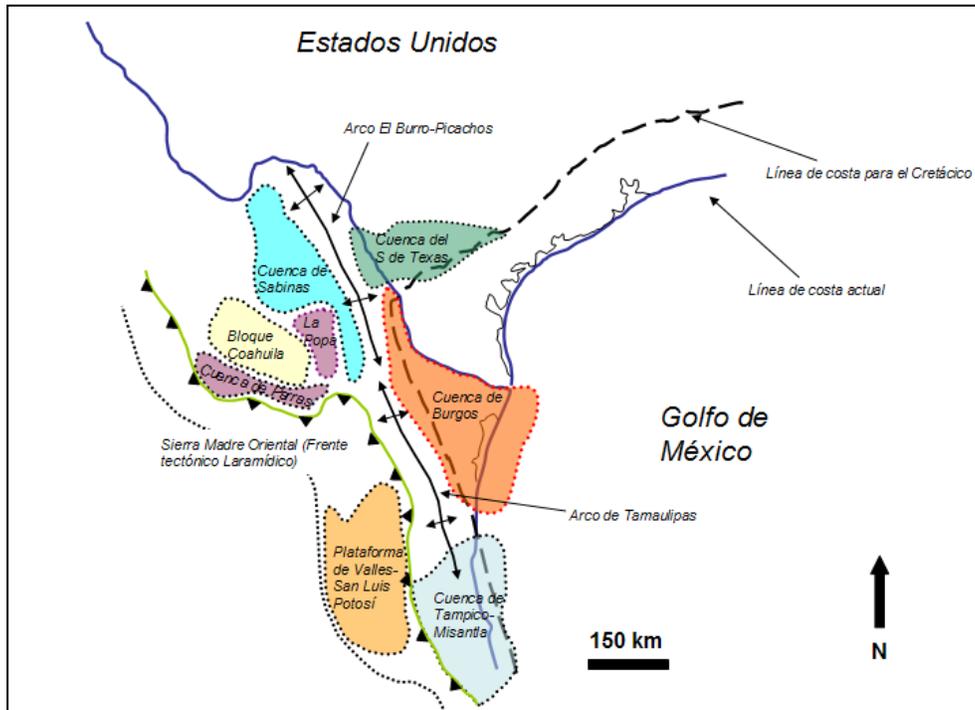


Figura 1.5: La división en provincias estructurales del Noreste de México. Modificado de Goldhammer, 1999.

3.- El cinturón plegado de Coahuila, conformado por varios anticlinales estrechos aislados con orientación NW-SE, separados por sinclinales amplios. La influencia en su desarrollo de las evaporitas de probable edad calloviana (la sal aparece nucleando la mayoría de las estructuras) es un factor común en todos los casos. Este grupo de estructuras incluye la Cuenca de Sabinas, localizada al N-NE del bloque de Coahuila; el arco de Burro-Picachos hacia el NW del extremo occidental de la Cuenca de Burgos, y el Arco de Tamaulipas al SE. En el caso de la Cuenca de Sabinas, el espesor de la columna alcanza los 6000 m y comprende estratos del Jurásico y Cretácico. La edad de formación común de las estructuras es laramídica.

4.- Las cuencas de antepaís del Cretácico, que incluye las cuencas de Parras y de La Popa. Ambas fueron zonas de acumulación de materiales siliciclásticos deltáicos y marinos someros en el Campaniano-Maastrichtiano y su estructuración es, al igual que la mayoría de los elementos del NE de México, de edad laramídica. Las estructuras de La Popa son levantamientos dómicos amplios, diapiros salinos y sinclinales por evacuación salina (Giles y Lawton, 2002).

Por su parte, Pérez Cruz, 1992, hace la diferenciación, dentro de la Cuenca de Burgos, de once regiones, basada en el estilo estructural dominante y en la fisiografía (figura I.6):

1.- Anticlinal de Salado (Arco de Burro-Salado).

2.- Sistema de fallas normales de Nuevo Laredo-Presa Falcón.

3.- Complejo estructural de Alemán-Camargo-Pobladores.

4.- Sierra de Picachos.

5.- Sierra Madre Oriental.

6.- Complejo de Higueras-Vaquerías.

7.- Complejo de Reynosa-La Purísima.

8.- Plataforma de la Laguna Madre-Tamaulipas.

9.- Sierra de San Carlos-Cruillas.

10.- Complejo del Río Conchos.

11.- Complejo de Temascal-Huapango.

De estas, se comentará brevemente acerca de las cuatro primeras, que a juicio del autor del presente trabajo son las más importantes para el entendimiento de la zona de estudio.

1.- Anticlinal de Salado (Arco de Burro-Salado)

Este anticlinal amplio y con orientación NW-SE marca el límite noroccidental de la Cuenca de Burgos, en el área de Nuevo Laredo, Tamaulipas, Su longitud en superficie es de cerca de 150 km y las rocas que afloran son de edad Cretácico Superior. Según el autor, se trata de un pliegue por cabalgadura que afecta al basamento y con vergencia hacia el SW, *y su origen se remonta a un evento de deformación compresiva post-paleocénica, dentro de los últimos pulsos de actividad orogénica que conformaron la Sierra Madre Oriental y el cinturón de Coahuila.*

2.- Sistema de fallas normales de Nuevo Laredo-Presa Falcón.

Las fallas normales que definen la estructura de esta zona, situada al NE del anticlinal de Salado (el arco de Burro-Picachos de Goldhammer), limitan un sistema de *grabens* con orientación NW, formado en el Eoceno Inferior, posterior a la etapa de desarrollo del anticlinal de Salado. Las fallas cortan estratos de edad paleocénica y cretácica y afectan los materiales del Jurásico en su parte más profunda, terminando, según interpretación del autor, en las evaporitas del Jurásico, lo cual las hace diferentes a la gran mayoría de las fallas normales en la zona de influencia de la Cuenca de Burgos, que tienen su nivel de despegue en o sobre el límite Cretácico-Terciario.

3.- Complejo estructural Alemán-Camargo-Pobladores

El comentario del autor a propósito de la estructura de esta área, a partir de imágenes sísmicas, es importante para apoyar las observaciones hechas en el presente trabajo:

“La porción central del área, localizada al sur de la Presa Falcón entre los ríos Bravo y Conchos, se caracteriza por mostrar un sistema de fallas lístricas de crecimiento con buzamiento preferencial hacia la cuenca (*down-to-the-basin listric growth faults*), las cuales están ligadas a divergencia (expansión) de los materiales que se depositaron en los bloques rotados durante la actividad tectónica de dicho sistema de fallas. *La edad del evento está datada como Paleoceno a Eoceno Inferior, anterior a la del periodo de compresión que deformó los materiales del anticlinal de Salado (Eoceno Medio), y que trajo como consecuencia el basculamiento y profundización del sustrato mesozoico y la erosión de los materiales de edad Eoceno Medio (Formación Queen City)*”.

4.- Sierra de Picachos

Las rocas de edad cretácica que afloran en la cresta de este rasgo, presentan orientación similar a las estructuras del arco de Salado y del cinturón de fallas y cabalgaduras de Coahuila (NW-SE). Al igual que el anticlinal de Salado, su origen está ligado al desarrollo de una cabalgadura profunda con vergencia hacia el SW, que afecta a los materiales del basamento en la zona y que estuvo activa en la última etapa de deformación laramídica en el noreste de México.

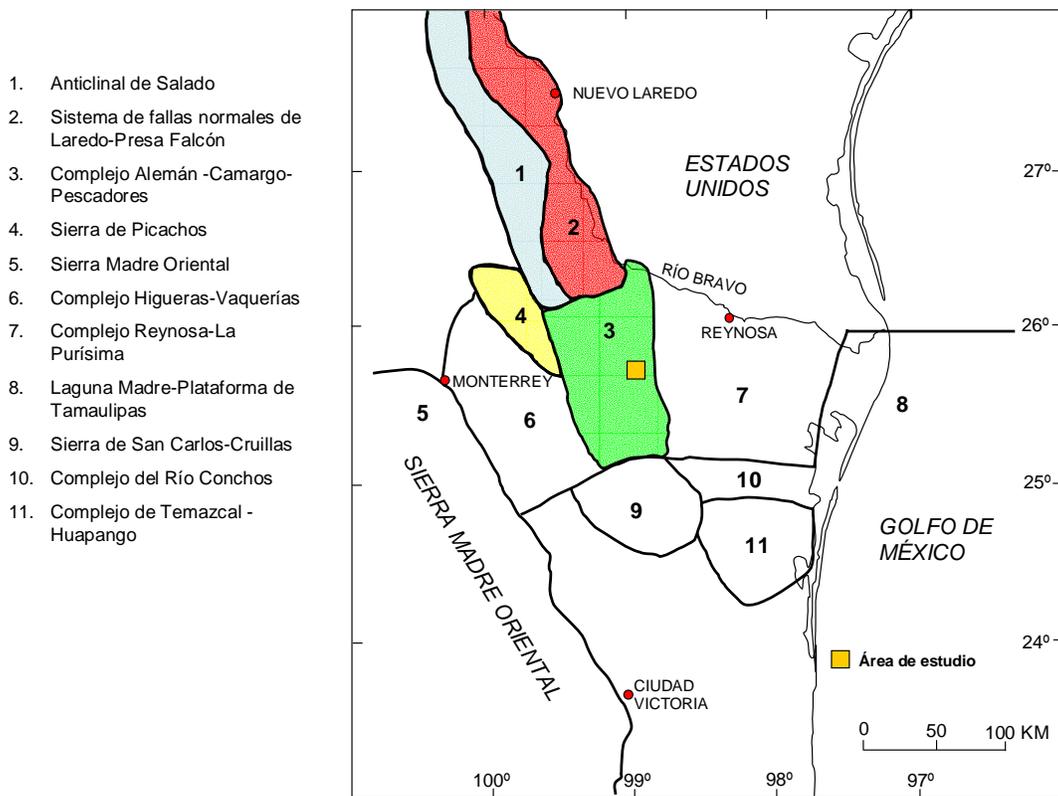


Figura I.6: La división de la Cuenca de Burgos en regiones con rasgos fisiográfico-estructurales distintivos. Se resaltan las regiones 1 (Anticlinal de Salado), 2 (Sistema de Fallas Normales de Laredo-Presa Falcón), 3 (Complejo Alemán-Camargo-Pescadores) y 4 (Sierra de Picachos), por su importancia para el entendimiento de la conformación estructural del área China-Barrilete. Modificado de Pérez Cruz, 1992.

I.4.3 Evolución tectonoestratigráfica de la Cuenca de Burgos

La sucesión de materiales que han sido depositados en la Cuenca de Burgos a lo largo de su desarrollo, nos habla de cambios significativos, tanto en la naturaleza y origen de dichos materiales como de las condiciones tectónicas en donde se ha llevado a cabo el depósito (figura I.7). De acuerdo con trabajos realizados en la zona (Echánove, 1976, 1986; Goldhammer, 1999; Pérez Cruz, 1992; Ziga et al., 1999; Galloway, 1989; Brown et al., 2004), el registro estratigráfico identificado en la zona de estudio refleja el depósito más o menos continuo de una potente

sucesión sedimentaria de naturaleza calcárea, calcáreo-arcillosa y areno-arcillosa representativa del Jurásico Medio-Superior, Cretácico y Terciario con espesores que llegan a superar los 9 km en las partes más profundas de la cuenca, y descansando discordantemente sobre metasedimentos o rocas cristalinas pre-jurásicas.

Basamento pre-Jurásico

Los materiales que constituyen el basamento de la Cuenca de Burgos han sido reconocidos hacia la porción occidental y sur-occidental de la zona e identificados en imágenes sísmicas y por métodos geofísicos potenciales en buena parte de la cuenca del Golfo de México. Han sido descritos como rocas de origen ígneo intrusivas (granitos y granodioritas) y metamórficas de origen sedimentario (pizarras y esquistos de bajo grado) de probable edad paleozoica. Pindell, *in* Goldhammer, 1999, expresa que los cuerpos intrusivos representan los restos de las “raíces” de un antiguo sistema de arco-islas desarrollado en tiempos permotriásicos, mientras que los metasedimentos probablemente sean el producto de antiguas zonas de depositación del antepaís de zonas de deformación ligadas al evento orogénico del que es resultado el Cinturón Marathon-Ouachita.

Triásico Superior-Jurásico Medio

Echánove, 1986, ubica discordantemente sobre las rocas basamentales a los materiales que conforman el **Grupo Huizachal** (Formaciones **La Boca** y **La Joya**), que consisten en areniscas, lutitas y conglomerados de coloración rojiza, producto de la sedimentación en los grabens del rift de apertura del proto-Atlántico (Triásico Superior a Jurásico Medio).

A partir del Calloviano y continuando hasta el Oxfordiano, se tiene el registro de masas de evaporitas (Formación **Minas Viejas**, equivalente a la Formación **Salt Louann** del Sur de Texas y de la cuenca del Mississippi), interpretadas en su origen como producidas por repetidos eventos de transgresión marina en zonas más o menos marginales del antiguo margen del proto-Atlántico (Salvador, 1987).

Jurásico Superior

El desarrollo de la Cuenca de Burgos como un gran depocentro inicia con la depositación de evaporitas (Formación **Metate**) seguidas por carbonatos sobre una extensión de relieve suave sujeta a una subsidencia moderada durante el primer evento de transgresión marina generalizada en el Oxfordiano y Kimmeridgiano Temprano. En torno a los desarrollos carbonatados se localizaron las acumulaciones de sedimentos terrígenos y evaporíticos costeros (Formaciones **Novillo**, **Zuloaga** y **Olvido**). El fenómeno de subsidencia se acentúa para la última etapa del Jurásico Tardío (Kimmeridgiano y Tithoniano), provocando la inundación de las rampas carbonatadas (Padilla, 1986; Zwanziger, 1979). El origen de este evento de subsidencia ha sido interpretado por diversos autores (de Cserna, 1979;

Araujo Mendieta y Arenas, 1986) como relacionado con el avance hacia oriente del frente deformado del arco de Sinaloa, que provocó la acumulación de terrígenos con altas concentraciones de materia orgánica en una cuenca con un sustrato progresivamente más profundo (Formaciones **Pimienta, La Caja y La Casita**).

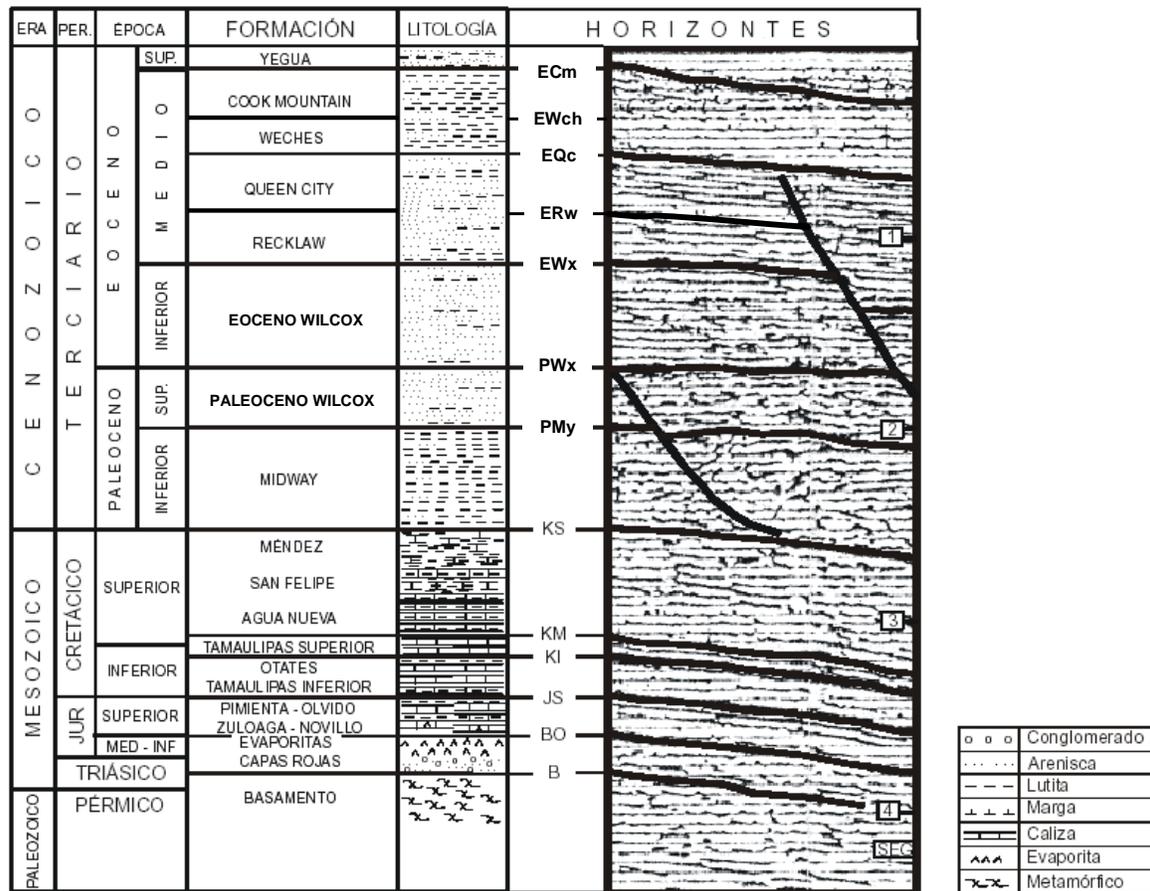


Figura I.7: Columna estratigráfica representativa del área China-Barrilete. Modificado de Ortiz y Tolson, 2004.

Cretácico

Pérez Cruz, 1992, sintetiza la sucesión estratigráfica depositada entre el Berriasiano y el Maastrichtiano dentro de la Cuenca de Burgos:

1.- Deposición de margas y lutitas en el Berriasiano-Valanginiano (Formación **Taraises**), considerada como la facies de mar abierto desarrollada hacia el oriente de los ambientes de depósito marinos marginales de la Cuenca de Sabinas (formaciones **Barril Viejo** y **La Casita**).

2.- Los sistemas carbonatados de Cupido-Tamaulipas Inferior y de Aurora-Tamaulipas Superior, desarrollados a partir del Hauteriviano y hasta el Cenomaniano Temprano, terminando ambos en un evento de inundación. El primero de estos sistemas se desarrolló en el Hauteriviano y Aptiano Inferior e incluye las formaciones **Cupido** de calizas masivas de plataforma, y su equivalente de aguas más profundas representado por la formación **Tamaulipas Inferior**, conformada por mudstone y wackestone depositados en un medio ambiente de talud suave y cuenca.

El segundo de los sistemas carbonatados plataforma-cuenca (Albiano Inferior) está representado por el mudstone gris claro de plataforma de la formación **Aurora** y por el mudstone arcilloso y wackestone con nódulos y lentes de pedernal de la **Tamaulipas Superior**.

3.- Deposición de un sistema de carbonatos y lutitas de aguas profundas en el Cenomaniano Superior y en el Santoniano (formaciones **Agua Nueva**, **Eagle Ford**, **San Felipe** y **Austin**), producto, según Goldhammer, 1999, de un evento de

inundación eustático (highstand) que llegó a conectar el Golfo de México con el mar interior de las Montañas Rocallosas.

4.- Deposición de una potente sucesión de margas y lutitas de aguas profundas correspondiendo al Campaniano y Maastrichtiano (Formación **Méndez**), ligada al inicio de la actividad tectónica de la fase de deformación laramídica.

Cenozoico

Paleoceno.- La actividad tectónica de la fase de deformación laramídica en América del Norte, ocurrida entre el Maastrichtiano y Eoceno, produjo cambios en el gradiente regional de la antigua plataforma carbonatada mesozoica. La deformación compresiva que provocó deformación y levantamiento de una franja del cratón norteamericano favoreció el desarrollo de una zona de antepaís en la porción situada al oriente del orógeno (Feng y Buffler, 1996). El intemperismo y la erosión de los terrenos deformados desde el interior del continente transformaron la naturaleza de los sedimentos que rellenaron las cuencas peri-continenciales, las cuales alojaron cantidades crecientes de materiales clásticos en zonas tectónicamente inestables donde se registraba basculamiento. La actividad tectónica en la zona causó movimientos epeirogénicos y basculamientos, que favorecieron la formación de sistemas de fallas lítricas normales de crecimiento con rumbo norte-sur, contemporáneas a la sedimentación. Este conjunto de depresiones, que *grosso modo* se desarrollaron paralelas al cinturón orogénico, son conocidas hoy en día como las Cuencas Terciarias del Oriente de México, e incluyen, además de la Cuenca de Burgos, las cuencas de Tampico-Misantla, la

de Veracruz, y las llamadas Cuencas del Sureste (Salina del Istmo, Comalcalco y Macuspana). La fuente de los materiales que rellenaron la incipiente cuenca de Burgos fueron los terrenos elevados tectónicamente de la Sierra Madre Oriental, de los anticlinales de Salado y Picachos, del Arco de Tamaulipas y de la Cuenca de Sabinas (Galloway et al., *in* Salvador, 1991), situadas hacia el occidente de la zona de acumulación. Algunos autores han interpretado que después de la caída del nivel del mar que marcó el final del Cretácico, ocurrió un episodio de trasgresión marina que afectó la Cuenca de Burgos durante el Paleoceno Inferior, durante el cual se depositó un paquete de naturaleza principalmente arcillosa (la Formación Midway), que en algunas partes se puede observar cubriendo en forma discordante a la cima erosionada del Cretácico. Según Echánove, 1976, el Paleoceno en la Cuenca de Burgos “se distingue por una secuencia arcillo-arenosa con aisladas intercalaciones de cuerpos arenosos tabulares, representada por la Formación **Midway** y la parte inferior de la Formación **Wilcox**”. El medio ambiente de depósito interpretado para la Formación Midway es de nerítico medio a externo con la presencia de barras, mientras que para la Formación Wilcox la regresión marina genera sistemas de barras progradantes hacia el oriente; sin embargo, han sido interpretados ambientes más profundos (abanicos de talud y piso de cuenca) en la parte basal de la Formación Midway, así como desarrollos arenosos dentro de la parte inferior de la Wilcox, alojados en los bloques expandidos producidos por fallas normales lístricas de crecimiento.

Eoceno.- La unidad correspondiente a la parte inferior del Eoceno (Wilcox superior o **Eoceno Wilcox** en este estudio) se interpreta como producida en una

fase progradante de areniscas y lutitas en un medio ambiente costero. Las formaciones que componen el Grupo Mount Selman, **Reklaw**, **Queen City** y **Weches**, además de la Formación **Cook Mountain**, son consideradas por Ziga et al., 1999, como producto de un evento regresivo con ciclos transgresivos menores, en el que el aporte sedimentario provenía de los ríos Bravo y Houston, y conteniendo sucesiones de lutitas, limolitas y areniscas en ambientes de depósito que variaban desde nerítico interno a externo.

La unidad formacional más joven identificada en el área China-Duna está representada por las areniscas deltaicas intercaladas con lutitas y limolitas de la Formación **Yegua**, reconocida como parte de una secuencia regresiva.

II DESARROLLO

II.1 Método de trabajo

El presente estudio se basó principalmente en información sísmica de reflexión obtenida originalmente en forma digital (figura II.1). Dicha información fue validada por el intérprete en sísmica y cargada en formato digital en estaciones de trabajo situadas en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. A partir de una interpretación preliminar en estación de trabajo utilizando el software de aplicación Petrel, en el que se trazaron las fallas principales en líneas sísmicas orientadas W-E (*inlines* o líneas) y en menor número en líneas con orientación perpendicular (*crosslines* o trazas), se produjeron cortes en tiempo constante mostrando la zona bajo el atributo sísmico de coherencia, que permite ver zonas de “contraste” dependiendo del grado de disarmonía estructural, que en un corte horizontal permite identificar trazas de falla como líneas de tonalidad oscura que pueblan el área. De esta manera, se pudo tener un control más fino de las trazas de falla en zonas donde la información sísmica no era lo suficientemente clara para permitir una interpretación coherente de las trazas. Después de contar con una interpretación preliminar de las fallas que definen la estructura, y de las fallas subsidiarias a estas, se interpretó la posición del reflector que representa la cima de la Formación Paleoceno Wilcox en las líneas sísmicas. Para llevar a cabo esta labor, se partió de la posición del marcador definido por el equipo de intérpretes en estratigrafía del grupo de trabajo en varios pozos exploratorios localizados dentro del área, y de la expresión característica de dicho reflector, en los casos que fue

posible seguirlo con suficiente certeza. Las restantes cimas formacionales que han registrado las columnas cortadas por la perforación (desde la cima del Cretácico Superior hasta los materiales más jóvenes que afloran en la zona, y que corresponden a la Formación Yegua del Eoceno Superior), fueron incluidas en la interpretación en sísmica con el fin de contar con una imagen de la estructura lo más completa posible y poder estar en condiciones de preparar las secciones en profundidad en la siguiente etapa del trabajo.

La elaboración de las secciones estructurales a profundidad se llevó a cabo en estación de trabajo a partir de secciones sísmicas seleccionadas como representativas de la estructura en el área de estudio. Para ello se contó con el software de modelado estructural GeoSec 2D, en el que además de preparar las secciones iniciales a partir de líneas sísmicas en tiempo doble, se convirtió a profundidad utilizando velocidades de intervalo obtenidas de la información de los pozos en el área. Partiendo de los resultados de la conversión a profundidad de las secciones, se comprobó la viabilidad de la interpretación estructural por medio de la técnica de restauración y balanceo estructural de dos secciones escogidas.

El objetivo final de las actividades mencionadas fue contar con los datos suficientes para preparar una carta o diagrama que muestre en forma clara y concisa la evolución estructural del área de estudio a partir del análisis de la actividad de las fallas, de la restauración de las zonas plegadas, paquetes que muestren expansión y de las discontinuidades asociadas a dicha actividad (figura II.2).

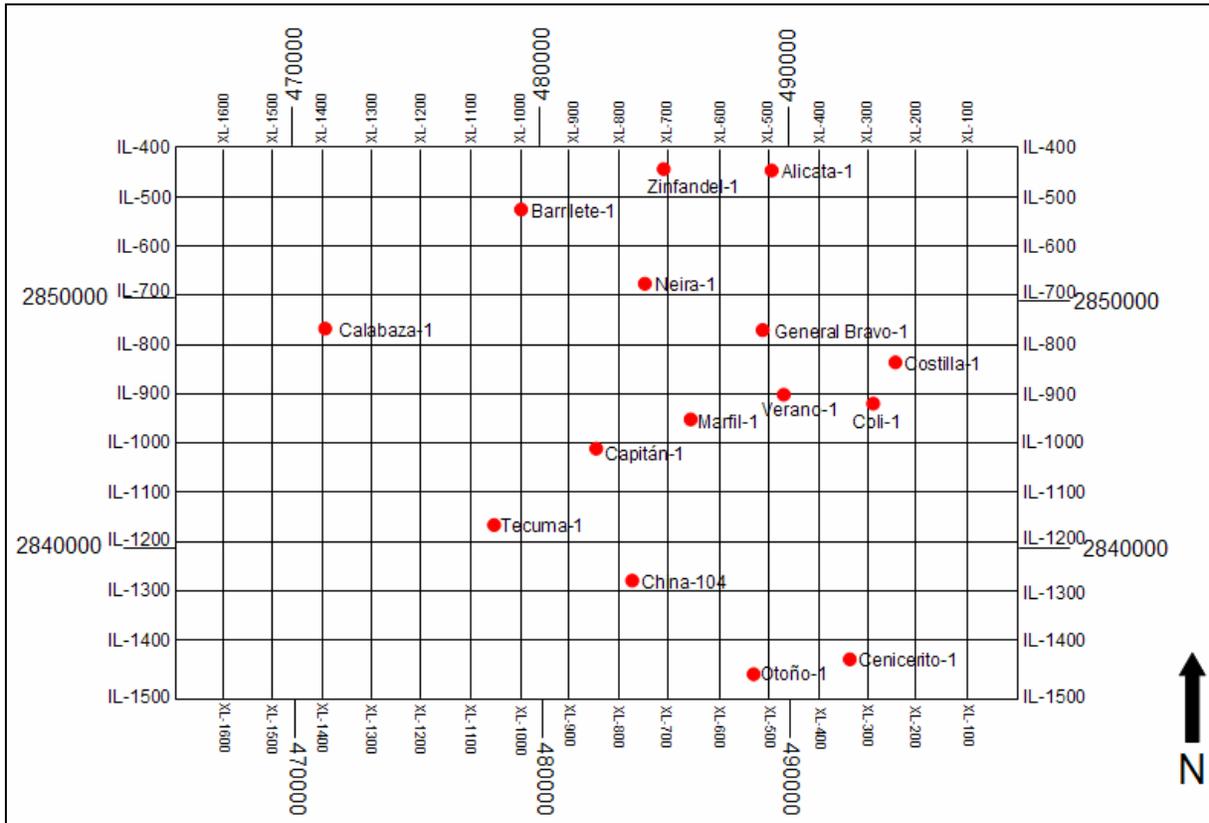


Figura II.1: La información sísmica a partir de la cual se realizó la interpretación estructural provino del cubo sísmico China-Duna. La imagen muestra la posición de los pozos exploratorios dentro del área de estudio.

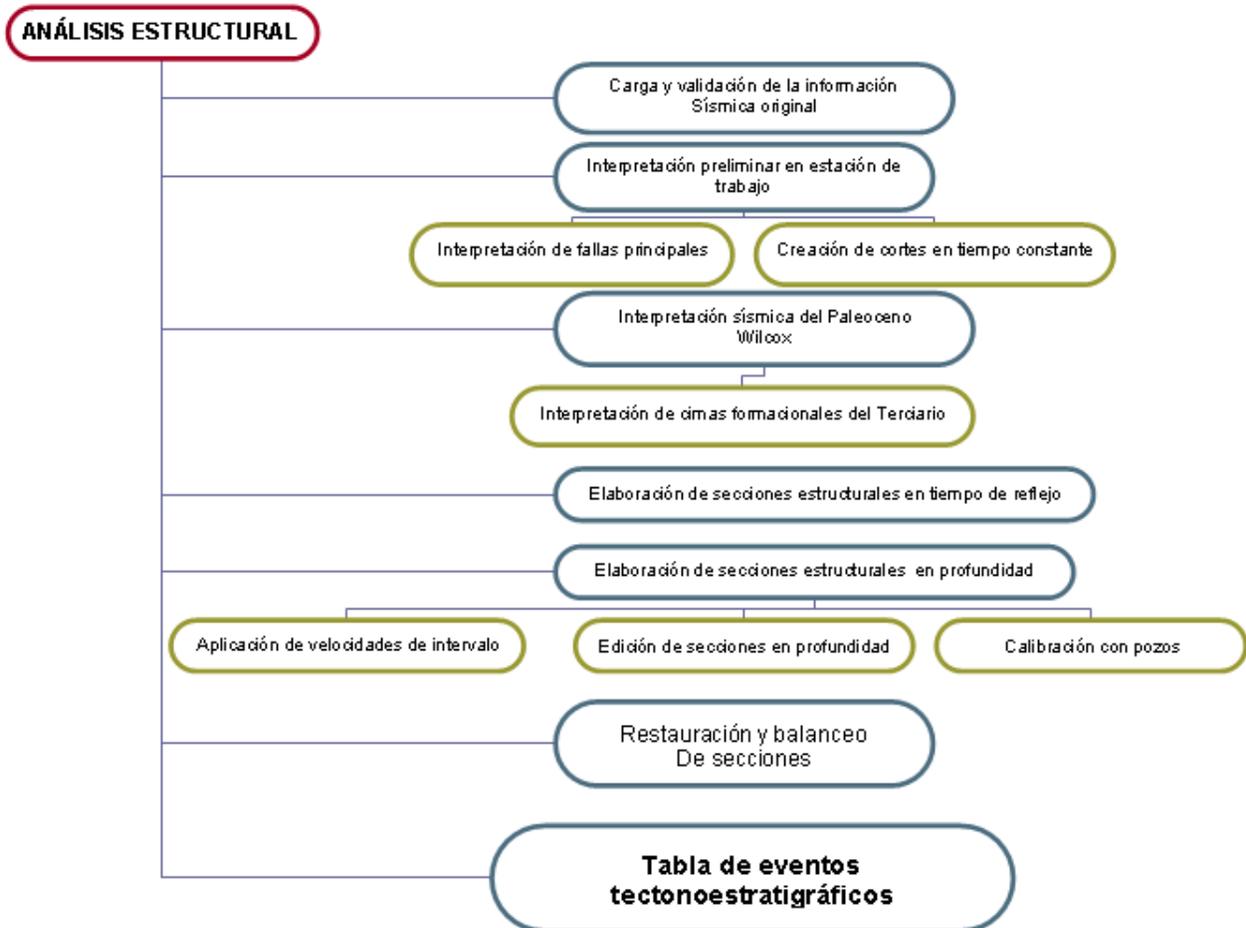


Figura II.2: Diagrama que representa el flujo de trabajo del análisis estructural para el área China-Barrilete.

II.2 Marcadores sísmicos

Al iniciar el proyecto, una de las labores que significó un buen número de horas de trabajo coordinado para el equipo de estratígrafos del grupo fue la definición, de acuerdo al modelo conceptual inicial, de los marcadores cronoestratigráficos que ayudarían a ajustar la correlación de los horizontes sísmicos. Sin embargo, es necesario aclarar que el término *definición* tiene que ver específicamente con revisar la posición original de marcadores cronoestratigráficos derivados de la presencia de microfósiles (figura II.3), además de realizar correlaciones entre pozos valiéndose del comportamiento de curvas de registro (principalmente la curva del potencial espontáneo o su equivalente en rayos gamma, combinada con curvas que registren resistividad) y tratar de establecer un marco de verisimilitud o coherencia con respecto a la posición de los reflectores en sísmica. El caso del marcador Paleoceno Wilcox, correspondiente a una edad absoluta de la cima del Thanetiano de 54.8 Ma, según la datación vigente en el Activo de Exploración Burgos, era especialmente crítico, ya que se advirtió que existía inconsistencia entre la posición del marcador entre pozos tomando en cuenta la posición de los fósiles índice *Morozovella velascoensis* y *Vaginulinopsis tuberculata*. En consecuencia, se decidió tomar como criterio primario la expresión característica de la “entrada” del Paleoceno Wilcox en registros geofísicos de pozo, particularmente cuando las curvas mostraban un aumento de arcillosidad con respecto al comportamiento de los materiales comparativamente más arenosos de la unidad Eoceno Wilcox (figura II.4). Adicionalmente, la expresión sísmica de la cima del Paleoceno Wilcox, en las partes donde era posible correlacionarla con

certeza razonable, disminuyó la incertidumbre al asignarle una posición correlacionable dentro del volumen sísmico.

De esta manera, fue posible definir el marco estratigráfico en el área de estudio para nueve pozos exploratorios que se distribuyen en las tres zonas estudiadas con detalle dentro del estudio. En tres de ellos (Marfil-1, Capitán-1 y Neira-1) fue posible confirmar la posición de la cima del Cretácico Superior (figura II.5).

CAPITAN-1 Sección Centro	3700	Queen City Aflora	Queen City Aflora	Zona Planctónicos: Morozovella subbotinae Zona Bentónicos: Lenticulina Cultrata Nerítico Interno A 2115 m Paleoceno Wilcox Zona Planctónicos: Morozovella velascoensis Zona Bentónicos: Vaginulinopsis tuberculata Nerítico Medio A 3080 m Paleoceno Midway Tritaxia Midwayensis Nerítico Medio Distal - Externo
		E. Reklaw 452 m	E. Reklaw 452 m	
MARFIL-1 Sección Centro	3976	E. Wilcox 1029 m	E. Wilcox 1029 m	A 2020 m Paleoceno Wilcox Zona Planctónicos: Morozovella angulata Nerítico Medio A 2630 m Paleoceno Midway Tritaxia Midwayensis Nerítico Medio Distal - Externo
		E. Queen City 198 m	E. Queen City 198 m	
VERANO-1 Sección Centro	3520	E. Reklaw 836 m	E. Reklaw 836 m	Nucleo 1 A 2718 - 2274 m Paleoceno Midway Nucleo 2 A 2888 - 2897 m Paleoceno Midway
		E. Wilcox 1275 m	E. Wilcox 1275 m	
		P. Wilcox 1855 m	P. Wilcox 1855 m	
		P. Midway 2273 m	P. Midway 2638 m	
		K. Méndez 3409 m	K. Méndez 3409 m	
OTOÑO-1 Sección Sur	3358	E. Cook Mountain Aflora	E. Cook Mountain Aflora	No hay Datos
		E. Weches 114 m	E. Weches 114 m	
CENICERITO-1 Sección Sur	3500	E. Queen City 198 m	E. Queen City 198 m	A 1825 m Eoceno Wilcox Zona Planctónicos: Morozovella subbotinae Zona Bentónicos: Vaginulinopsis hatchetigbeensis Nerítico Interno A 2255 m Paleoceno Wilcox Zona Planctónicos: Morozovella velascoensis angulata Zona Bentónicos: Vaginulinopsis tuberculata Nerítico Medio A 2875 m Paleoceno Midway Zona Planctónicos: Morozovella Unicinata Zona Bentónicos: Tritaxia Midwayensis Nerítico Medio Distal - Externo
		E. Reklaw 836 m	E. Reklaw 836 m	
		E. Wilcox 1275 m	E. Wilcox 1275 m	
		P. Wilcox 1855 m	P. Wilcox 1785 m	
		P. Midway 2273 m	P. Midway 2380 m	
		E. Cook Mountain aflora	E. Cook Mountain aflora	
		E. Weches 472 m	E. Weches 500 m	
		E. Queen City 563 m	E. Queen City 563 m	
		E. Reklaw 1217 m	E. Reklaw 1217 m	
		E. Wilcox 1890 m	E. Wilcox 1628 m	
		P. Wilcox 2110 m	P. Wilcox 2185 m	
		P. Midway 2645 m	P. Midway 2600 m	

Figura II.3: La definición de la posición de los marcadores sísmicos para el proyecto se apoyó en los datos originales proporcionados por PEMEX, además de las adecuaciones realizadas por los especialistas del grupo de trabajo (columnas de tonalidad azul). Ejemplos de las porciones central y sur del área de estudio.

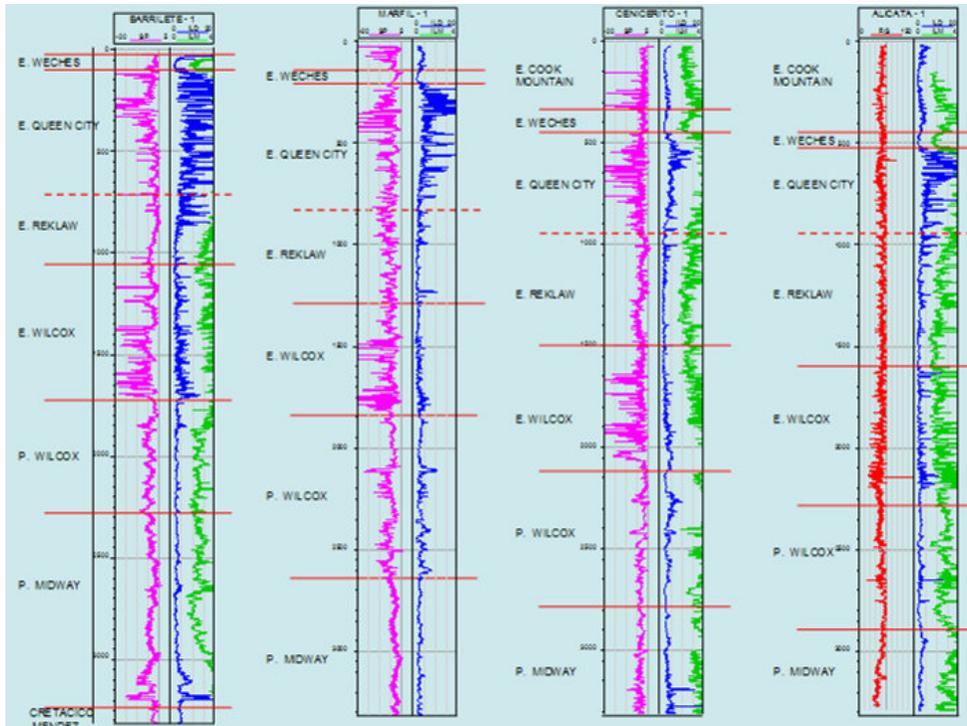


Figura II.4: Ejemplo de correlación de cimas formacionales donde el criterio primario es la respuesta característica de los paquetes sedimentarios del Terciario en registros de pozo. Obsérvese la expresión de la cima del Paleoceno Wilcox.

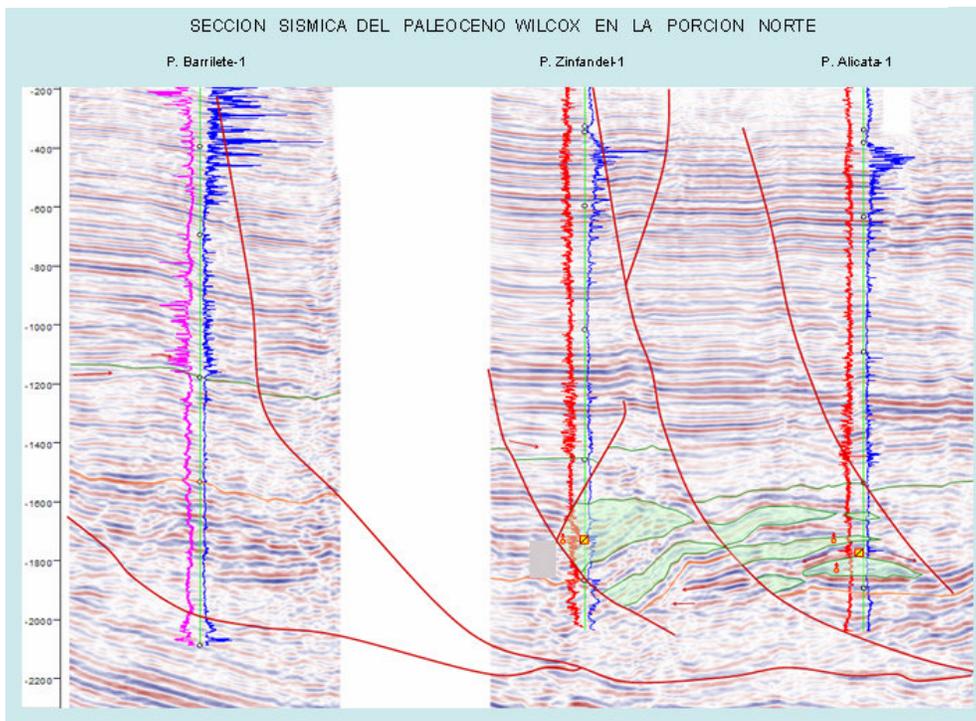


Figura II.5: La correlación del horizonte PWx, basado en la expresión sísmica de la discontinuidad que representa la cima del Paleoceno Wilcox en el área China-Barrilete, se reforzó al incluir los registros de pozo que mostraron las *entradas* características de las formaciones terciarias.

II.3 Estilo estructural

La clasificación propuesta por Lowell y Harding, 1979, *in* Lowell, 1990, para los distintos estilos estructurales que han sido identificados en provincias petroleras de todo el mundo (figura II.6), es tomada en cuenta para el presente trabajo, a partir del criterio primario de la evidencia a favor o en contra del involucramiento del basamento en el desarrollo de las estructuras. Los criterios adicionales son la fuerza que provoca la deformación (extensión, compresión, carga diferenciada y contraste de densidades para los casos donde las estructuras se desarrollan sobre el basamento), y la modalidad de transporte tectónico (desplazamiento convergente y divergente; flujo vertical y horizontal).

La cuenca de Burgos, dentro de este esquema de clasificación, incluye estructuras que pueden clasificarse dentro de los estilos **conjunto de fallas normales** (normal fault assemblage) y **estructuras de lutita** (shale structures), que poseen un nivel de despegue que coincide con materiales altamente dúctiles situados dentro de la sucesión de materiales sedimentarios. El basamento pre-Jurásico, constituido probablemente por rocas cristalinas, y los materiales de edad mesozoica (el *basamento cinemático* de Hentz et al., 2004) no toma parte en la deformación que ocurre a partir del nivel de despegue de la base del Paleoceno Midway.

Las fallas primarias más comunes dentro del estilo **conjunto de fallas normales** son fallas gravitacionales con desplazamiento normal del tipo *down-to-the-basin* (Hamblin, 1965), dirigidas hacia zonas más profundas de la cuenca, que se desarrollan en litologías dúctiles y presentan una relación estrecha entre

desplazamiento y sedimentación. En estas, los espesores de los paquetes se incrementan de manera abrupta en el bloque activo de la falla. Este tipo de fallas normales sin-depositacionales son muy comunes en secuencias regresivas clásticas no-confinadas, tales como sistemas deltáicos y límites de plataformas continentales en márgenes pasivos.

CONJUNTO DE FALLAS NORMALES	ESTRUCTURAS DE LUTITA	ESTILO ESTRUCTURAL
EXTENSIÓN	CONTRASTE DE DENSIDAD CARGA DIFERENCIADA	FUERZA DE DEFORMACIÓN DOMINANTE
DESPLAZAMIENTO A FAVOR DE ECHADO, DESDE SUB-HORIZONTAL HASTA DE ÁNGULO ALTO, DE LÁMINAS, CUÑAS Y LÓBULOS SEDIMENTARIOS	FLUJO VERTICAL Y HORIZONTAL DE LUTITA MÓVIL CON ARQUEAMIENTO Y/O PENETRACIÓN DE LA CUBIERTA SEDIMENTARIA	MODALIDAD DE TRANSPORTE TECTÓNICO DOMINANTE
<ul style="list-style-type: none"> •FALLAS LÍTRICAS NORMALES •FALLAS ANTITÉTICAS •ANTICLINALES ROLLOVER EN BLOQUES ACTIVOS •SECCIONES EXPANDIDAS 	<ul style="list-style-type: none"> •BLOQUES ERRÁTICOS •MASAS DE LODO 	ELEMENTOS ESTRUCTURALES PRINCIPALES
CURVILÍNEO - BIFURCACIONES Y COALESCENCIAS	SOLITARIOS	TENDENCIAS REGIONALES DOMINANTES
ANTICLINALES DE TIPO ROLLOVER	PLIEGUES NUCLEADOS POR LUTITA	TRAMPAS PRINCIPALES
POSICIÓN EN LA PLACA		
MÁRGENES PASIVOS - DELTAS	MÁRGENES PASIVOS-DELTAS	PRIMARIOS
LÍMITES CONVERGENTES - LÍMITES TERRESTRES DE TRINCHERAS	LÍMITES TRANSFORMES	SECUNDARIOS

Figura II.6: Detalle de la clasificación de estilos estructurales de Lowell y Harding, 1979, haciendo énfasis en las características de los dominios estructurales denominados Conjunto de fallas normales y Estructuras de lutita, ambos presentes en la Cuenca de Burgos, con especial aplicación al primero en el área China-Barrilete. Adaptado de Lowell, 1990.

II.4 Elementos estructurales característicos

II.4.1 Fallas lístricas normales

Prácticamente la totalidad de las fallas cuya naturaleza puede ser identificada en el área de estudio pueden ser clasificadas como fallas lístricas normales, sean éstas post-depositacionales o de crecimiento (Cloos, 1968; Edwards, 1976; Bally et al., 1989; Shelton, 1984; Ortiz-Ubilla y Tolson, 2004), aunque el grado de desarrollo de su geometría cóncava sea muy variable, al igual que su periodo de actividad. Antes de describir su distribución, es conveniente hacer un recuento de las principales características de este tipo de elementos estructurales.

Según Bally et al., 1989, el término *falla lístrica* fue introducido por E. Suess en 1924 al describir cierto número de superficies de falla con forma curvada cóncava que afloraban en los distritos carboníferos de Bélgica, Alemania y el norte de Francia. Esta geometría llevó a crear el término **lístrico** (figura II.7) a partir del vocablo *listron* (*pala* en griego antiguo), aunque es necesario aclarar que Suess se refería originalmente a fallas *inversas* lístricas, algunas de las cuales estaban de hecho redefinidas. Sin embargo, un gran número de fallas normales lístricas habían sido identificadas al mismo tiempo por los geólogos que trabajaban en las mismas cuencas carboníferas de Europa, aunque no eran nombradas de esa forma. A partir de la década de los 1960's, con la publicación de los trabajos pioneros de Hamblin, 1965; Cloos, 1968; Edwards, 1976, y Crans et al., 1980, entre otros, se documentaron los aspectos geométricos y cinemáticos del fallamiento lístrico normal.

En sentido estricto, una falla lítrica normal es una falla normal que muestra disminución del echado conforme se desarrolla a profundidad. En provincias donde es frecuente la presencia de paquetes arcillosos o salinos, esta geometría puede llegar a presentarse si se cuenta con cierto número de condiciones (Shelton, 1984), que son inherentes al episodio de formación de la falla:

1.- Aumento de la ductibilidad en un prisma sedimentario, que generalmente contiene lutita o sal sobre-presurizadas, que provoca extensión de las capas de “sobrecarga” por fluidez o despegue del “substrato”.

2.- Aumento de la ductibilidad en la corteza (con extensión del substrato dúctil).

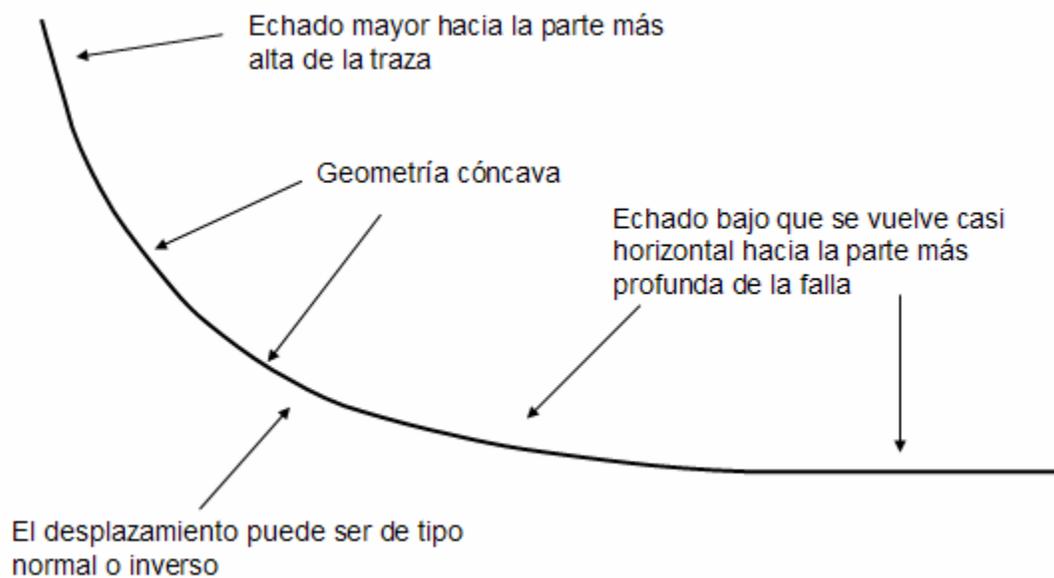


Figura II.7: Las características básicas de una falla lítrica. Nótese que el término *lítrico* se refiere sólo a la forma cóncava de la traza. Modificado de Hatcher, 1995.

Lowell, 1990, argumenta que, en su forma más simple, el fallamiento lítrico normal puede ser considerado como un fenómeno gravitacional de arrastre de materiales sedimentarios que requiere de una zona de extensión situada “echado arriba” que se conecta eventualmente con una zona de compresión “echado abajo”. Ejemplos de este fenómeno han sido descritos en la cuenca del Golfo de México en zonas afectadas por tectónica salina (Peel et al., 1995; Rowan et al., 1999, 2004), y se han documentado ejemplos relacionados con paquetes arcillosos en las Cordilleras Mexicanas situadas costa fuera de Veracruz (Bally, 1983), además de haberse estudiado tales sistemas *ligados* en la cuenca de Campeche en paquetes del Terciario (Vargas et al. 2003).

La presencia de numerosos cuerpos diapíricos arcillosos (algunos de ellos descritos por Hentz et al., 2004), localizados hacia el oriente del área China-Barrilete, en las franjas productoras del Oligoceno y Mioceno dentro de la Cuenca de Burgos, es otro ejemplo de la conexión entre una zona de la corteza que ha sufrido el fenómeno de extensión y su culminación compresiva en el “pie” del sistema localizado en zonas más alejadas del borde de la plataforma.

Dentro del tipo de fallas lítricas normales, las fallas de crecimiento (Edwards, 1976) se desarrollan por fallamiento contemporáneo a la sedimentación y se caracterizan por mostrar un aumento abrupto en el espesor de los estratos (capa sin-cinemática o contemporánea al desplazamiento del bloque) en el bloque caído o activo de la falla (fig. II.8). Un rasgo distintivo de las fallas de crecimiento son los pliegues anticlinales de tipo **roll-over** formados por **arrastre invertido** (*reverse drag*, Hamblin, 1965). Los pliegues anticlinales *roll-over* (Schlische, 1995) se

forman a lo largo de fallas de crecimiento, donde la parte del bloque caído cercana a la falla muestra mayor caída que la parte más alejada de esta. La forma que presentan es convexa hacia arriba, lo cual tiene que ver con el fenómeno **de arrastre invertido** (figura II.9) en contraposición al **arrastre normal** que produce **pliegues de arrastre** que forman parte de las fallas normales de geometría planar en general, cuyos bloques de falla caídos presentan forma cóncava hacia arriba en la cercanía de los planos de falla. La formación de pliegues anticlinales *roll-over* es posible gracias a la naturaleza plástica de los materiales poco consolidados en ambos bloques de falla y a la cantidad creciente de estos materiales dentro del paquete expandido contemporáneo al fallamiento, que al rellenar los “vacíos” creados por el desplazamiento del bloque activo o caído, causan un efecto de empuje a lo largo del plano que favorece el arrastre a favor del echado, o **arrastre invertido**.

En la porción norte de la cuenca del Golfo de México, el movimiento producido a lo largo de las fallas de crecimiento está dirigido hacia el interior de la cuenca; como resultado de esto, las fallas tienden a formar patrones regionales arqueados y escalonados que son concéntricos a la posición de los sistemas deltáicos que se han desarrollado en el Cenozoico en esa parte de la cuenca (Ewing *in* Bally et al., 1991; figura II.10).

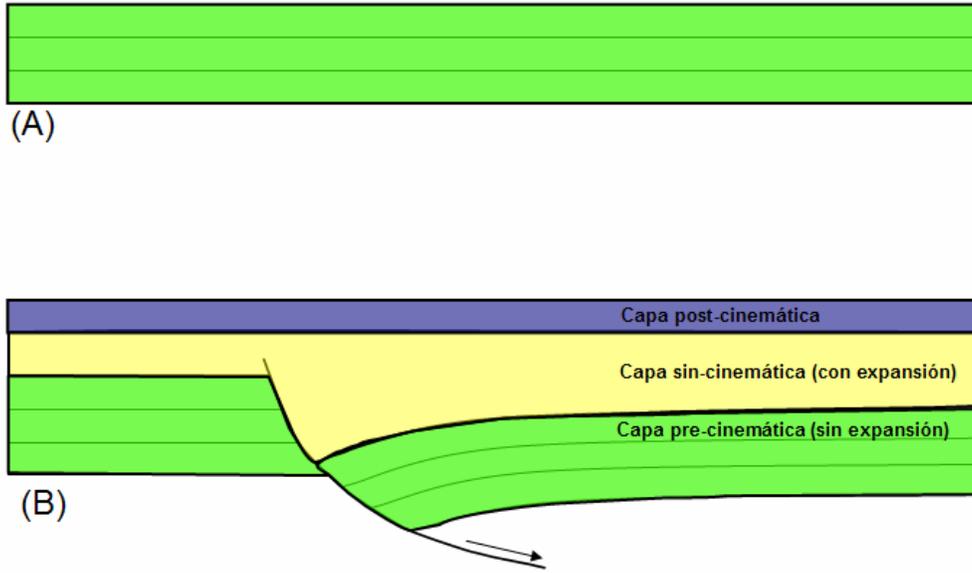


Figura II.8: Esquema que muestra el desarrollo de una cuña sin-cinemática en torno a una falla lístrica normal de crecimiento. (A) Capa pre-cinemática en una etapa anterior al fallamiento. (B) Cuña de expansión, formada en torno a la falla lístrica normal, y asociada a un pliegue anticlinal tipo *roll-over*. Modificado de Hatcher, 1995.

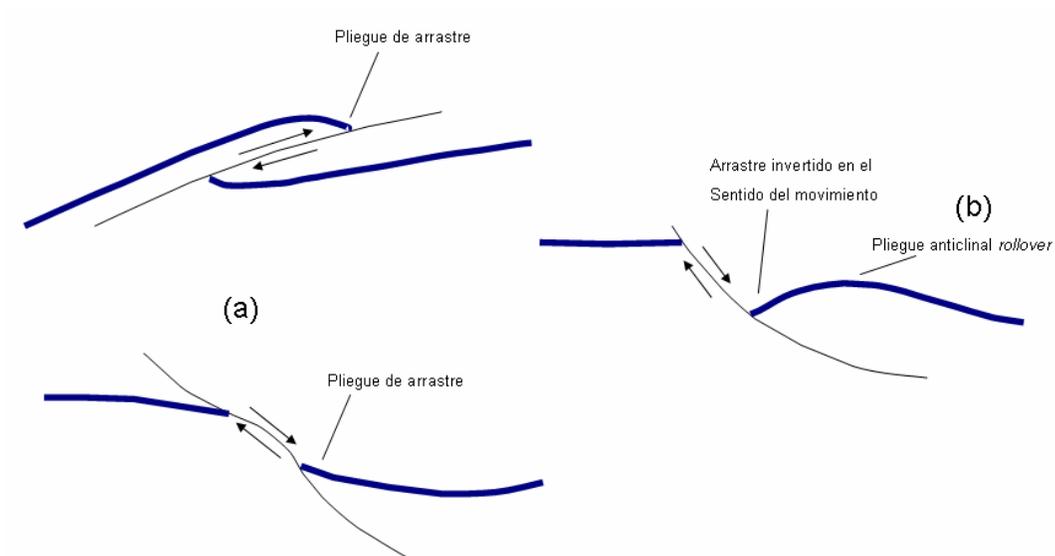


Figura II.9: (a) Forma típica de pliegues de arrastre, producidos en torno a fallas que no muestran geometría lístrica. (b) Un pliegue anticlinal *roll-over* se desarrolla en torno a una falla lístrica que produce arrastre invertido del bloque activo de la falla. Modificado de Hatcher, 1995.

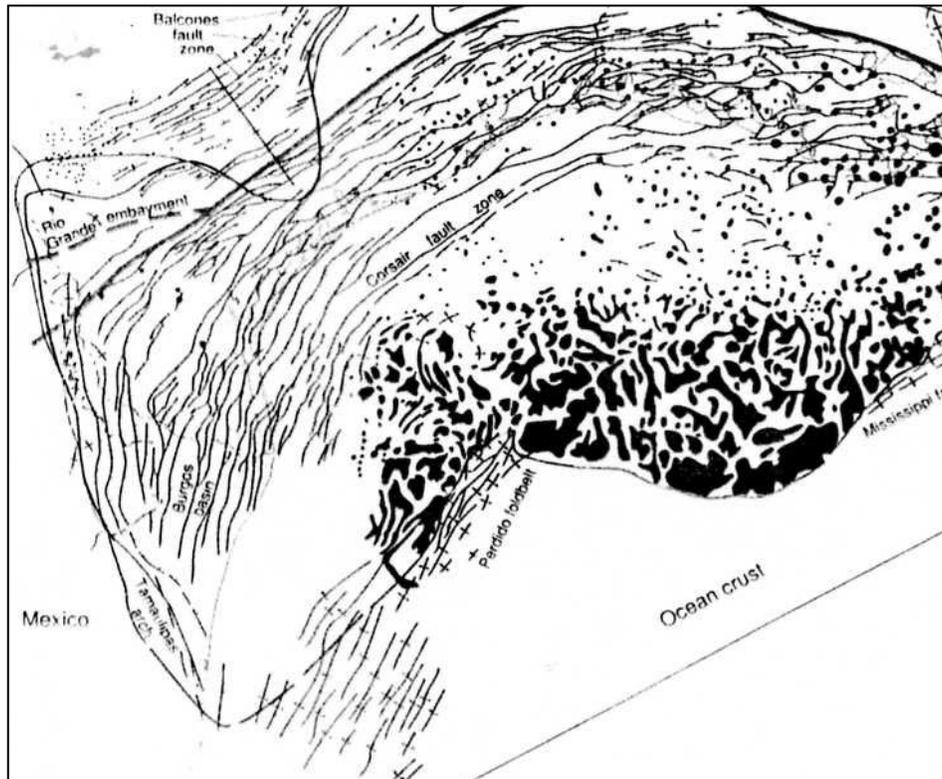


Figura II.10: Mapa regional que ilustra los patrones arqueados de los alineamientos de fallas dirigidas hacia la cuenca en la zona del Norte del Golfo de México. Según Ewing, *in* Bally et al., 1991.

Al observar la interpretación estructural de una sección sísmica en tiempo de reflejo perteneciente al área de estudio (figura II.11), se puede apreciar la geometría lítrica de la mayoría de las fallas normales presentes. Un rasgo importante dentro de esta morfología es el grado de deformación y desplazamiento considerablemente mayor que afectó a los paquetes situados entre el reflector marcado con color amarillo (correspondiente a la discontinuidad de la parte superior del Paleoceno Wilcox) y la parte basal del Paleoceno Midway, en relación con los paquetes afectados en una posición estratigráfica superior. La gran variabilidad entre el grado de desplazamiento que afecta a diferentes paquetes a lo largo de una sola falla lítrica, con tendencia a acentuarse hacia la

parte más profunda de la falla, es una característica peculiar a este tipo de elementos estructurales.

Al estar dirigidas a favor del echado regional de la cuenca, las fallas lítricas presentes pueden ser definidas como fallas sintéticas (Hatcher, 1995), mientras que aparecen algunas fallas secundarias con geometría más bien planar por acomodo de bloque de falla y con echado dirigido en sentido contrario a las fallas principales o sintéticas, o sea hacia zonas más cercanas al continente (fallas antitéticas).

Dentro del grupo de fallas lítricas se encuentra una falla cuya orientación es aproximadamente perpendicular (W-E) a la del sistema principal de fallas dirigidas hacia cuenca (N-S), mientras que se observa buzamiento dirigido hacia el norte. La imagen sísmica de una crossline muestra que esta falla corta los paquetes terciarios hasta una posición en tiempo que corresponde con la parte baja de la Formación Midway, sin llegar a afectar los paquetes de edad mesozoica (figura II.12).

Este rasgo se interpreta como una probable falla de alivio (Destro et al., 2003), formada para compensar el desplazamiento de diferente magnitud que puede ocurrir a lo largo de un mismo bloque de falla, cuando los esfuerzos acumulados por la resistencia al desplazamiento se reflejan en forma de fallas de este tipo o en fracturamiento con orientación normal al rumbo de la falla originadora.

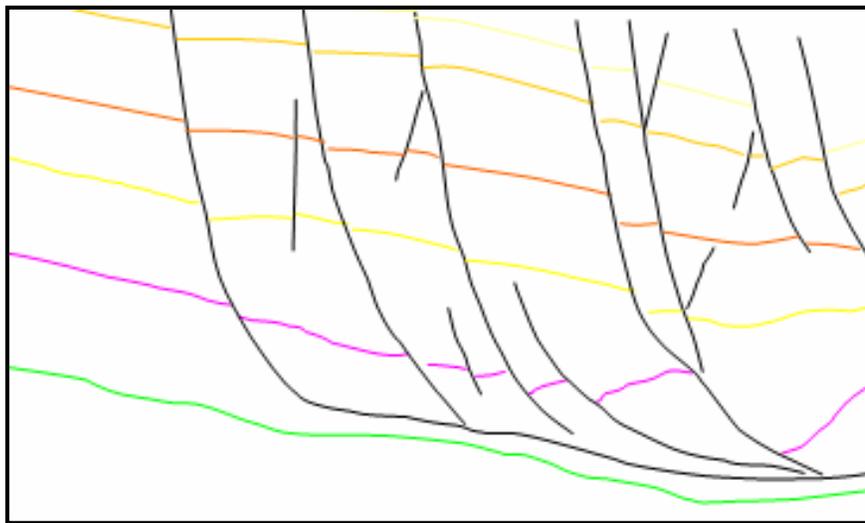
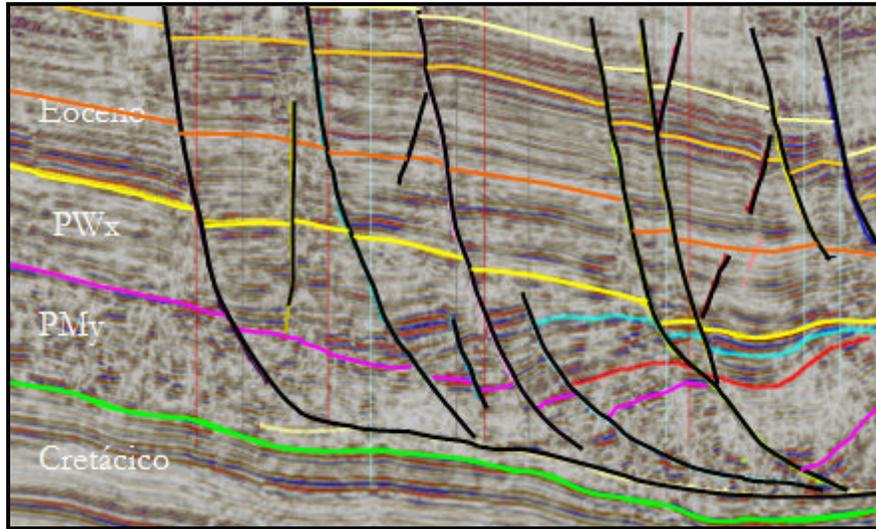


Figura II.11: Imagen sísmica e interpretación en tiempo de reflejo que ilustra la geometría lítrica de las fallas principales dentro del cubo China-Barrilete. Son también visibles algunas fallas antitéticas secundarias. La sección está orientada W-E, paralela a los ejes menores de las estructuras.

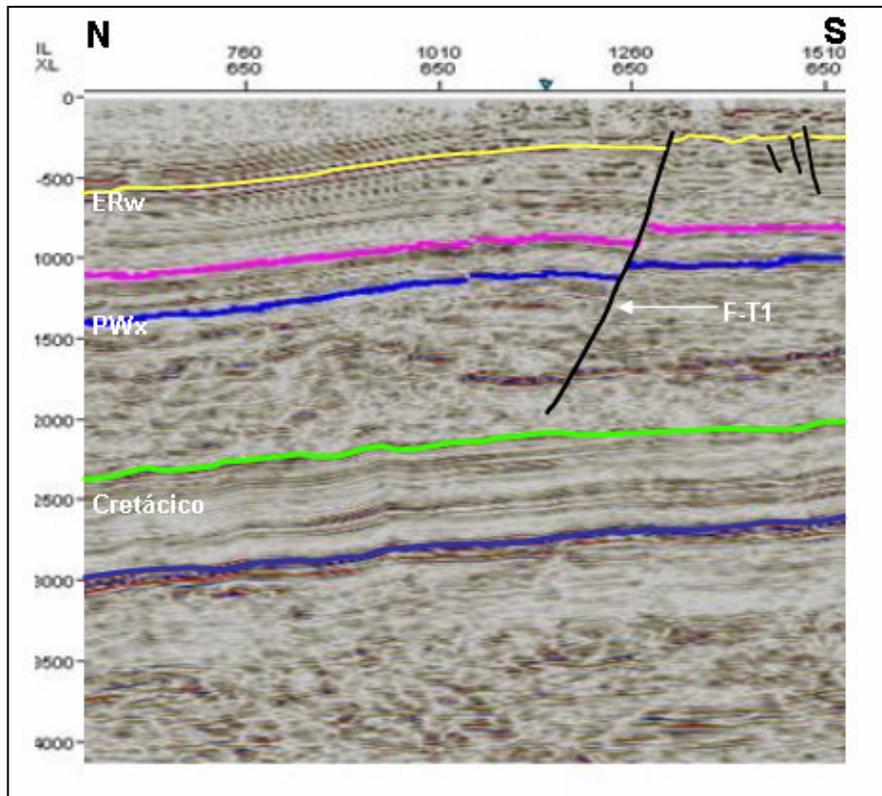


Figura II.12: Imagen sísmica correspondiente a la crossline 650, mostrando la posición de la falla F-T1. Este rasgo se intpreta como una falla de alivio (Destro et al., 2003).

II.4.2 Niveles de despegue y secciones expandidas

Un nivel de despegue (*décollement*, *detachment*) es una capa blanda o no-competente que permite la deformación de los estratos suprayacentes, de tal forma que ocurra una desconexión de éstos con respecto a capas subyacentes, lo que lleva a una deformación independiente arriba y debajo del nivel de despegue (Jackson y Talbot, 1991). El material no-competente se relaciona usualmente con acumulaciones de evaporitas o arcilla de espesor variable, y las estructuras se producen tanto echado abajo, si se trata de sistemas desarrollados en provincias distensivas, como contra echado si se trata de sistemas de pliegues y cabalgaduras.

Dentro del área China-Barrilete, las estructuras principales que pueden ser identificadas en los paquetes terciarios están relacionadas con un nivel de despegue que, de acuerdo con el marco estratigráfico utilizado, puede ser ubicado en la parte basal de la Formación Paleoceno Midway. La evidencia de esto descansa en la interpretación de líneas sísmicas orientadas W-E que muestra la posición del nivel de despegue principal, separando los reflectores que representan a las unidades litoestratigráficas de edad mesozoica, marcados en su cima por una línea de tonalidad verde, de los correspondientes a la Formación Paleoceno Midway, afectada por fallamiento y rotación de bloques de falla (figura II.13). Asimismo, ha sido identificado un segundo nivel de despegue que puede ser observado hacia la porción sur del área de estudio que afecta a la unidad Paleoceno Wilcox, la cual muestra rotación de bloques que se desplazan sobre la parte superior del Paleoceno Midway. El desarrollo de secciones expandidas en

forma de cuña dentro de los paquetes correspondientes al Paleoceno Wilcox ocurre en torno a los dos niveles de despegue, siendo más importantes las que se presentan relacionadas con el nivel de despegue inferior de la base de Paleoceno Midway.

II.4.3 Clasificación de fallas

A partir del reconocimiento de los niveles de despegue mencionados, se plantea una subdivisión de las fallas observadas en la columna terciaria tiene que ver con su nivel de enraizamiento (figura II.14), sea este el nivel de despegue general de la base del Paleoceno Midway o el somero de la parte superior de esta misma unidad, y que para fines de simplificación se puede nombrar como sigue:

Fallas tipo “1”.- fallas que cortan toda la sección terciaria y enraizan con el nivel de despegue de la base del Paleoceno Midway. Se trata de fallas que estuvieron activas durante el depósito de la unidad Paleoceno Wilcox y que muestran indicios de reactivación posterior o de actividad discreta durante el periodo de depósito de la unidad Eoceno Wilcox.

Fallas tipo “2”.- fallas de crecimiento que enraizan en alguno de los niveles de despegue del Paleoceno Midway pero no alcanzan a cortar la columna por encima de la cima del Paleoceno Wilcox, las cuales en ciertos casos fueron reactivadas y siguieron actuando en la parte baja de la unidad Eoceno Wilcox.

Fallas tipo “3”.- fallas que no muestran enraizamiento dentro de la columna terciaria, sean estas sintéticas o antitéticas a la dirección de transporte tectónico. La mayoría de estas fallas tuvieron su origen al alcanzar su máximo desarrollo las

fallas que enraizan en la base del Paleoceno Midway y actúan dentro de zonas de acomodo en los bloques caídos.

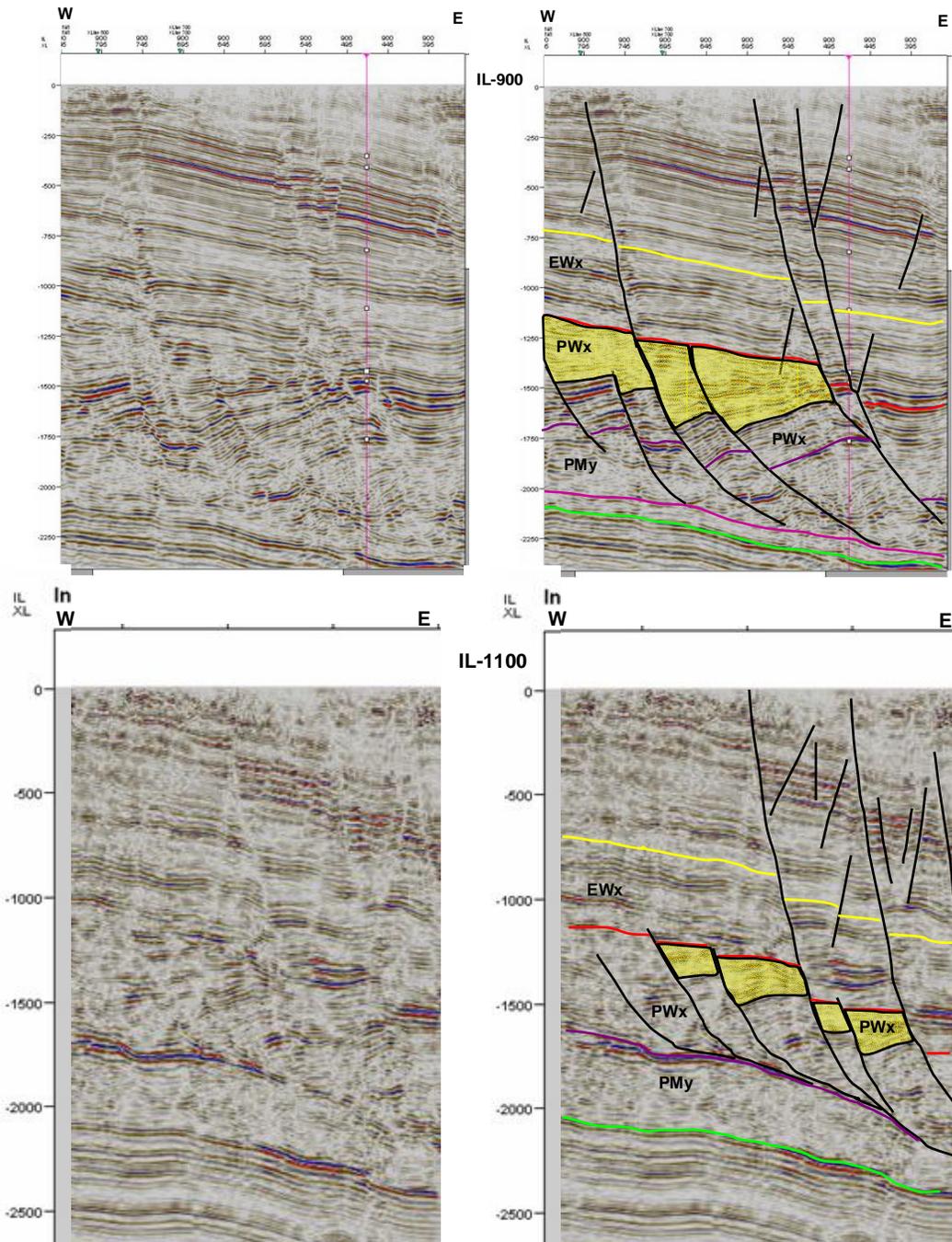


Figura II.13: La posición del despegue para el sistema de fallas lítricas normales cambia gradualmente de N a S, a partir de la base del PMy (imagen superior), hasta alcanzar la parte superior de esta Formación (imagen inferior).

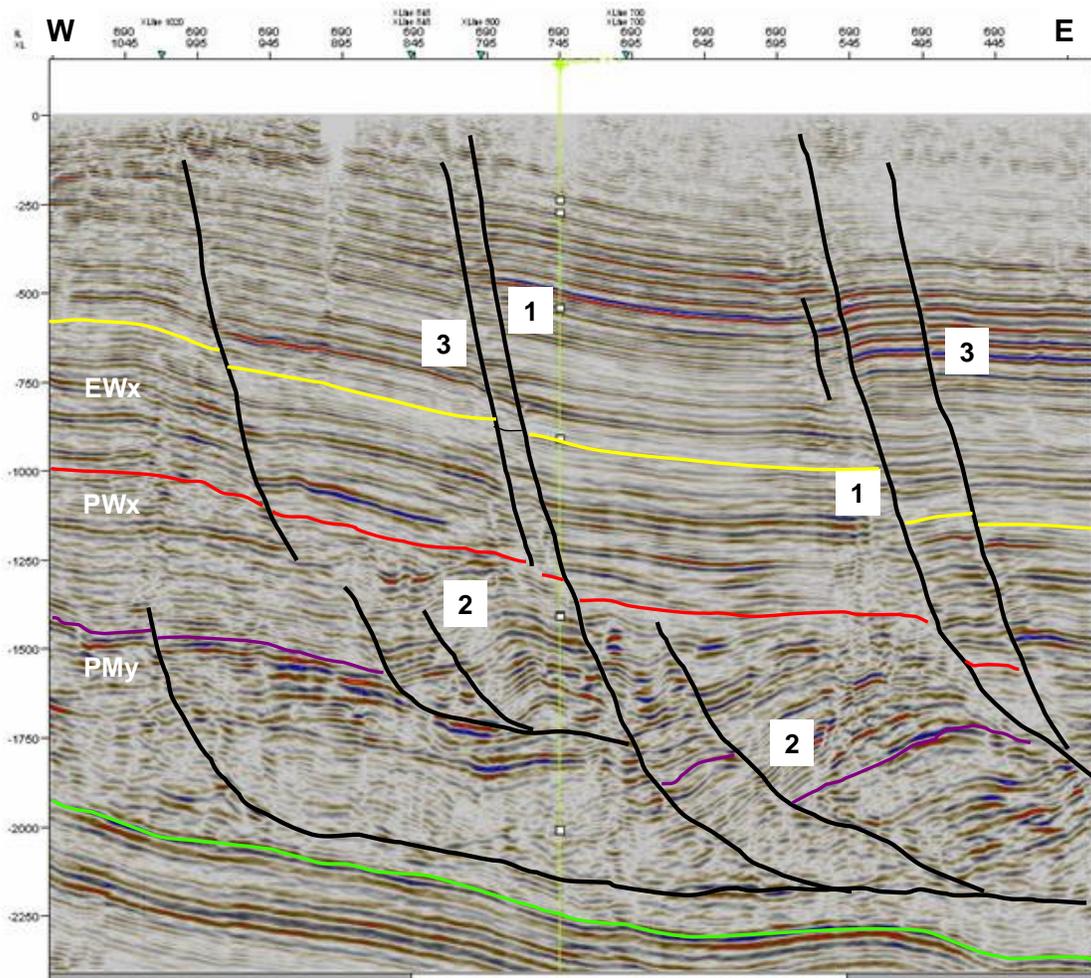


Figura II.14: Los tres tipos de fallas normales que están presentes en el área China-Barrilete: 1) fallas que alcanzan a cortar la mayor parte de la columna terciaria y que tienen su despegue en la base del PMy; 2) aquellas que no alcanzan a cortar las formaciones por arriba del PWx, pero formaron cuñas dentro de esta unidad con posición de despegue variable 3) fallas sin relación con un nivel de despegue, generalmente fallas secundarias de acomodo.

II.5 Descripción de secciones sísmicas

Con el propósito de ilustrar con mayor detalle a los elementos estructurales observados en el área de estudio, y preparar el marco descriptivo que lleve a elaborar el modelo propuesto de evolución estructural, se describen tres secciones sísmicas representativas de la estructura y que adicionalmente presentan indicios para establecer la relación estructura-sedimentación para la unidad litoestratigráfica Paleoceno Wilcox (ver figura II.15 para ubicación).

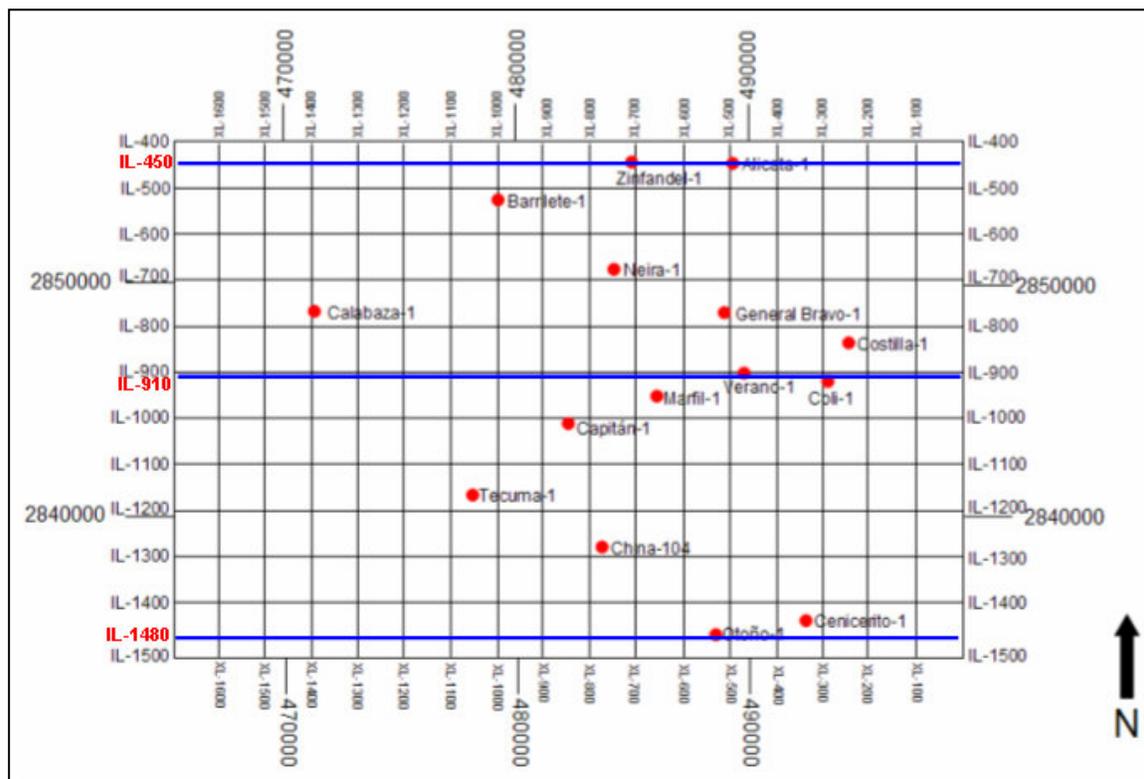


Figura II.15: Posición de las secciones sísmicas en tiempo cuya interpretación es descrita en este trabajo.

II.5.1 Inline 450

La sección sísmica 450 se localiza en la porción norte del área de estudio y su trayectoria coincide con la ubicación del pozo exploratorio Alicata-1, perforado hasta una profundidad que coincide con la parte baja de la Formación Paleoceno Midway. La interpretación de las restantes unidades, desde la cima de la secuencia mesozoica hasta el probable basamento, se realizó sirviéndose de modelos previos del Activo de Exploración Región Norte y de interpretaciones llevadas a cabo en secciones sísmicas regionales por Pérez Cruz en 1992. La longitud de la sección sísmica es de 22000 metros y su orientación, al igual que las demás líneas sísmicas que son descritas en este trabajo, es W-E, aspecto que resulta ventajoso para una mejor caracterización estructural, ya que la mayoría de las fallas poseen un rumbo perpendicular a la orientación de la sección y con buzamiento dirigido hacia la zona más oriental de la cuenca; sin embargo, existen fallas subsidiarias antitéticas al sistema principal, que aparecen relacionadas a la actividad de las fallas sintéticas mayores (figura II.16).

Un primer punto notable a recalcar dentro de la sección es la inclinación dirigida hacia el oriente que se observa en todas las unidades que pueden ser interpretadas; no obstante, vale la pena hacer notar el diferente comportamiento que tuvieron ante este fenómeno los paquetes de edad mesozoica y el basamento, por un lado, y las unidades terciarias, por otro.

Los reflectores que se asocian con el basamento metamórfico, junto con los que han sido interpretados como la secuencia mesozoica, incluyendo a las unidades

jurásicas y hasta la cima del Maastrichtiano, conforman una estructura monoclinial que se profundiza hacia la porción oriental de la sección, sin mostrar mayor deformación. Suprayaciendo a la cima del Maastrichtiano se localiza una serie de paquetes representados por reflectores que muestran geometría compleja. La edad asignada por PEMEX a la cima de esta unidad es de 63 Ma y es nombrada Paleoceno Midway (PMY) en este trabajo. Hacia la porción occidental de la sección la unidad aparece basculada, y aunque no se ve afectada por fallamiento que provoque dislocación de la cima es posible apreciar perturbaciones dentro del paquete que podrían estar relacionados con eventos de flujo, fallamiento y deslizamiento contemporáneos o penecontemporáneos al depósito. Cerca de la traza 1200, una falla lítrica normal (Falla F-21) corta y desplaza hacia oriente a la unidad, hasta llegar a conectar con un nivel de despegue situado por encima del límite Cretácico-Cenozoico. Este nivel de despegue sirve de raíz para la mayoría de las principales fallas lítricas normales sintéticas interpretadas dentro de la sección y es el plano de discontinuidad que separa a las unidades terciarias con estilo estructural de **fallas normales despegadas** con respecto a las unidades mesozoicas y del basamento.

Una interrupción en la sección sísmica impide definir completamente la traza de la totalidad de las fallas que cortan al Paleoceno Midway; en la porción donde se localizan los pozos Alicata-1 y Zinfandel-1 (proyectado), la unidad aparece rotada y desplazada a lo largo de un sistema de fallas lítricas normales que la afectan, sin mostrar un desarrollo de pliegues roll-over significativo, salvo en el bloque que limita hacia el Oriente al pozo Zinfandel-1. La base del paquete deformado en la

porción oriental de la sección está definida por una discordancia angular por encima de la base del Paleoceno Midway.

Encima de esta unidad, y situándose en su base a lo largo de una probable discontinuidad, se localizan los reflectores asociados con la Formación Paleoceno Wilcox (PWx, con una edad en la cima de 54.8 Ma, según datos de PEMEX). En la porción occidental, a la izquierda de la falla F-21, la unidad no parece mostrar fallamiento y se observa afectada por el basculamiento regional. Hacia la porción oriental de la sección, el Paleoceno Wilcox muestra evidencia de expansión a lo largo de las fallas lítricas normales que deforman al Paleoceno Midway, y es afectado por fallamiento normal antitético en la estructura Zinfandel. Asimismo, se observa la presencia de fallas subsidiarias sintéticas que cortan parcialmente a la unidad.

Las unidades situadas estratigráficamente por encima del Paleoceno Wilcox, desde la unidad Eoceno Wilcox hasta la unidad Cook Mountain, muestran una geometría consistentemente tabular a lo largo de la sección, y aparecen asimismo cortadas por las fallas del sistema principal y basculadas al punto de aflorar con una marcada erosión que afecta a las unidades Reklaw (ERw), Queen City (EQc), Weches (EWch) y Cook Mountain (Ecm). Se ha interpretado una probable discordancia dentro de la unidad Reklaw, cortada por el pozo Alicata-1, y que se extiende hacia el límite oriental de la sección.

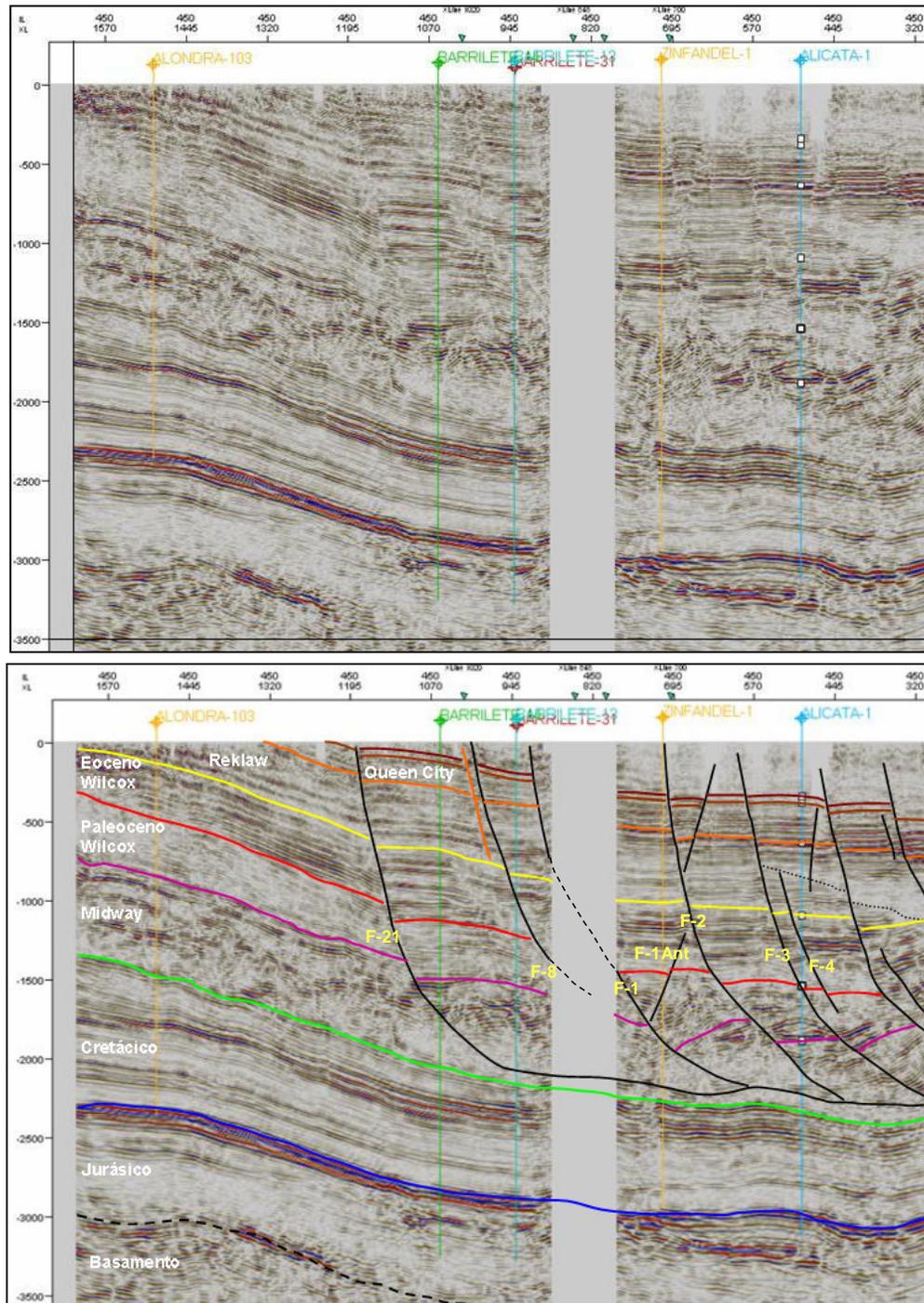


Figura II.16: Sección sísmica 450 que incluye la interpretación de horizontes y fallas llevada a cabo para este trabajo. Nótese el monoclinial que conforman los materiales situados por debajo del nivel de despegue de la base del Paleoceno Midway. Para más detalles véase texto.

II.5.2 Inline 910

La sección se localiza en la porción central del área de estudio, coincidiendo con la localización del pozo exploratorio Verano-1 (figura II.17), perforado hasta alcanzar la base de la Formación Paleoceno Midway. La longitud de la sección es de 24370 metros. La estructuración de las unidades que forman el basamento de la sección paleógena (el basamento pre-Jurásico y la sección mesozoica hasta su cima) continúa observándose en la forma de un pliegue monoclinal amplio con buzamiento al oriente de la sección. Se observa hacia la porción inferior izquierda la presencia de una zona de contraste de reflectores con inclinación hacia E, de relativa alta amplitud que representarían materiales del basamento sobre los que descansan discordantemente reflectores de geometría discontinua con tendencia a engrosarse hacia la parte central más profunda. Este rasgo lleva a interpretar la presencia de bloques remanentes de la fase de apertura del proto-Golfo de México, que en la provincia a la que pertenece el área de estudio se encuentra ligada a las acumulaciones de lechos rojos del grupo Huizachal (Echánove, 1986). La base de los reflectores que representan los materiales de edad mesozoica, y que contrasta por su débil señal, parece ser discordante a lo largo de las porciones de la sección donde es posible interpretarla; sin embargo, los espesores son constantes y muestran escasa deformación, a excepción de una probable falla de desplazamiento inverso de poca magnitud, situada por debajo de la localización del pozo Verano-1, sin llegar a afectar las unidades paleógenas.

El conjunto de reflectores reconocidos como la Formación Paleoceno Midway (PM_y) presenta una estructuración similar a la observada en la sección 450 de la porción norte, con un bloque occidental basculado, interrumpido a partir de la traza 1050 por la falla limítrofe F-21 y por varias fallas lístricas normales de crecimiento de magnitud variable que lo desplazan a favor del echado regional, observándose que el desplazamiento a lo largo de las trazas de falla se acentúa hacia la parte oriental de la sección. Asimismo, se interpreta el nivel de despegue de este sistema de fallas coincidiendo con la parte basal del Paleoceno Midway, por arriba de la interfase Cretácico-Cenozoico, a partir de la falla F-21 y continuando hasta el límite oriental de la sección sísmica.

La estructuración que se observa en el conjunto de reflectores de la unidad Paleoceno Wilcox (PW_x) muestra similitud con lo observado en la sección 450, siendo la diferencia principal la mayor magnitud de la sección expandida dentro de la unidad, particularmente en la cercanía del pozo Verano-1, donde el dislocamiento y rotación de la unidad Paleoceno Midway en torno a las fallas F-3 y F-12 sobre el nivel de despegue a favor del echado, permitió el desarrollo de la cuña sedimentaria. Un número limitado de fallas, particularmente las fallas F-2W_x, F-3W_x y F-5W_x, no alcanzan a cortar completamente la unidad PW_x, aunque parecen estar asociadas con el desarrollo de la sección expandida dentro del bloque donde se localiza el pozo exploratorio Marfil-1 (proyectado). Tanto la cima como la base del PW_x parecen mostrar relaciones discordantes con las unidades infra y suprayacentes al paquete, apreciándose patrones divergentes en el buzamiento de los reflectores situados en la cercanía del contacto con la unidad identificada como Eoceno Wilcox.

Los reflectores identificados por el pozo Verano-1 con las unidades situadas por encima del PWx (Eoceno Wilcox, Reklaw, Queen City, Weches y Cook Mountain) se muestran afectados por el basculamiento general y no parecen mostrar expansión a lo largo de las trazas de falla que las cortan, algunas de las cuales, erosionadas al igual que las formaciones que afectan, probablemente afloran en la superficie del área de estudio. Asimismo, se observa que para las unidades post-paleocénicas el salto a lo largo de las fallas sintéticas principales es menor que el que se aprecia para la unidad Paleoceno Wilcox dentro de la misma traza de falla.

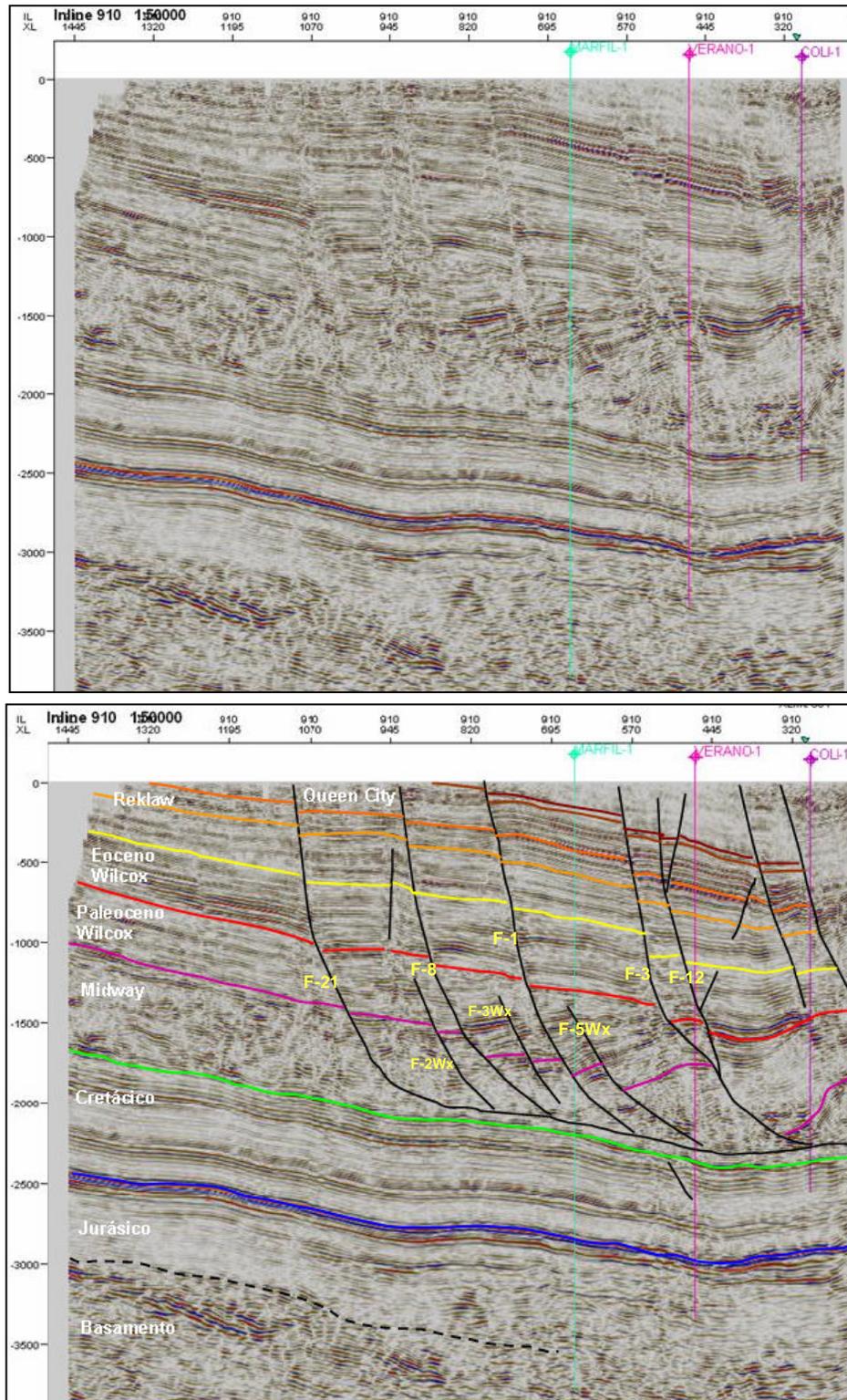


Figura II.17: Interpretación estructural en tiempo doble sobre la línea sísmica IL-910. Obsérvese la variación del espesor del Paleoceno Wilcox partiendo de la porción occidental de la sección y los espesores más o menos constantes de las unidades del Eoceno.

II.5.3 Inline 1480

La sección se localiza en la parte sur del área de estudio, y coincide con la ubicación del pozo exploratorio Otoño-1 (figura II.18). Debido a problemas con el despliegue de la información sísmica en Petrel, la imagen de la línea sísmica que sirvió de punto de partida para el modelado registra 2500 milisegundos de imagen sísmica, por lo que las características del basamento y de la parte más profunda de los reflectores correspondientes a la secuencia mesozoica no son observables. Sin embargo, la imagen conserva la geometría de la parte basal de los reflectores del Paleógeno y del nivel de despegue principal.

El basculamiento del conjunto de reflectores correspondientes a una edad mesozoica se acentúa hacia la porción oriental, perdiéndose la señal de manera abrupta cerca de la ubicación del pozo Cenicerito-1 (proyectado). Se observa fallamiento de alto ángulo, de probable naturaleza compresiva, dentro de las unidades del Cretácico, y su cima muestra indicios de erosión hacia la parte donde se profundiza antes de perderse. El contacto de la unidad Paleoceno Midway con los reflectores que representan al Mesozoico no es concordante a lo largo de la sección, observándose algún grado de disarmonía en el bloque basculado del extremo izquierdo de la sección. La geometría interna divergente y caótica del Paleoceno Midway continúa observándose en los demás bloques situados a la derecha de la falla F-21, los cuales muestran además un grado menor de desplazamiento a lo largo de fallas normales sintéticas que interrumpen la integridad de la cima, sin llegar a atravesar la unidad y enraizar con el nivel de despegue basal. A partir de la falla F-3, el desplazamiento es mayor y la cima

interpretada para el Paleoceno Midway muestra rotación considerable a lo largo de la traza de falla que se une con el nivel de despegue de la base del Paleoceno en el extremo oriental de la línea sísmica. Encima de esta unidad, el conjunto de reflectores del Paleoceno Wilcox muestra cierto grado de discontinuidad en su contacto con el Paleoceno Midway, con un contraste en el bloque occidental basculado entre la geometría desordenada de la cima del Paleoceno Midway y los reflectores con patrones de *downlap* (Vail et al., 1977) descansando sobre el límite. Se observa la presencia de expansión dentro de los bloques de falla de la zona central de la sección, entre la falla F-21 y la falla profunda F-3. La magnitud de las cuñas expandidas parece ser más importante en el bloque que define la localización del pozo Otoño-1; sin embargo, el bloque donde se localiza el pozo Cenicerito-1 también muestra expansión dentro del Paleoceno Wilcox.

El resto de las unidades interpretadas en su cima dentro de la sección se observan afectadas por el basculamiento general, y son cortadas por las principales fallas sintéticas del sistema, acompañadas por fallas antitéticas en la porción más somera de la sección, llegándose a interpretar aumento de espesor dentro de la unidad Eoceno Wilcox a la derecha de la falla F-22. El espesor de las demás unidades parece ser uniforme y sólo se ve interrumpido por la erosión de la parte aflorante.

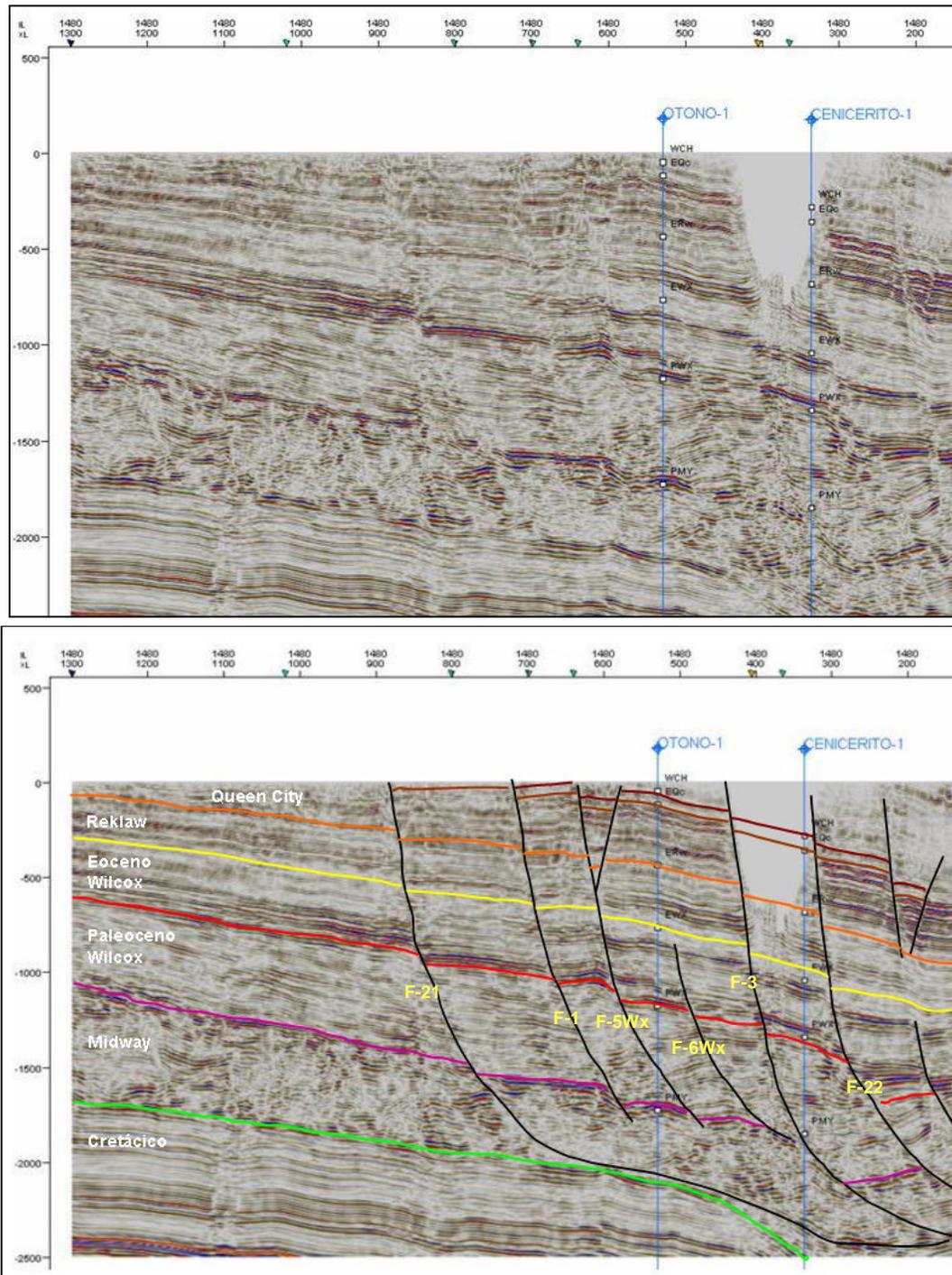


Figura II.18: Interpretación estructural realizada en la línea sísmica IL-1480, mostrando la tendencia de los paquetes mesozoicos a profundizar su posición, hacia el extremo oriental de la imagen.

Sirviéndose de esta revisión de rasgos observables a escala de sección sísmica, es posible ofrecer una imagen inicial de la conformación del conjunto de fallas que se consideran principales dentro del conjunto, y para ello se ha utilizado una serie de cortes obtenidos a un tiempo constante con espaciamiento de 500 milisegundos con el atributo sísmico de *coherencia*, basado en el cálculo de similitud o correlación de las amplitudes de trazas sísmicas (Brown, 1999). De esta forma es posible enfocar discontinuidades, tales como trazas de falla, que representan contrastes de coloración. La imagen producida en el ejemplo del corte a 1000 ms muestra la distribución de las fallas sintéticas principales (Fallas 21, 3, 5Wx y 8 y la zona de influencia de la falla F-T1, interpretada como una probable falla de alivio (figura II.19).

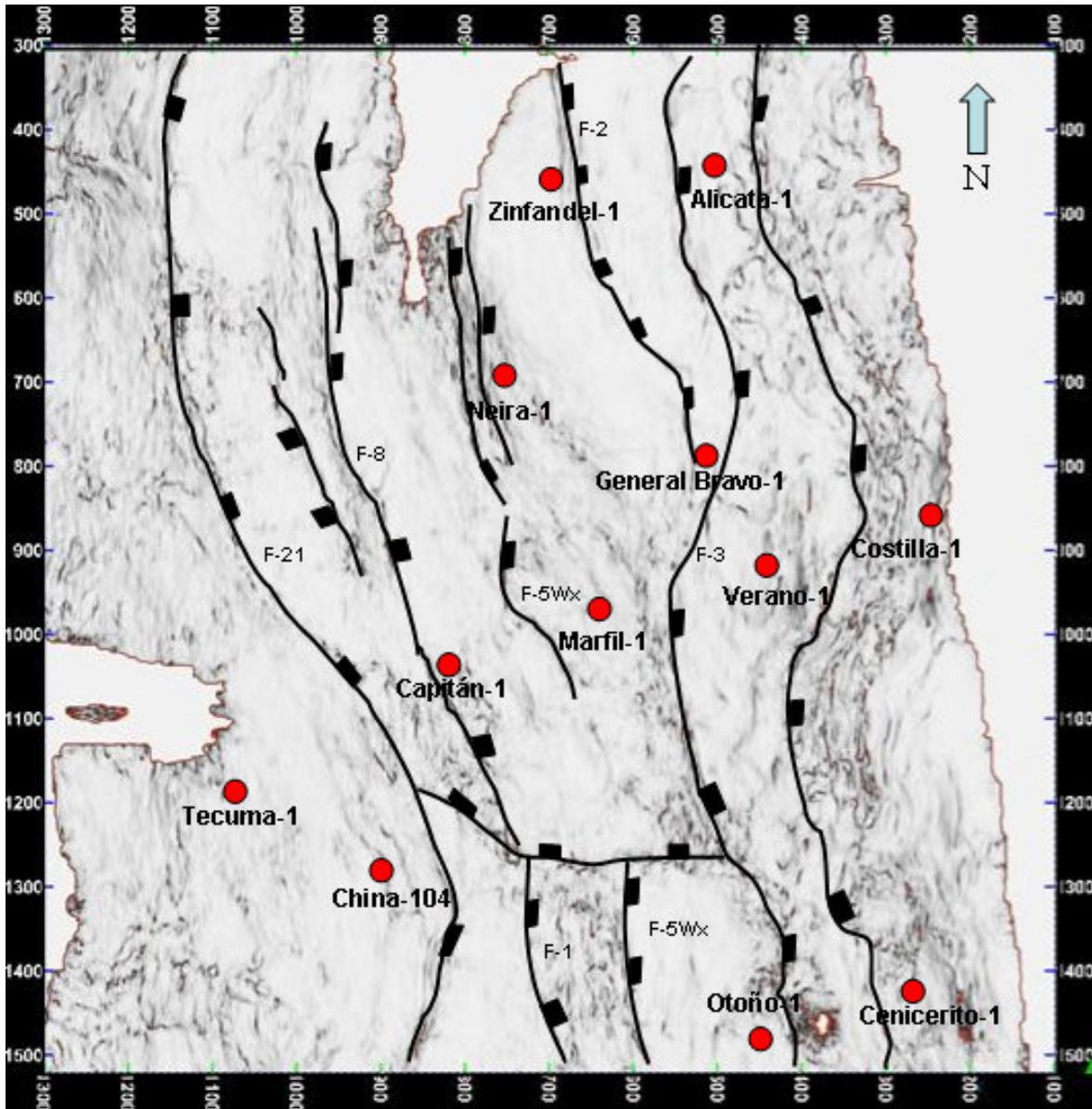


Figura II.19: Corte a tiempo constante de 1000 milisegundos, obtenido con el atributo de coherencia, y sobre el que han sido interpretadas las trazas de las fallas más importantes en el área de estudio.

II.6 Construcción de secciones a profundidad

El propósito de la conversión a profundidad de una cantidad de secciones pertenecientes al área de estudio China-Barrilete fue obtener la posición y geometría más cercanas a la situación real de cada unidad litoestratigráfica interpretada en cada sección, además de contar con un modelo inicial para poner en práctica la validación geométrica del modelo a través de la técnica de la restauración y balanceo estructurales.

Para llevar a cabo esta actividad fue necesario contar con los listados de velocidades de intervalo de pozos seleccionados dentro del área de estudio; esta selección se basó en la confiabilidad de la información de velocidades que a juicio del autor era útil. Los pozos Alicata-1 y Verano-1 contaban con información de velocidades sísmicas proveniente de registros sísmicos verticales (VSP), que fue considerada la fuente primaria para definir “dominios” de velocidades dentro del área de estudio. Los datos de los pozos Calabaza-1, Coli-1 y Otoño-1 fueron incluidos dentro del listado después de comprobar su utilidad por medio de pruebas de conversión preliminares en secciones cercanas a su localización (figura II.20 a). Es conveniente puntualizar que el uso de velocidades de intervalo en secciones que se ubiquen en las cercanías de uno o varios pozos de control es parte de un método que muestra limitaciones al compararlo con la aplicación de cubos de velocidades; sin embargo, es aceptado como el único que puede manejarse a escala de sección en el software donde se llevó a cabo la labor de construcción y validación de las secciones a profundidad.

La interpretación inicial de diez horizontes en tiempo (Eoceno Yegua, Eoceno Cook Mountain, Eoceno Weches, Eoceno Queen City, Eoceno Reklaw, Eoceno Wilcox, Paleoceno Wilcox, Paleoceno Midway, Cretácico, Jurásico) y del conjunto de fallas se llevó a 30 inlines seleccionadas, con algunas crosslines de control que no fueron modeladas. Las imágenes de las líneas sísmicas, convertidas en archivos JPEG, fueron digitalizadas y transferidas como datos de entrada en GeoSec 2D. La interpretación de los horizontes y las fallas fue digitalizada utilizando dichas imágenes (figura II.20 b), y finalmente editada para generar “bloques” unitarios dentro de la sección. Las velocidades de intervalo necesarias para la conversión a profundidad fueron introducidas en columnas estratigráficas nombradas según los registros de pozo del cual fueron obtenidos los datos (figura II.21). El módulo de conversión a profundidad es de manejo sencillo, siempre y cuando la preparación de la línea sísmica haya sido hecha correctamente; además, éste permite conversiones rápidas y que pueden ser comparadas con la posición de marcadores en pozos, y corregidas mediante iteraciones donde se trabaja con variaciones discretas en los valores de las velocidades de intervalo, convirtiéndose en un proceso de prueba y error que es siempre necesario llevar a cabo. La apariencia de una sección recién convertida a profundidad suele tener un número de imperfecciones que son inevitables en prácticamente todas las veces que se trabaja con GeoSec, y debe tenerse cuidado de editar cuidadosamente dichas imperfecciones para no alterar la estructura que muestra el resultado de la conversión (figura II.22). Al final de este proceso, se estará en condiciones para comprobar la validez geométrica de la interpretación estructural de una sección mediante la técnica de restauración y balanceo estructural.

Alicata-1 Velocidades de intervalo		Verano-1 Velocidades de intervalo		Otoño-1 Velocidades de intervalo	
Formación	V.I. (m/s)	Formación	V.I. (m/s)	Formación	V.I. (m/s)
Cook Mountain	2600	Cook Mountain	2600	Cook Mountain	2600
Weches	2690	Weches	2700	Weches	2660
Queen City	2880	Queen City	2890	Queen City	2870
Reklaw	3100	Reklaw	3100	Reklaw	3100
Eoceno Wilcox	3280	Eoceno Wilcox	3150	Eoceno Wilcox	3250
Paleoceno Wilcox	3400	Paleoceno Wilcox	3300	Paleoceno Wilcox	3400
Paleoceno Midway	3380	Paleoceno Midway	3600	Paleoceno Midway	3450

Calabaza-1 Velocidades de intervalo		Coli-1 Velocidades de intervalo	
Formación	V.I. (m/s)	Formación	V.I. (m/s)
Queen City	2600	Yegua	2580
Reklaw	2700	Cook Mountain	2660
Eoceno Wilcox	2760	Weches	2700
Paleoceno Wilcox	3120	Queen City	2890
Paleoceno Midway	3600		

(A)

(B)

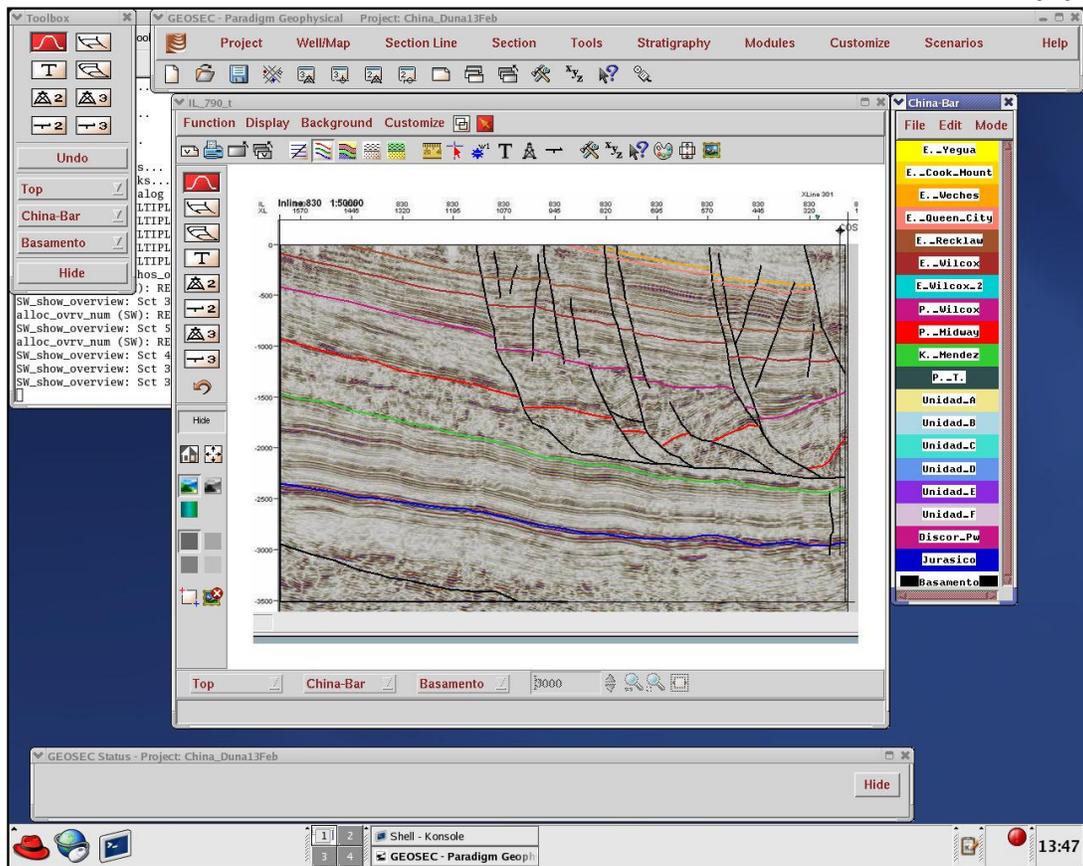


Figura II.20: (A) Velocidades de intervalo utilizadas para la conversión a profundidad de secciones en tiempo. (B) la interpretación estructural fue transferida al software de aplicación GeoSec para su conversión a profundidad.

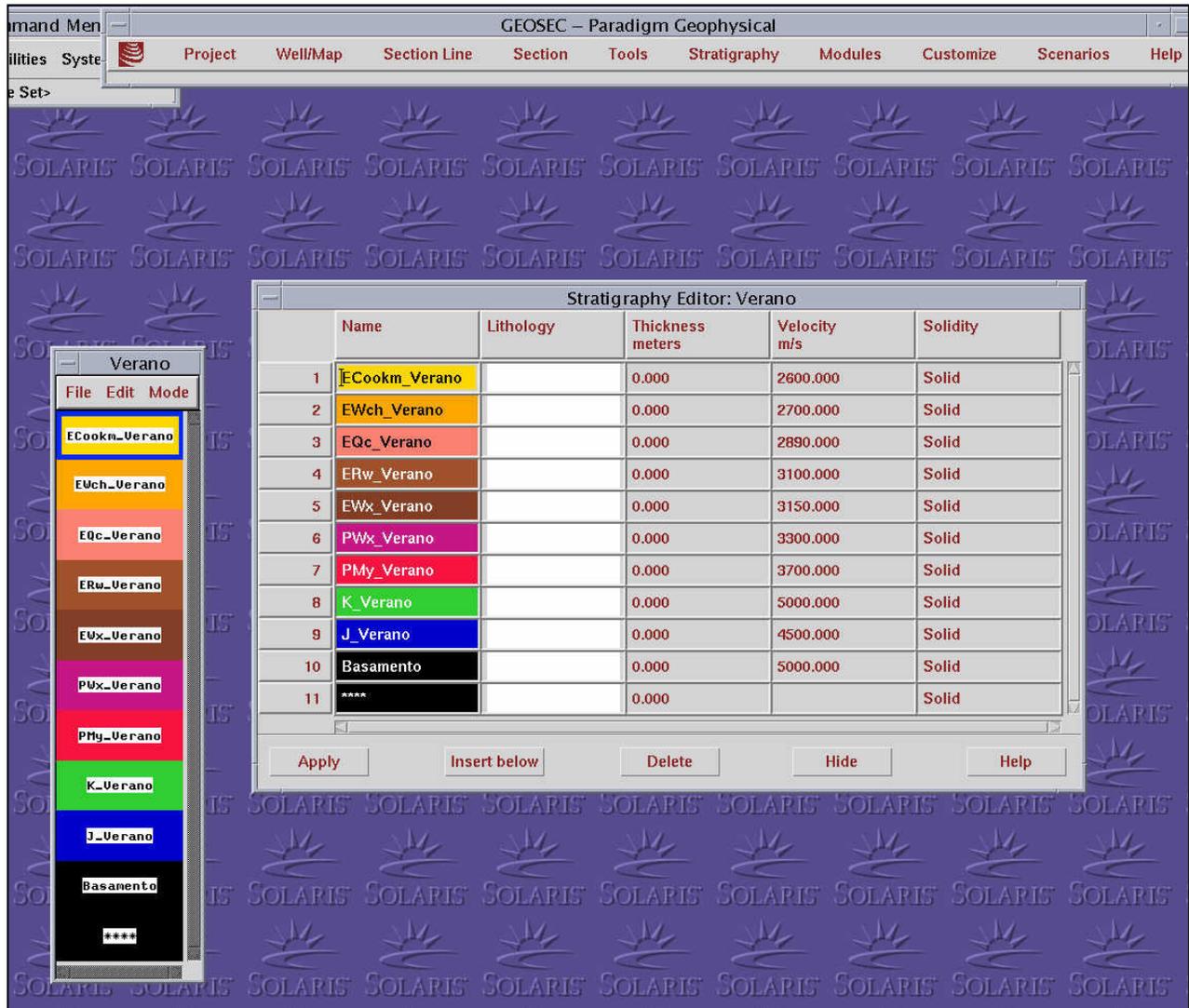


Figura II.21: Las velocidades de intervalo fueron introducidas como datos adicionales dentro de las columnas estratigráficas que definieron dominios de velocidades para el área de estudio.

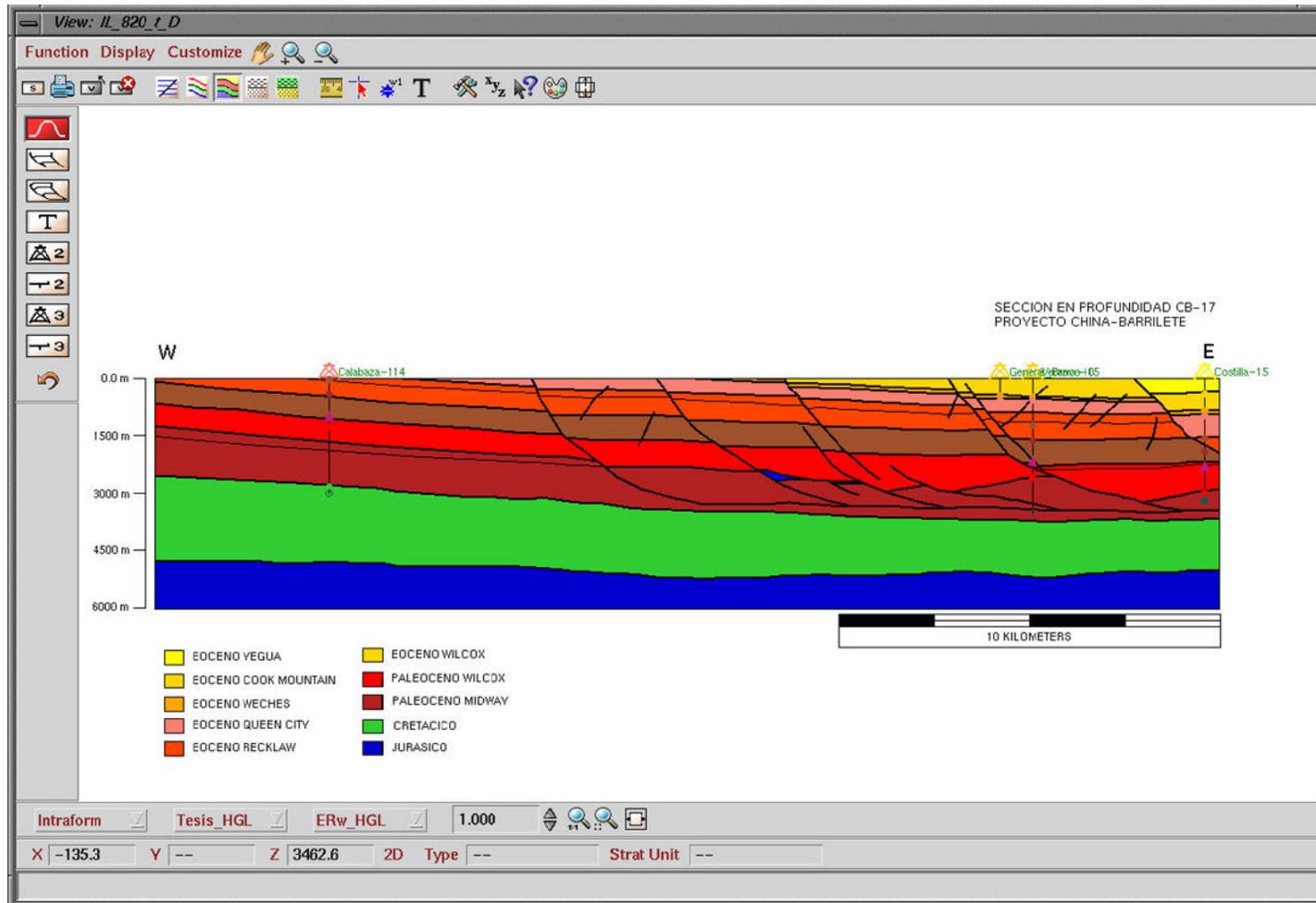


Figura II.22: Resultado de la conversión a profundidad en una sección sísmica. La imagen muestra la sección estructural en etapa de edición de superficies, e incluye pozos de control.

II.7 RESTAURACIÓN Y BALANCEO ESTRUCTURAL

II.7.1 INTRODUCCIÓN

La técnica del balanceo de secciones estructurales es una herramienta que es utilizada ampliamente en la exploración petrolera para comprobar la veracidad de las interpretaciones que surjan de datos sísmicos o de afloramientos. El concepto de sección balanceada (Dahlstrom, 1969) se refirió inicialmente a una forma de comprobar la validez geométrica de una sección tomando en cuenta dos aspectos básicos: 1) la medición de la longitud de los horizontes interpretados debe ser consistente tanto en estado deformado como en secciones restauradas; 2) dentro de un escenario geológico específico, existe un número limitado de estructuras posibles. Elliott, 1983, introdujo el término *admisible* para referirse a estructuras interpretadas por métodos indirectos que pudieran ser comparadas con las observables en afloramientos en superficie. Para el autor, si una sección puede ser restaurada a un estado no-deformado se convierte en una sección *viable*. En consecuencia, una sección balanceada es aquella que es a la vez *admisible* y *viable*. Woodward et al., 1989, expresan que una sección restaurada, esto es, aquella sección donde el desplazamiento a lo largo de una o varias fallas ha sido removido y los pliegues han sido *aplanados* al regresar los bloques a su estado de pre-deformación (Marshak y Woodward, 1988), es a la vez balanceada cuando el “balance” ocurre una vez que las longitudes de las líneas que representan horizontes, y las áreas limitadas por éstas son iguales en los estados deformado y restaurado. Si la sección deformada no posee una versión restaurada, no quiere

decir que no sea una sección balanceada, pero esto no puede ser comprobado si antes no es llevado a cabo el proceso de restauración.

El método de balanceo de secciones fue inventado inicialmente para aplicarlo en cinturones de pliegues y cabalgaduras (Bally, 1966; Suppe, 1983; Elliott, 1983), y los aspectos básicos de la restauración en este tipo de terrenos toman en cuenta la existencia de algunos puntos adicionales, tales como:

1) Las fallas se desarrollan en torno a rampas y planicies con separaciones cercanas a los 35°; 2) los espesores de los horizontes muestran espesores constantes o con variaciones graduales muy suaves; 3) el plegamiento es paralelo al plano de deslizamiento o a las capas; 4) los horizontes deben “embonar” con respecto a una traza de falla antes de la deformación (el principio del *templete*).

Desde mediados de la década de 1980, varios autores (Davison, 1986; White et al., 1986; Williams y Vann, 1987) hicieron notar la inoperancia de tales principios al referirse a la deformación que ocurre en torno a una falla lítrica normal. Schultz-Ela (1992) resalta algunas de estas diferencias:

1.- La deformación con acortamiento tiende a engrosar una sección, creando un área relativamente alta donde el depósito de sedimentos disminuye o es detenido al iniciar la deformación. La extensión, por el contrario, provoca adelgazamiento de una sección, colocando la capa de referencia por debajo del *datum* regional y facilitando la sedimentación continua en las zonas estructuralmente deprimidas.

2.- El movimiento prolongado a lo largo de una falla de crecimiento viola el principio de espesor constante.

3.- Una falla lítrica por lo general se curva suavemente a partir de un buzamiento de ángulo alto en su porción más somera, hasta alcanzar buzamientos de ángulo

bajo a mayor profundidad. En este caso, los pliegues creados no pueden ser relacionados con movimiento en torno a flexuras abruptas de la traza de falla.

4.- El movimiento de un substrato dúctil y la deformación del bloque de piso inhiben adicionalmente una relación simple entre flexuras de falla y el plegamiento de su bloque de techo.

5.- El plegamiento no es por lo general del tipo paralelo al deslizamiento o al flujo (Williams y Vann, 1987), lo que invalida el principio de la conservación de la longitud de las capas.

Los modelos propuestos para explicar el mecanismo de deformación que genera un pliegue anticlinal *roll-over* van desde deslizamiento en torno a flexuras (Davison, 1986), cizalla simple inclinada (White et al., 1986; Schultz-Ela, 1992) y el método de “Chevron modificado” de Williams y Vann, 1987. Los módulos de restauración utilizados en este trabajo están basados en los métodos de cizalla simple inclinada en el caso del módulo *fault-slip fold*, y el de deslizamiento en torno a flexuras para el módulo de *transfer / flexural slip* (figura II.23).

El módulo *Fault-slip fold* puede ser utilizado para restaurar la deformación producida en un bloque de falla bajo deslizamiento vertical u oblicuo, preferentemente en escenarios extensionales (figura II.24), y su funcionamiento puede ser resumido en los siguientes pasos:

1.- Se selecciona la superficie a partir de la cual se generará la geometría restaurada.

2.- Se selecciona el *cut-off* (punto de separación) de la superficie a restaurar en el bloque activo o de techo. El *cut-off* del bloque activo es la posición a partir de la cual se calculará el desplazamiento a lo largo de la traza de falla y la separación

horizontal (*heave*) durante la restauración del pliegue asociado al deslizamiento de la falla. Si una superficie del bloque activo intersecta la falla en el *cut-off* del bloque activo, será seleccionada automáticamente para moverse junto con el *cut-off* durante la operación del módulo.

3.- Se selecciona cualquier superficie que esté incluida dentro del bloque activo, y de esta forma las superficies adicionales se moverán junto con la superficie asociada al *cut-off* hasta su posición restaurada. Cualquier superficie situada por debajo de la traza de falla no será incluida en la operación del módulo. Al llevar a cabo la restauración bloque por bloque, es posible variar el *ángulo de deslizamiento* (*slip angle*), que también puede expresarse como *ángulo de cizalla*, en el bloque activo durante la deformación. El valor dado por *default* es 90° , aunque la mayoría de las veces que se utilice el módulo en bloques de falla independientes este valor cambiará de acuerdo a la variación del ángulo de falla y a la geometría del bloque deformado (figura II.25).

En los casos donde era necesario restaurar una sección para eliminar el efecto de basculamiento general que mostraban las superficies interpretadas, se utilizó la técnica de la restauración *transfer / flexural slip*, que permite construir componentes (capas agrupadas como un solo paquete, que puede de esta forma ser transferido a un estado restaurado) para ser llevados a un estado previo al basculamiento. En ocasiones es necesario reconstruir los espesores de capas que han sido erosionadas por este fenómeno, construyendo geometrías proyectadas a partir de la geometría de una capa conocida que pueda recrear la de la capa erosionada.

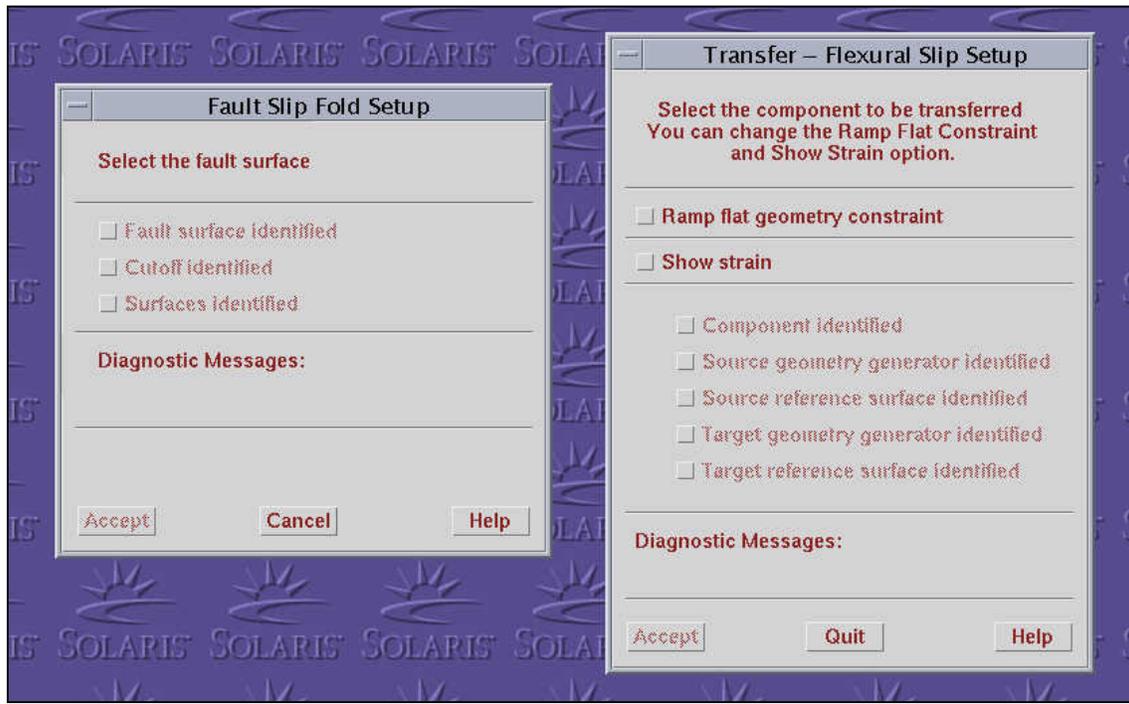


Figura II.23: Menús de los módulos Fault-slip fold y Transfer/ flexural slip, utilizados a lo largo de la restauración y balanceo de las secciones seleccionadas del área China-Barrilete.

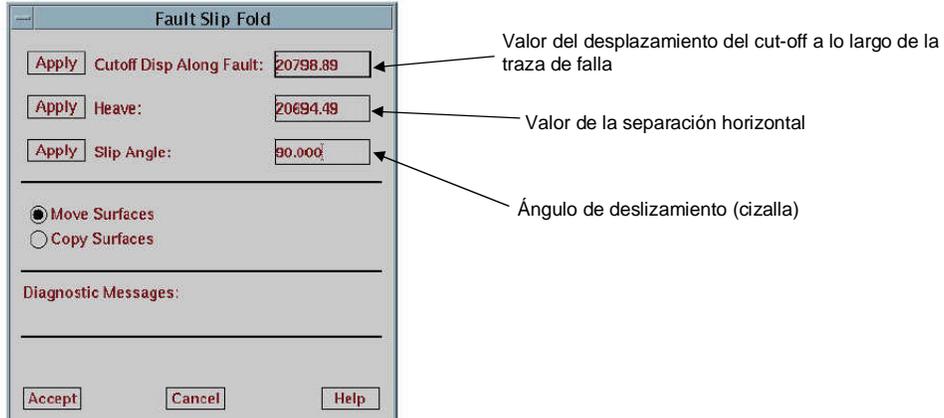


Figura II.24: El módulo de restauración y balanceo Fault-slip fold permite operar variaciones del ángulo de cizalla y mostrar la magnitud del desplazamiento y separación horizontal de bloques de falla.

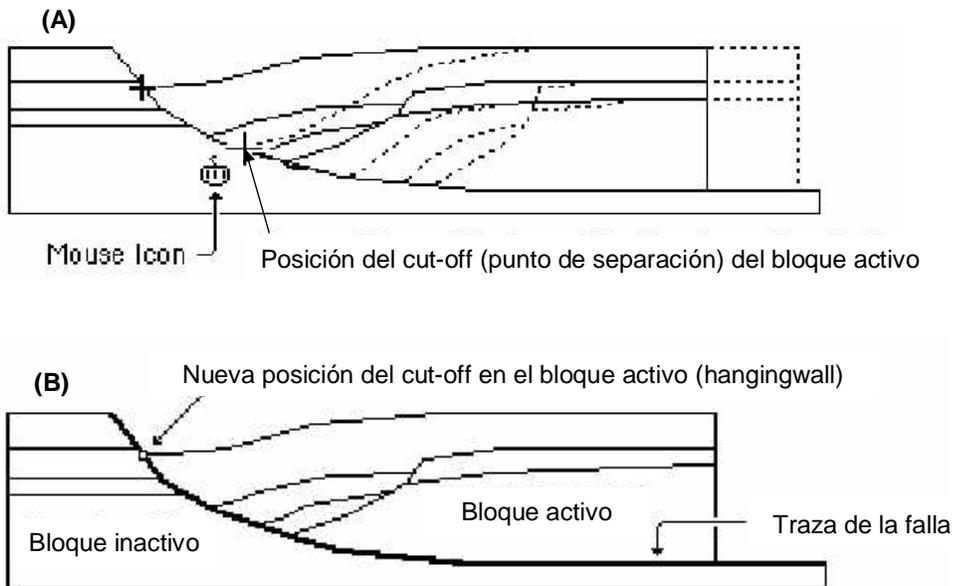


Figura II.25: El módulo de restauración Fault-slip fold permite trasladar la geometría de un bloque de falla a lo largo de la traza. La geometría del bloque restaurado puede ser adaptada al ángulo de cizalla de la falla, mientras que el bloque inactivo se considera sin deformación.

Haciendo uso de estas técnicas, se llevó a cabo la restauración y balanceo de dos secciones seleccionadas dentro del área de estudio, que muestran rasgos característicos de la estructura del Paleoceno Wilcox y de las formaciones que la rodean.

II.7.2 Restauración y balanceo estructural de la sección 910 (CB-25)

La sección estructural 910 (CB-25) fue construida a partir de la interpretación de horizontes en tiempo en la línea sísmica IL-910, descrita anteriormente (figura II.26). Su orientación es W-E y su longitud es 24347 m. La conversión a profundidad fue llevada a cabo a partir de la interpretación en tiempo de diez horizontes sísmicos que representan a las unidades Yegua, Cook Mountain, Weches, Queen City, Reklaw, Eoceno Wilcox, Paleoceno Wilcox, Paleoceno Midway, Cretácico y Jurásico. Las velocidades de intervalo utilizados para operar el módulo de conversión a profundidad provinieron de los pozos Verano-1, Marfil-1, Calabaza-1 y Coli-1, siendo el pozo Verano-1 el único cuya localización coincidía con la línea sísmica. Las velocidades de intervalo de los pozos restantes, todos con un grado de proyección variable con respecto a la localización de la línea sísmica, sirvieron para definir dominios de velocidades dentro de los bloques en que podía ser dividida la sucesión de edad cenozoica. De esta forma, el bloque más occidental de la sección, nombrado “bloque Calabaza” por encontrarse en el dominio de velocidades obtenidas de dicho pozo y aparecer suficientemente diferenciado de los bloques restantes situados al oriente, fue convertido a

profundidad utilizando las velocidades de intervalo del pozo Calabaza-1, lo mismo que los bloques “Verano”, “Marfil” y “Coli”. El resultado de la conversión a profundidad revela un ángulo de buzamiento general cercano a los 4.5° que puede ser aplicado a las unidades dentro de la sección. La situación estructural de las unidades del basamento cinemático (Cretácico y Jurásico) muestra un monoclinal amplio con suave pendiente; sin embargo, el efecto del basculamiento es menos evidente hacia la porción oriental, donde la cima de las unidades mesozoicas muestra ángulos de buzamiento cercanos a la horizontal. La única señal de dislocamiento interpretada en estas unidades corresponde a una falla inversa que afecta a la parte superior de la unidad Cretácico en la parte de la sección donde el echado de las unidades mesozoicas disminuye. El efecto del basculamiento general provocó el intemperismo y erosión de las unidades Yegua, Cook Mountain, Weches, Queen City y Reklaw, que aparecen aflorando a lo largo de la sección. La falla maestra sub-horizontal que controla al sistema de fallas cenozoicas, representada por el nivel de despegue de la base del Paleoceno Midway, mantiene una posición paralela a la cima de la unidad Cretácico, y su traza se une con la correspondiente a la falla F-21 al adquirir ésta un ángulo de buzamiento de 13° . La variación de los ángulos de buzamiento para las fallas principales en sus porciones somera y profunda es más importante para aquellas que afectan toda la columna visible sobre el nivel de despegue (tipo 1), tales como la falla F-21 (65° - 13°), la falla F-1 (61° - 13°), y la falla F-3 (68° - 12°). Las fallas que afectan al Paleoceno Midway junto con el Paleoceno Wilcox, sin llegar a cortar las unidades más someras (tipo 2) poseen variaciones menores en sus ángulos de buzamiento (falla F-5Wx con 39° - 15° ; falla F-3Wx con 41° - 20°). La falla antitética

subsidiaria F-12Ant posee un ángulo de buzamiento constante de 46° , mientras que la falla antitética F-3Ant muestra una variación de 39° - 35° .

La magnitud del desplazamiento del Paleoceno Wilcox en torno a la traza de las fallas principales varía desde 61 m de la falla F-8 hasta 380 m de la falla F-3. Los desplazamientos correspondientes al Paleoceno Midway en estas mismas trazas de falla oscilan entre 152 m en torno a la falla F-21 y los 2000 metros a lo largo de la falla F-3 de la porción oriental.

La secuencia de restauración y balanceo inicia con la etapa restaurada con respecto a la cima de la unidad Weches (figura II.27 B). Utilizando los espesores de las unidades Weches, Queen City y Reklaw, medidos en los bloques que no mostraban pérdida de columna por erosión, y teniendo en cuenta la suposición de que dichos espesores mostrarían pocos cambios hacia la porción occidental de la sección, se proyectaron las geometrías y espesores de estas unidades dentro de la sección en estado deformado y se restauró la posición original de las unidades, incluyendo las unidades mesozoicas, utilizando el módulo transfer / flexural slip, para contrarrestar el efecto del basculamiento. De este modo fue posible obtener la probable geometría del basamento cinemático antes del basculamiento, cuya edad es estimada como contemporánea al depósito de la unidad Yegua (40-38 Ma) o incluso posterior. El desplazamiento a favor de las fallas medido para esta etapa de restauración es marginal para los bloques afectados (menos a los 100 m en todos los casos).

La etapa restaurada a la cima de la unidad Reklaw (figura II.27 C) muestra que el fallamiento que llegó a afectar a las unidades Weches y Queen City no había empezado a actuar en la zona, dado que restauración elimina el desplazamiento a

lo largo de la totalidad de las fallas presentes y los espesores se mantienen sin grandes variaciones. Esto puede ser interpretado como una forma de registrar las condiciones tectónicamente pasivas que imperaban en la cuenca en el periodo en que se depositaron las unidades del Eoceno Inferior y Medio. La restauración a la cima del Eoceno Wilcox (figura II.27 D) muestra la presencia de actividad menor en las fallas F-8, F-1 y F-3; sin embargo, no se aprecia expansión importante de los espesores. Por otro lado, el modelo presenta al bloque occidental completamente restaurado con respecto al desplazamiento a lo largo de la falla F-21, lo que indica que la actividad tectónica a lo largo de este rasgo es más reciente que la de las demás fallas de tipo 1 en la zona de estudio.

La etapa de deformación más importante para la zona de estudio, relacionada con la formación de las trampas, ocurrió en el periodo de depósito de la unidad Paleoceno Wilcox (figura II.27 E), y este fenómeno está ligado con la deformación, dislocamiento y traslado a favor de echado de la unidad Paleoceno Midway. La expansión del Paleoceno Wilcox se registra a partir de la falla F-8 y continúa observándose en los bloques de falla de la porción centro-oriental, con espesores crecientes, hasta llegar al espesor de 998 m en el bloque "Verano". La discrepancia entre las magnitudes de desplazamiento de las unidades que son cortadas por una misma falla, con apenas unas decenas de metros para las unidades más someras, mientras que el Paleoceno Midway registra desplazamientos que superan los 1000 m, hace recordar la naturaleza peculiar de este tipo de deformación, donde la magnitud del aporte sedimentario, junto al gradiente de la zona y la naturaleza del substrato, definen los *episodios* en que se desarrolla la estructura. La probable geometría del Paleoceno Midway se muestra

en la etapa de restauración operada a la cima de esta unidad (figura II.27 F). Según este modelo, la longitud inicial del paquete antes de la deformación era de 20314 metros, contra los 24347 de la sección actual, lo que representa un estiramiento de la unidad Paleoceno Midway de 16%. Asimismo, permite observar la probable posición de las trazas de falla del Paleoceno superior en su posición original, anterior a su traslado junto con los bloques de falla del Paleoceno Wilcox.

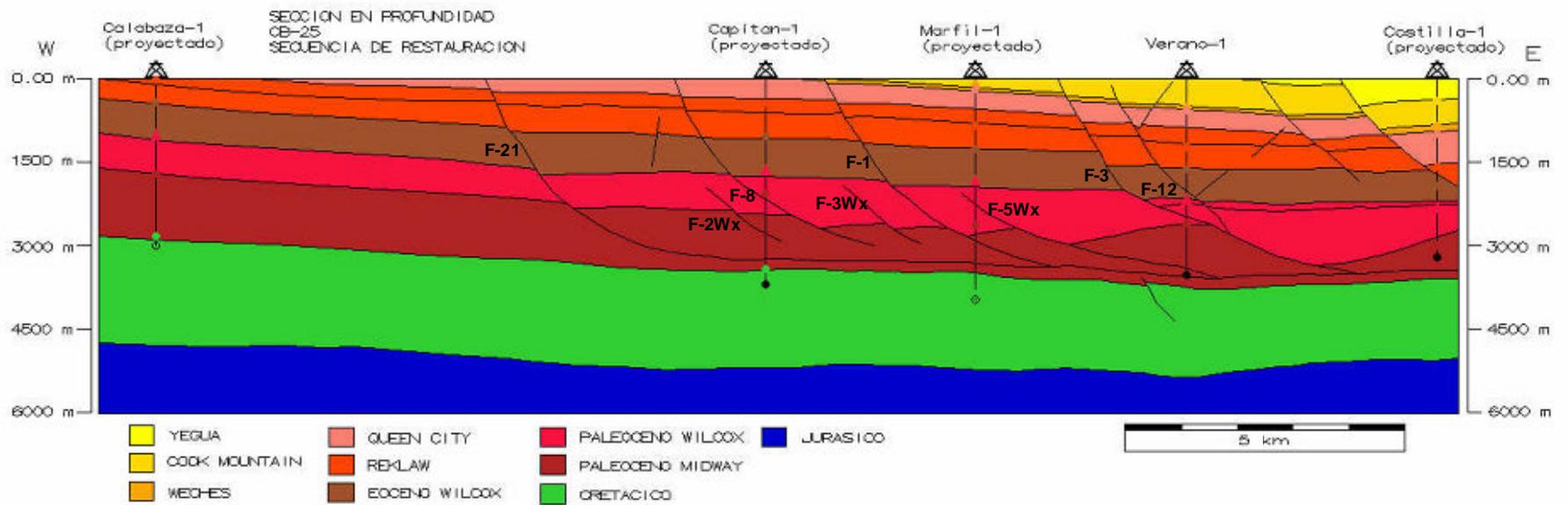


Figura II.26: Sección estructural 910 (CB-25) que incluye los nombres asignados a las fallas interpretadas. La secuencia de restauración se realizó a partir de esta versión y los resultados de la conversión fueron comparados con los marcadores obtenidos de pozos del área.

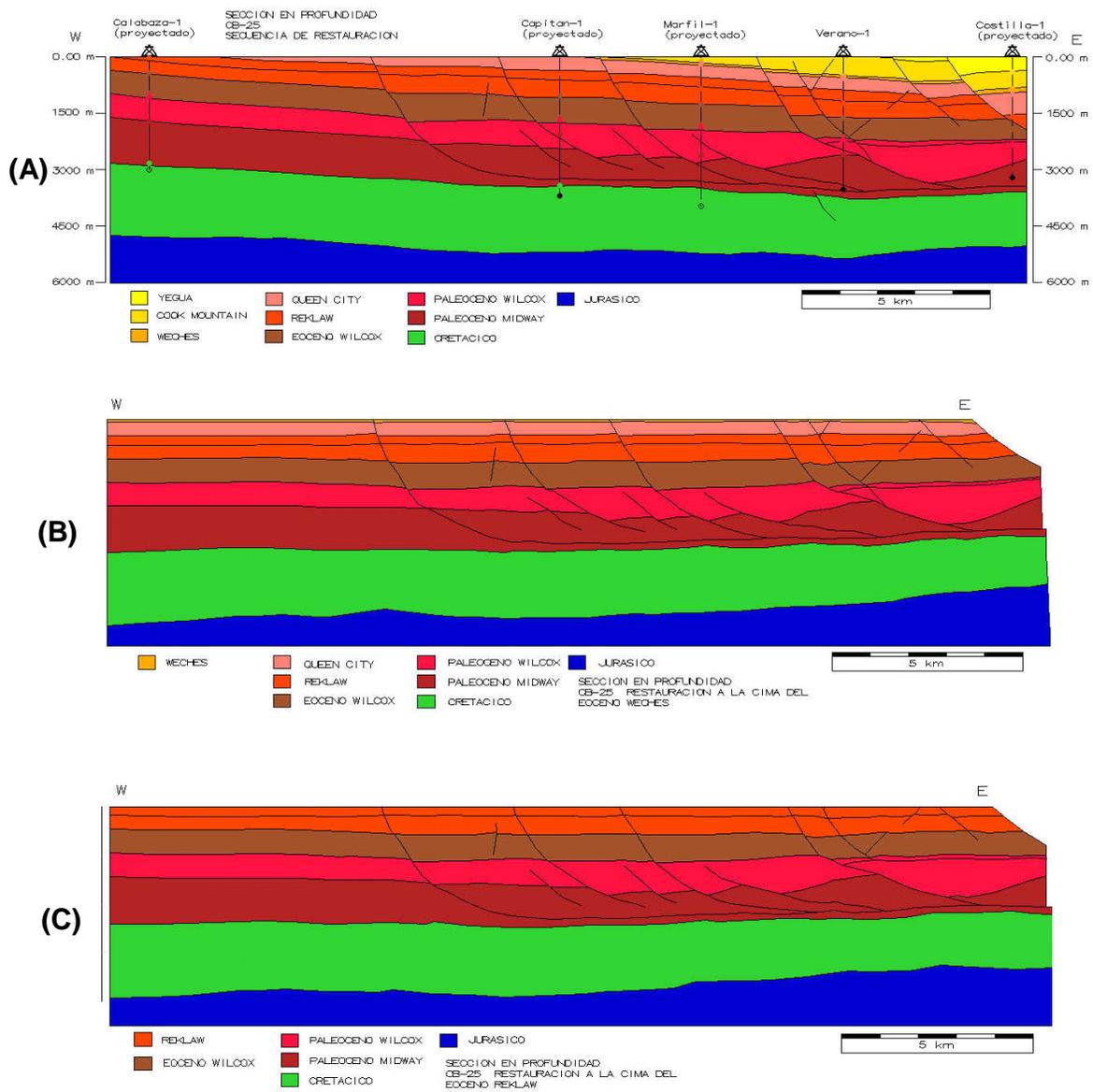


Figura II.27: Secuencia de restauración a partir de la sección 910 (CB-25) en estado deformado actual (A). Las etapas de restauración a la cima de la unidad Weches-Queen City (B) y Reklaw (C) muestran escasa actividad de las fallas normales lístricas, concentrada en la porción oriental de la sección, previa al episodio de basculamiento y reactivación de fallas que ha sido interpretado como de edad Eoceno Superior. Obsérvese que el efecto de basculamiento ha sido eliminado a partir de la etapa Weches-Queen City, obteniéndose una probable posición del basamento cinemático antes del último evento de deformación. Ver detalles en el texto.

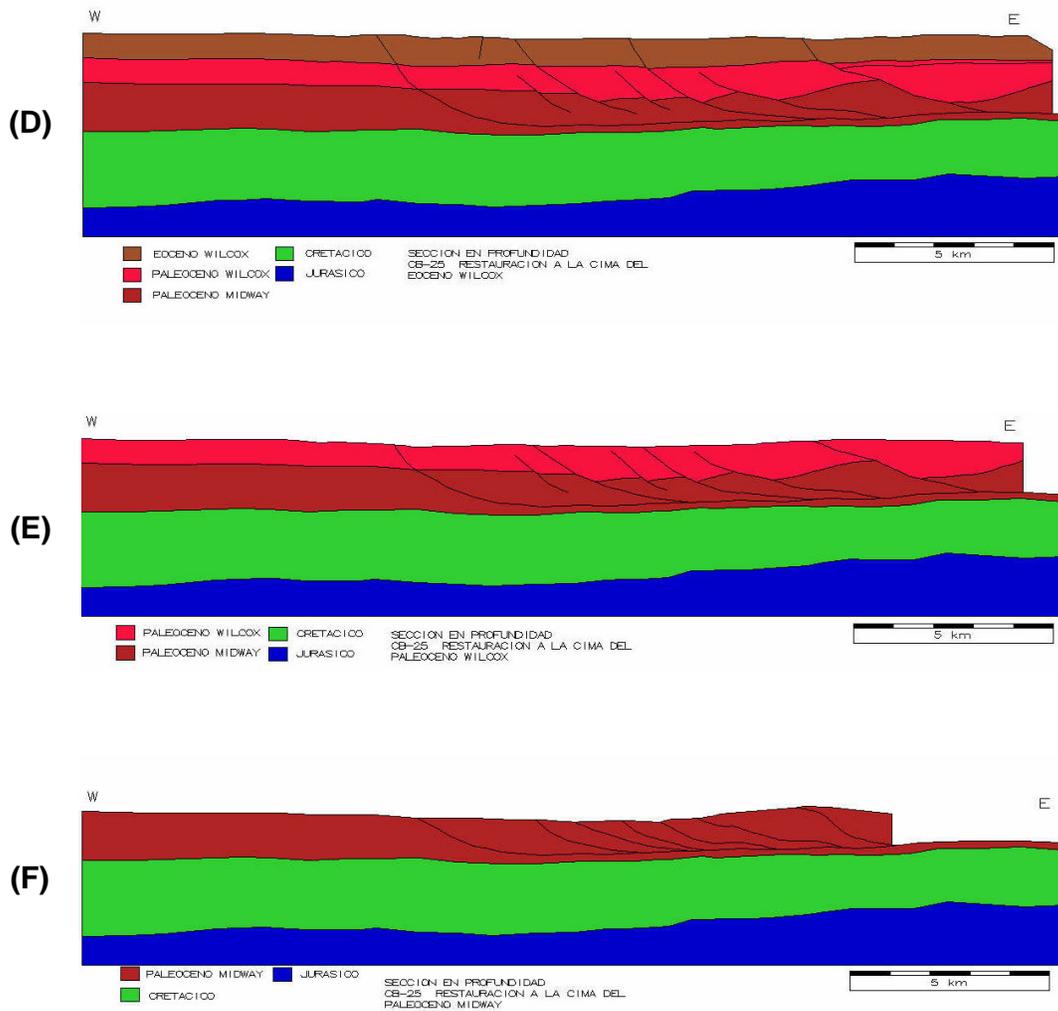


Figura II.27: Los espesores de la unidad Eoceno Wilcox (D) muestran poca variación con respecto a la tendencia al engrosamiento que presenta la unidad Paleoceno Wilcox (E), desarrollada en el episodio de fallamiento lístrico normal de crecimiento del Paleoceno Superior. La restauración del paquete del Paleoceno Midway antes de la deformación (F) presenta la longitud inicial de la unidad, junto con la posición restaurada de las trazas de falla.

II.7.3 Restauración y balanceo estructural de la sección 1480 (CB-30)

La sección estructural 1480, localizada en la porción sur del área de estudio (figura II.28), fue construida a partir de la conversión a profundidad de los horizontes interpretados en la línea sísmica IL-1480; la sección posee una dirección W-E (Azimut de 90°) y una longitud de 23420 metros. Los horizontes sísmicos interpretados corresponden a las cimas de las unidades Cook Mountain, Weches, Queen City, Reklaw, Eoceno Wilcox, Paleoceno Wilcox y Cretácico. Las velocidades de intervalo que fueron tomadas en cuenta como datos de entrada para la conversión a profundidad provinieron de los pozos Cenicerito-1 y Otoño-1, coincidiendo este último pozo con la trayectoria de la línea sísmica original.

La estructura que se interpreta en la sección a profundidad muestra un estilo estructural similar al descrito para la sección 910, con un nivel de despegue situado en la base de la sucesión terciaria, en torno al cual se enraizan por lo menos dos fallas lítricas normales importantes (Falla F-21 en la porción occidental y falla F-3 en el extremo oriental). La unidad Cook Mountain es la más afectada por el intemperismo y la erosión provocados por el fenómeno de basculamiento general ocurrido en la zona de estudio, aunque su efecto se puede observar en las unidades Weches y Queen City hacia la porción occidental. Los valores del ángulo de buzamiento general a lo largo de la sección aumentan conforme se avanza hacia el oriente. Para el bloque occidental, limitado hacia el oriente por la falla F-21, el valor es 2.5°, mientras que los bloques centrales, localizados entre la falla F-21 y la falla F-3, muestran un valor de 4.5°, y finalmente

el bloque oriental presenta un ángulo de 5° . La magnitud del desplazamiento a lo largo de trazas de falla, medido a la cima de la unidad Paleoceno Wilcox, varía desde los 38 m para la falla F-21 y los 744 m registrados en la falla F-22. Los valores de desplazamiento medidos a la cima de la unidad Paleoceno Midway oscilan entre los 43 m de la falla F-21 y los 922 observados en torno a la falla F-3. La primera etapa de la secuencia de restauración estructural se llevó a cabo teniendo como superficie de referencia a la cima de la unidad Weches (figura II.29 B). Para lograr esto se consideró necesario, al igual que en la sección 910, recurrir a la reconstrucción de espesores perdidos que posteriormente fueron horizontalizados, como un paso previo a la restauración y balanceo de bloques de falla individuales. El resultado muestra la concordancia de espesores para las unidades Weches y Queen City y la escasa influencia del fallamiento normal en esa etapa. El desplazamiento a lo largo de la falla F-21 prácticamente es restaurado para todas las unidades afectadas, mientras que las fallas de la porción oriental llegaron a desplazar, con un efecto de expansión moderado, a la unidad Queen City.

La etapa de restauración a la cima de la unidad Reklaw (figura II.29 C) refleja la nula actividad en la mayoría de las fallas del área, con la excepción de la falla F-22 de la porción oriental, la cual registra un desplazamiento de 88 m a lo largo de la traza. El resultado de la restauración a la cima del Eoceno Wilcox (figura II.29 D) registra actividad tectónica en la porción oriental de la sección, con las fallas F-3 y F-22 acomodando la expansión de los bloques de falla, principalmente en torno a la traza de la falla F-22. Para la etapa de restauración a la cima de la unidad Paleoceno Wilcox (figura II.29 E) la expansión a lo largo de la falla F-3 se

desarrolla en torno a la rotación subhorizontal de la unidad Paleoceno Midway, mientras que la actividad de las fallas F-1 y F-5Wx en la zona central de la sección es menos importante. El ángulo de buzamiento general calculado para esta etapa de restauración es aproximadamente 1.5° en la porción occidental y de 2.8° en la porción central-oriental.

El resultado de la restauración a la cima de la unidad Paleoceno Midway (figura II.29 F) registra una longitud antes de la deformación de 21600 m, que significa un estiramiento de la unidad PMy de 7.8%.

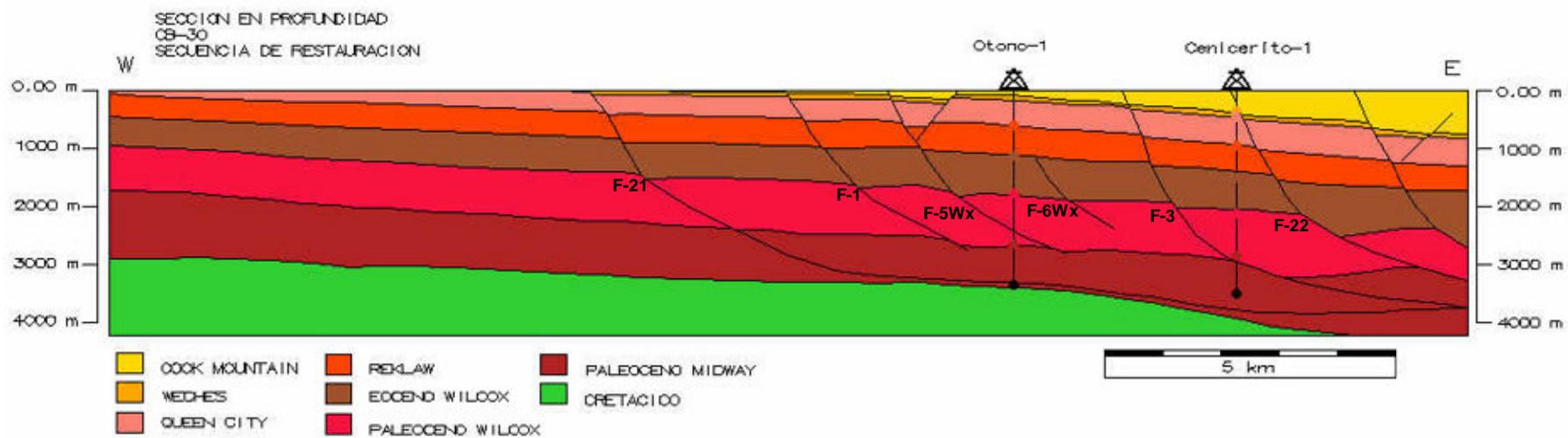


Figura II.28: Versión editada de la sección estructural 1480 (CB-30), sobre la que se llevó a cabo la restauración y el balanceo hasta la etapa Paleoceno Midway. Se han anotado las fallas principales que afectan al PWx. Nótese la profundización de los paquetes mesozoicos hacia el oriente.

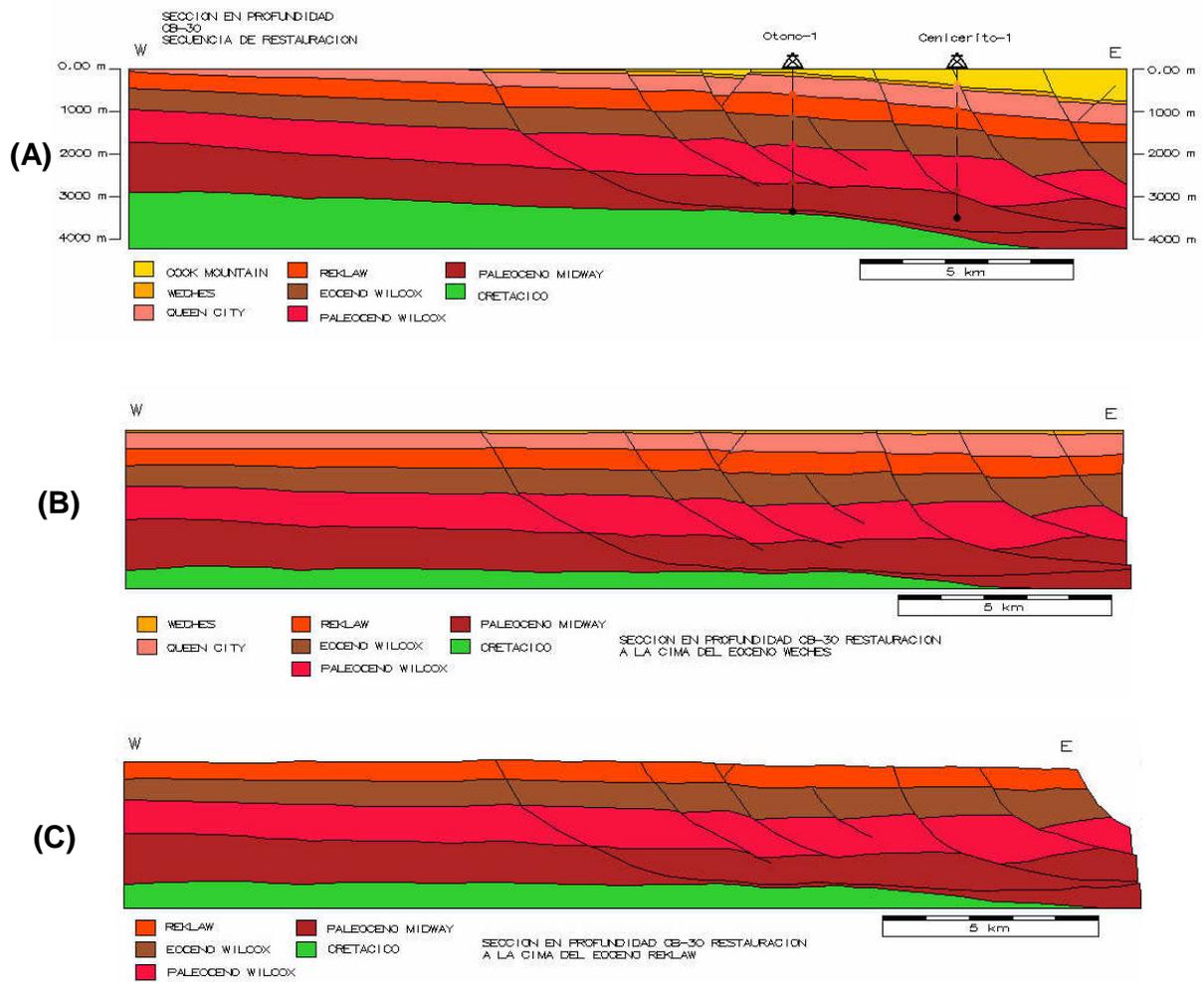


Figura II.29: Las etapas de restauración de la sección 1480 a la cima de las unidades Weches-Queen City (B) y Reklaw (C) reflejan escasa actividad tectónica hacia la porción central-oriental, en torno a un gradiente restaurado no mayor de 2.8° en el caso de la etapa Reklaw. Al igual que la sección 910, la unidad correspondiente al Cretácico ha sido restaurada utilizando el módulo Transfer/ flexural slip, que elimina el efecto de basculamiento y restaura la posición de los bloques de falla.

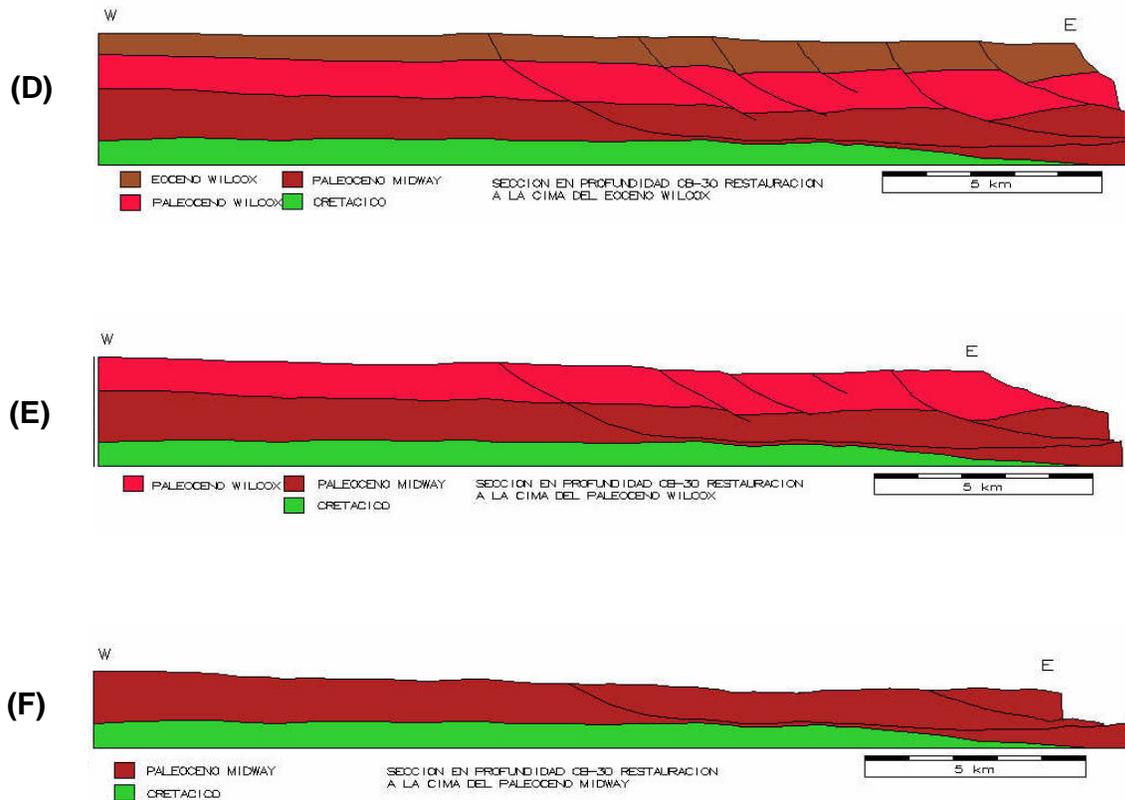


Figura II.29: El resultado de la restauración a la cima del Eoceno Wilcox (D) muestra expansión importante en torno a la falla F-22 y moderada en torno a la falla F-3. La expansión de la unidad Paleoceno Wilcox (E), aunque considerable en el bloque activo de la falla F-3, no es tan importante como el que presenta la sección 910, y la restauración a la cima del Paleoceno Midway (F), con una extensión restaurada cercana al 8%, comparada con 16% de la sección 910, hace pensar en una extensión diferenciada que fue definida por la actuación de niveles de despegue distintos.

III RESULTADOS

III.1 Evolución estructural del área China- Barrilete

Tomando como punto de partida la restauración y balanceo estructurales llevados a cabo en las secciones seleccionadas dentro del área de estudio, en donde se observaron los periodos de actividad de las fallas interpretadas en el modelo a profundidad, se propone la existencia de tres periodos de actividad tectónica que afectaron a los materiales sedimentarios del área China-Barrilete en el lapso comprendido entre el depósito de las unidades Paleoceno Wilcox y Eoceno Yegua. Estos eventos de deformación son nombrados de la siguiente manera:

- 1.- Formación de las cuñas sin-cinemáticas del Paleoceno Superior (PWx).**
- 2.- Fallamiento menor del Eoceno Inferior-Medio.**
- 3.- Basculamiento y fallamiento del Eoceno Superior.**

Los efectos de la deformación a escala regional del evento laramídico convirtieron a la zona de estudio en parte de la cuenca de antepaís, sujeta a deformación gravitacional, que se desarrolló sobre las antiguas plataformas cretácicas, con un retroceso del margen de plataforma de entre 80 y 200 km a partir del margen de plataforma del Cretácico Inferior (Galloway et al., 2000). Los sedimentos de naturaleza clástica que conformaron la parte basal de la Formación Paleoceno Midway fueron depositados en ambientes sedimentarios relativamente profundos (Ziga et al., 1999; Uribe et al., 2003), y con un gradiente del sustrato no mayor de

3°. Las geometrías internas complejas que ocasionalmente se observan en la unidad Paleoceno Midway a escala sísmica son la expresión de los desarrollos turbidíticos descubiertos por la perforación de pozos en la cuenca. Estos cuerpos arenosos de la parte basal del Paleoceno Midway se alternan con potentes paquetes de materiales de naturaleza arcillosa (Ziga et al., 1999; Uribe Cifuentes et al., 2003) que constituyen la mayor parte de la unidad hasta su contacto con la unidad Paleoceno Wilcox. Es esta acumulación de lutitas hemipelágicas la que se considera la capa que participa como despegue tectónico para el sistema de bloques de falla que se desarrollaron a partir del Paleoceno Superior. **La formación de las cuñas sin-cinemáticas del Paleoceno Superior** ocurre durante la etapa de desarrollo de un sistema deltáico que aporta cantidades importantes de sedimentos en una amplia zona, la cual experimentó varias etapas de regresión marina, provocadas por levantamiento tectónico e intercaladas por transgresiones marinas de menor magnitud que favorecieron el depósito de los paquetes de naturaleza clástica. Las cuñas sin-cinemáticas más antiguas se desarrollan en torno a fallas que se localizan en la porción occidental de la zona afectada por fallamiento gravitacional. Se trata de fallas que enraizaron en un nivel de despegue que puede coincidir con la base del Paleoceno Midway (falla F-3Wx) o que se desarrollan en un nivel intermedio, situado alrededor de la base del Paleoceno Wilcox (falla F-6Wx). Algunas de estas fallas, no obstante generar rotación considerable en la capa pre-cinemática del PMy y expansión en el PWx, no alcanzaron a afectar la cima del Paleoceno Wilcox, mientras que otras reanudaron su actividad después de la formación de la superficie de discontinuidad, durante el periodo de depósito de la unidad Eoceno Wilcox,

llegando a cortar, en el caso de las fallas F-3 y F-8, la totalidad de las unidades identificadas sobre el nivel de despegue de la base del Paleoceno Midway. Las cuñas con mayor espesor se formaron en torno a las fallas de la zona oriental del área de estudio, siendo la falla F-1, además del conjunto de fallas organizado a partir de la falla F-3 (fallas F-12, F-11 y F-4), las que produjeron las cuñas más importantes que pueden ser observadas en imágenes sísmicas. De acuerdo con las reconstrucciones realizadas, las fallas de la parte central del área, situadas entre la falla limítrofe F-21 y la falla F-3, provocaron rotación importante del paquete pre-cinemático y permitieron la formación de cuñas de dimensiones mayores donde el nivel de despegue funcionó al nivel de la base del Paleoceno Midway. A partir de la zona del cubo sísmico donde se ubica el pozo Capitán-1, la magnitud de las cuñas del Paleoceno Wilcox fue menor, debido a la disminución del fenómeno de rotación de los bloques precinemáticos que ocurrió al situarse gradualmente el nivel de despegue en un nivel más somero, correspondiente a la parte superior del Paleoceno Midway en lugar de su base. Hacia la zona donde se ubican los pozos Otoño-1 y Cenicerito-1, la cuña sedimentaria formada en torno a la falla F-22 alcanzó un espesor considerable. El cese de la actividad de las fallas que dieron origen a las cuñas sin-cinemáticas del Paleoceno Wilcox probablemente tuvo que ver con el final de la influencia del delta que aportaba materiales de manera lo suficientemente rápida para seguir propiciando la rotación de los bloques. El ambiente de depósito costero que se interpreta para la unidad Eoceno Wilcox (Galloway et al., *in* Salvador, 1991) hace pensar que la progradación del Eoceno Inferior situó los deltas de la porción norte del Golfo de México, entre los que se cuenta el sistema que generó las cuñas del área China-

Barrilete, hacia el oriente de su posición. El contacto de la unidad Eoceno Wilcox con la parte superior de las cuñas del Paleoceno Wilcox muestra patrones discordantes, lo que sugiere que el episodio de regresión afectó ampliamente al área de estudio. La geometría externa tabular que presentan las unidades situadas sobre el Paleoceno Wilcox, sin mostrar zonas expandidas importantes que puedan ser observadas a escala sísmica, está asociada a la continuación de estas condiciones de mantenimiento de la regresión marina que prevalecieron en la zona. Sin embargo, aunque el ángulo de buzamiento general se había mantenido sin grandes variaciones a partir del depósito de la unidad Paleoceno Wilcox (2.8° a 3°), algunas fallas de la porción central-oriental (F-1 y F-3) registraron dos episodios de actividad discreta, contemporánea a los periodos de depósito del Eoceno Wilcox y de las unidades Queen City-Weches, como respuesta de la migración del delta hacia oriente. Esta etapa de **fallamiento menor del Eoceno Inferior-Medio** aparece diferenciada del último evento de deformación que se registra en el área de estudio, que se manifestó en forma de un incremento del ángulo de buzamiento general, que en algunos bloques llegó a alcanzar valores superiores a los 5° . De acuerdo con Pérez Cruz, 1992 (ver apartado I.4.2 de este trabajo), la zona de altos de basamento situada hacia el occidente de la cuenca de Burgos, que incluye los anticlinales de Salado y de la Sierra de Picachos, sufrió deformación en el Eoceno Medio que provocó su levantamiento y basculamiento. Los materiales de cobertura situados al oriente de este rasgo, incluyendo las unidades mesozoicas, conformaron un amplio monoclinial con buzamiento hacia oriente que fue escenario de un evento de reactivación tectónica del sistema de fallas del Paleoceno Wilcox. Los planos de

falla que permanecieron inactivos hasta antes del periodo de depósito de la Formación Yegua (se considera que esta es la unidad litoestratigráfica contemporánea a la deformación, ya que se han registrado espesores considerables por la perforación de pozos exploratorios en la porción oriental del área de estudio) alcanzan una nueva etapa de actividad que extiende dichos planos hasta alcanzar las unidades no afectadas del Eoceno Medio y Superior (Cook Mountain y Yegua). La falla limítrofe F-21 tiene su origen en este periodo de actividad tectónica, al igual que las fallas subsidiarias y antitéticas a las fallas mayores del sistema (ver figura III.2 para clasificación de fallas). Esta etapa de **basculamiento y fallamiento del Eoceno Superior** provoca además rotación adicional de los bloques del Paleoceno que no parece ser, a juzgar por los resultados que arrojan las restauraciones, suficiente para cambiar la geometría y la posición de las estructuras formadas antes del Eoceno.

El basculamiento general elevó el extremo occidental de la cuenca de Burgos, favoreciendo un nuevo periodo de regresión marina y convirtiendo a la plataforma clástica en el área China-Barrilete en una zona con topografía positiva sujeta al intemperismo y a la erosión. A partir de la denudación de las unidades litoestratigráficas del Eoceno Wilcox, la zona de estudio parece no haber sufrido otro episodio de deformación importante, y las fallas han dejado de actuar probablemente después del basculamiento del Eoceno Medio.

Partiendo del mapa a profundidad de la cima del Paleoceno Wilcox elaborado para el área de estudio (figura III.1), se agruparon las fallas que lo afectan, de acuerdo con la clasificación que toma como punto de partida la relación de la falla con un nivel de despegue (figura III.2), comentada anteriormente en el presente trabajo

(ver sección II.4.3). El mapa muestra la posición de las fallas que conectan al Paleoceno Wilcox con el nivel de despegue de la base del Paleoceno Midway (tipo 1 de tonalidad azul) y cuyos planos continúan cortando las unidades litoestratigráficas más someras. Las fallas que afectaron al Paleoceno Wilcox, desarrollando bloques rotados con expansión, pero deteniendo su actividad antes del depósito de la cima del Paleoceno Wilcox (tipo 2 de tonalidad naranja), están representadas por la falla F-5Wx, que en la porción Sur del cubo fue reactivada durante el evento de basculamiento y fallamiento del Eoceno Superior, extendiéndose su plano hasta cortar las unidades someras. Las fallas subsidiarias a las principales (tipo 3 de tonalidad verde) no muestran relación con un despegue.

III.2 Diagrama de eventos tectonoestratigráficos del área China-Barrilete

El diagrama (figura III.3) ilustra la historia de la actividad tectónica de las fallas que llegaron a afectar la configuración del Paleoceno Wilcox en el área de estudio. La relación de algunas de ellas en la formación de las cuñas sincinemáticas del Paleoceno Wilcox es de primera magnitud, por lo que el diagrama representa finalmente los eventos tectonoestratigráficos que fueron interpretados. De acuerdo con este modelo, la conformación de las cuñas ocurrió en el lapso entre 57.9 Ma y 54.8 Ma, periodo de depósito de la unidad Paleoceno Wilcox, en torno a los bloques rotados de fallas que en algunos casos continuaron su desarrollo discretamente en el Eoceno Temprano (54.8 Ma a 46 Ma), o detuvieron su

actividad antes del final del depósito del Paleoceno Wilcox. Un nuevo pulso de actividad menor, sin evidencias de expansión, de las fallas formadas en el Paleoceno ocurrió a partir de 45 Ma y continuó por un lapso de aproximadamente un millón de años (este tipo de actividad está marcada en el diagrama por líneas punteadas, mientras que los periodos de actividad principal están representados por rectángulos de tonalidad roja). La conformación estructural de la zona de estudio, tal como aparece actualmente, se dio con el evento de basculamiento y fallamiento del Eoceno Tardío, el cual afectó la zona después de iniciar la sedimentación de la unidad Yegua (40 Ma) y continuó deformando los materiales terciarios probablemente después del término de la sedimentación de esta unidad (38 Ma).

Para el presente trabajo se incluye una jerarquía preliminar, basada en aspectos tratados anteriormente, del área de estudio en tres zonas que ofrecen características distintivas dentro de un estilo estructural común (figura III.4). La subdivisión se basa principalmente en la presencia de cuñas sin-cinemáticas en los bloques y en las dimensiones de éstas, de acuerdo a lo observado en imágenes sísmicas y a los resultados de conversiones a profundidad de secciones estructurales. Las zonas han sido identificadas basándose en nombres de pozos exploratorios:

1.- Zona “China”, delimitada hacia oriente por la falla F-21, y caracterizada por la ausencia de bloques rotados y paquetes expandidos en torno a fallas de crecimiento a nivel de la unidad Paleoceno Wilcox. Los paquetes aparecen formando un monoclinas con buzamiento hacia el oriente. La situación estructural de la unidad Paleoceno Wilcox permite suponer la existencia de trampas de tipo

estratigráfico en intercalaciones arenosas limitadas hacia la cima de la unidad por una superficie de discontinuidad con respecto a la base de la unidad Eoceno Wilcox.

2.- Zona “Zinfandel-Verano”, cuyos límites están definidos al occidente por la falla F-21 y al oriente por la falla F-3. Las cuñas se desarrollaron a partir de la falla F-8 y alcanzan su máximo espesor en torno a las fallas F-1 y F-5Wx. El tipo de trampas que se observa dentro del Paleoceno Wilcox en esta zona es de tipo combinado falla/pliegue con componente estratigráfica, donde las expansiones se encuentran limitadas por los planos de falla a lo largo de toda el área.

3.- Zona “Cenicerito”, limitada al occidente por la falla F-3 y el conjunto de fallas secundarias F-4, F-11 y F-12. Dentro de esta zona se presenta una cuña sedimentaria independiente de las producidas en torno a las fallas del bloque “Marfil-Verano”; sin embargo, la columna sedimentaria situada al oriente de la falla F-3 se profundiza y no es posible, con el alcance de la información sísmica disponible, determinar el extremo oriental del bloque expandido en torno a la falla F-22. El tipo de trampa es similar al de la zona “Marfil-Verano”.

III.3 Tipos de trampas y relación con probables *plays* del Paleoceno Wilcox en el área China-Barrilete

Allen y Allen, 1990, definen a un *play* como “una familia de prospectos aún sin perforar y de acumulaciones descubiertas de petróleo que se considera que comparten un mismo tipo de yacimiento, un sello superior regional y un sistema de carga de hidrocarburos”. Un yacimiento está definido por una roca cuyas

características favorables la convierten en el paquete que contiene los hidrocarburos, así como por las características geométricas del reservorio (trampa) y por el sello que asegura la permanencia del entrapamiento. Los dos tipos básicos de trampa, según Biddle y Wielchowsky, 1994, son estructurales y estratigráficas, y de acuerdo con una división de los sub-tipos dentro de estos dos grandes grupos, se considera que en el área China-Barrilete se encuentran trampas de los sub-tipos:

1.- Fallas lítricas normales (sintéticas) despegadas (estructural-estratigráfica).

2.- Truncación por discordancia asociada a basculamiento regional (estratigráfica).

Dentro del tipo 1, o **fallas lítricas normales despegadas**, se encuentran las estructuras de las zonas “Zinfandel-Verano” y “Cenicero”, donde han sido descubiertas acumulaciones de hidrocarburos en las cuñas sin-cinemáticas del Paleoceno Wilcox en los pozos Zinfandel-1, Verano-1 y Surco-1 (situado al Sur del área de estudio, en la continuación de la zona “Marfil-Verano”). El sello lateral de estas trampas está definido por las fallas lítricas sintéticas que confinan las cuñas, mientras que el sello superior está conformado por las lutitas de la parte superior del PWx. La carga de hidrocarburos provino de la roca generadora del Paleoceno Midway y posiblemente de la misma unidad PWx.

La erosión producida en la plataforma clástica basculada de la zona “China”, cuyos efectos continuaron afectando la cima del PWx al término de la actividad deltaica, definió la configuración de las trampas en esta zona, donde la truncación de los paquetes del PWx debajo de los cuerpos basales del EWx representa un

tipo de yacimiento que acabó de definirse con el último evento de basculamiento en el Eoceno Superior. El pozo China-104, situado en el extremo oriental de la zona “China”, produjo hidrocarburos en desarrollos arenosos dentro del PWx, lo que convierte esta zona en un objetivo a nivel de futuro *play* definido como tipo 2, en forma de **truncaciones por discordancia asociada a basculamiento regional**, independiente del *play* que conformarían las trampas en las zonas “Zinfandel-Verano” y “Cenicerito”. La calidad del sello superior estaría determinada por la arcillosidad de los paquetes basales del Ewx, y es este aspecto el que resultaría crítico para asegurar la existencia del elemento sello dentro de este *play*.

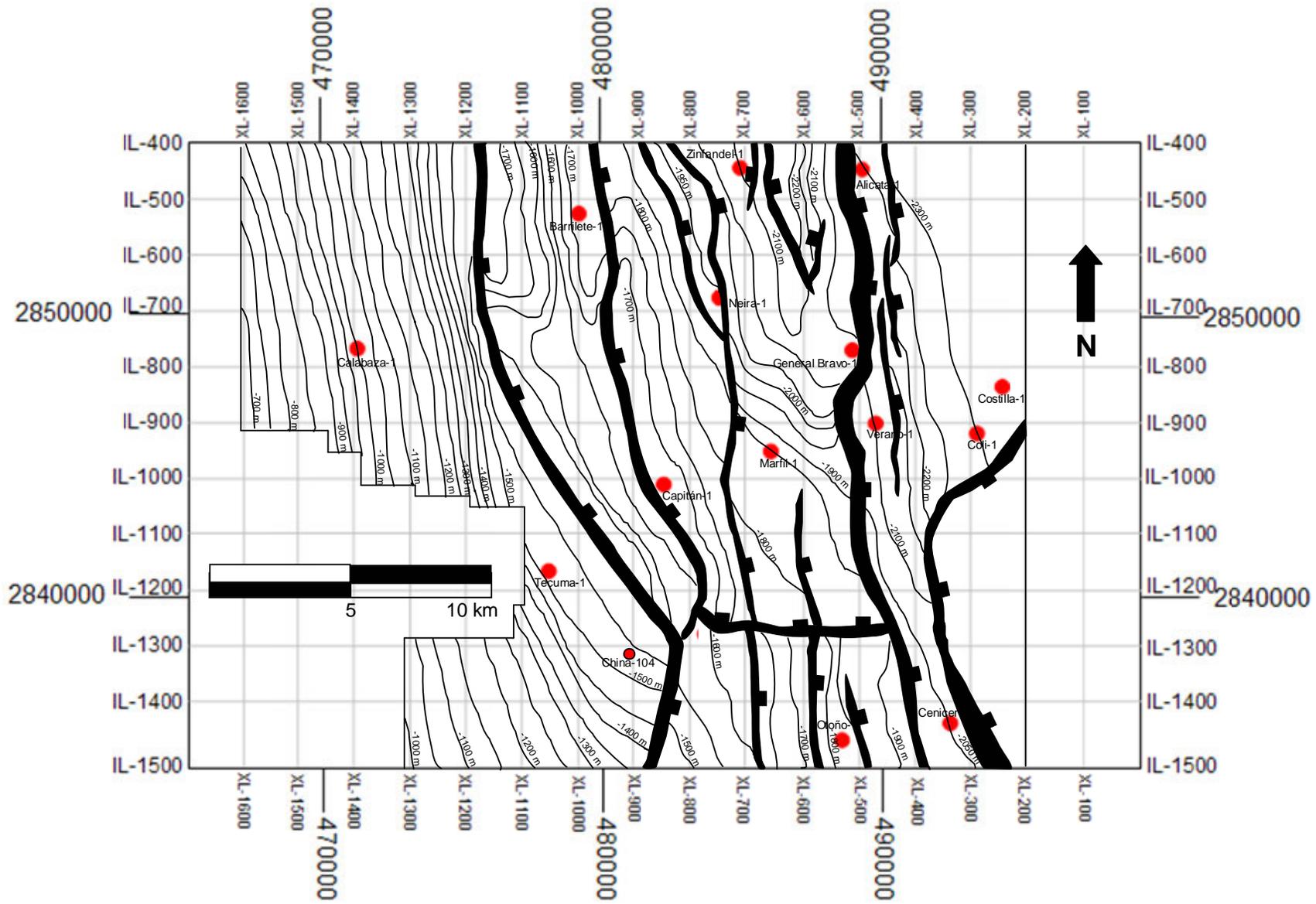
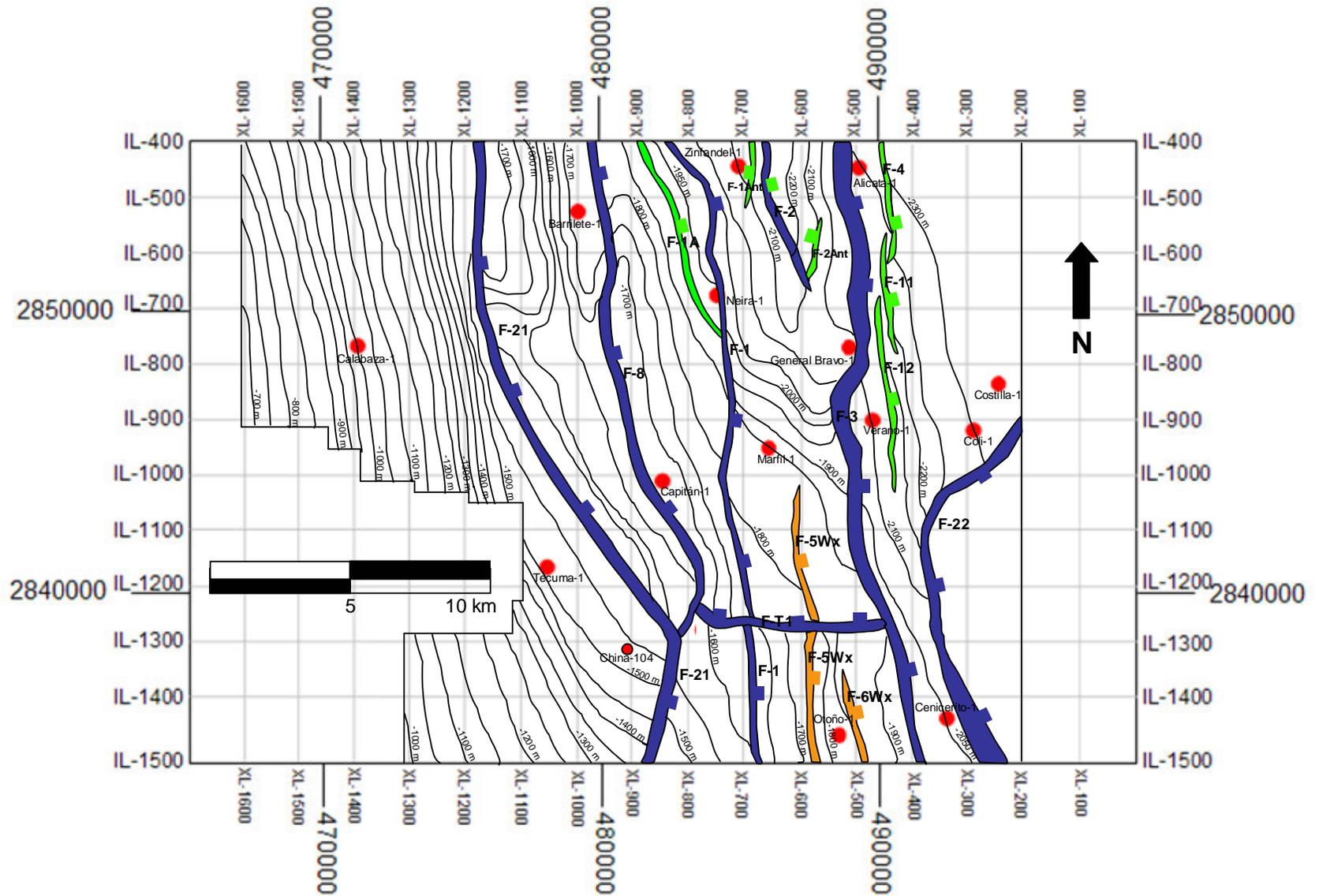


Figura III.1: Mapa a profundidad de la cima de la unidad Paleoceno Wilcox, obtenido a partir de los datos de secciones convertidas a profundidad en el área de estudio.



█ Fallas tipo 3, subsidiarias a las fallas tipo 1; sin nivel de despegue.
 █ Fallas tipo 1, que cortan la mayor parte de la columna terciaria y que enraizan sobre el nivel de despegue en el Paleoceno Midway.
 █ Fallas tipo 2, que provocaron expansión en el Paleoceno Wilcox pero no afectan las unidades someras. Nivel de despegue en el Paleoceno Midway.

Figura III.2: Jerarquización de las fallas que afectan al Paleoceno Wilcox, tomando en cuenta su relación con un nivel de despegue.

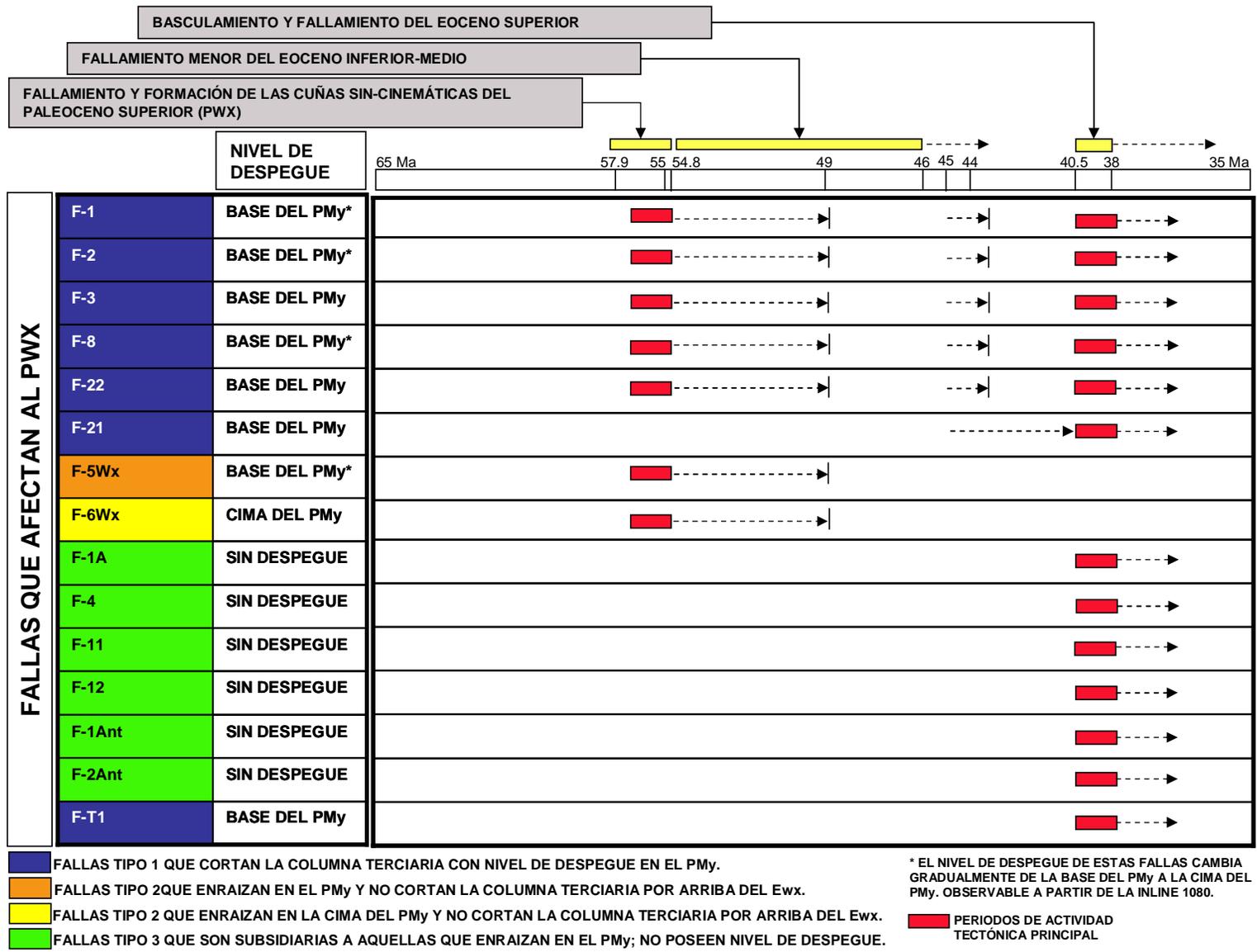


Figura III.3: Diagrama de eventos tectonoestratigráficos del Paleógeno para el área China-Barrilete, con énfasis en la unidad Paleoceno Wilcox. Las flechas representan pulsos de actividad tectónica menor.

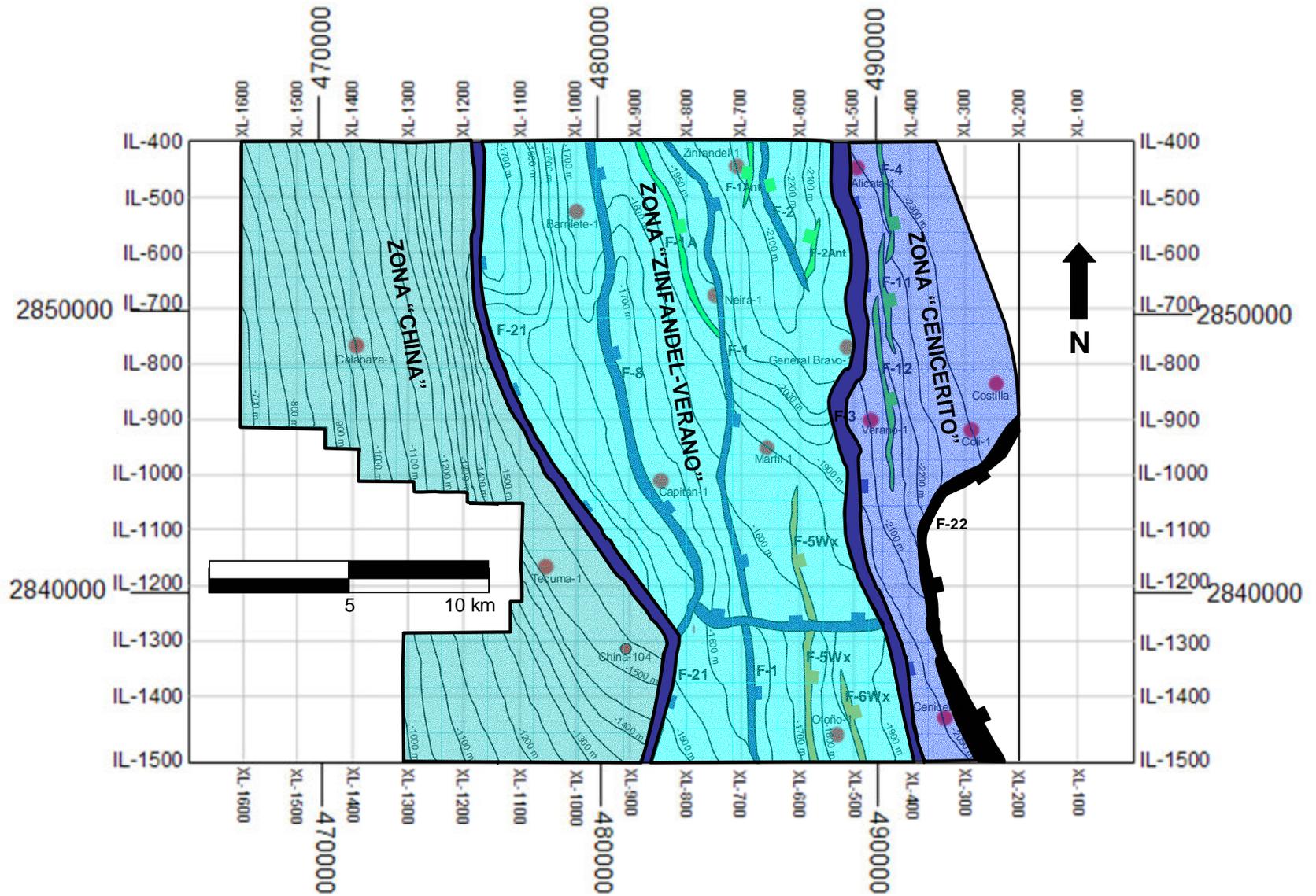


Figura III.4: División del área de estudio en "zonas" que corresponden a características estructurales de la unidad Paleoceno Wilcox. (A) Zona "China" con basculamiento. (B) Zona "Zinfandel-Verano", con fallamiento y expansión; (C) Zona "Cenicerto", con fallamiento y profundización de la columna.

IV CONCLUSIONES

1.- El área China-Barrilete fue escenario del depósito y acumulación de una sucesión de materiales de naturaleza siliciclástica que formó parte del relleno de la cuenca de antepaís del orógeno laramídico, situado hacia el occidente de la zona de estudio. La regresión marina inicial, producto del levantamiento y basculamiento de la zona, provocó el desarrollo de un paquete arcilloso donde se incluyen cuerpos turbidíticos en el Paleoceno Temprano (Formación Midway), seguido de una alternancia de arenas y lutitas depositadas en un medio ambiente de depósito deltáico, correspondientes a la Formación Paleoceno Wilcox (PWx). Las unidades litoestratigráficas que conforman el Eoceno del área de estudio forman parte de una secuencia sedimentaria que en lo general muestra un carácter regresivo, con ambientes de depósito costeros.

2.- Durante el periodo de depósito de la Formación Paleoceno Wilcox se desarrolló una serie de cuñas sedimentarias en torno a fallas lístricas normales de crecimiento que enraizaron dentro de las arcillas del Paleoceno Midway (PMy). La posición del nivel de despegue de las fallas lístricas fue un factor determinante para definir la cantidad de rotación del paquete pre-cinemático del PMy, que controló a su vez la magnitud de las cuñas, puesto que las que se desarrollaron en torno a fallas que enraizaron en la base del Paleoceno Midway son mayores que las formadas sobre un despegue más somero dentro del mismo PMy. Las cuñas que muestran mayores espesores están situadas en la porción oriental del cubo sísmico, y la cima de estos cuerpos, que registra el final del depósito deltáico y de

la actividad tectónica de las fallas de crecimiento, está representada por una superficie de discontinuidad observable en toda el área de estudio.

3.- Se registraron dos pulsos de actividad menor en fallas localizadas en la porción oriental del área de estudio, posteriores a la formación de la discontinuidad de la cima del PWx. El primer evento ocurrió en el Eoceno Temprano y el segundo en el Eoceno Medio, y en ambos casos los espesores de los bloques activos durante el fallamiento no muestran expansión importante, con excepción del bloque más oriental, que presenta expansión moderada dentro de la unidad Eoceno Wilcox (Ewx) hacia la parte sur del cubo sísmico.

4.- Durante el Eoceno Tardío, ocurrió el último evento de deformación importante que afectó al área de estudio, en la forma de una intensificación del basculamiento dirigido hacia Oriente, provocando un aumento en el ángulo de buzamiento general que desencadena la reactivación generalizada de las fallas lítricas normales del Paleoceno. El levantamiento provocó un nuevo episodio de regresión marina y aceleró el intemperismo y la erosión de los materiales sedimentarios del Eoceno Medio y Superior, que actualmente afloran en la zona.

5.- El área de estudio fue dividida en tres zonas con características de geometría de trampa propias; la zona occidental está afectada por basculamiento, y el tipo de trampas que alberga la unidad Paleoceno Wilcox es de tipo estratigráfico, mientras que las zonas central y oriental presentan trampas de tipo combinado en forma de bloques rotados con expansión, limitados por fallas.

V BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Allen, P. A. y J. R. Allen**, 1990, Basin Analysis: Principles and Applications: Oxford, U. K., Blackwell Scientific Publications, 451 pp.
- Araujo Mendieta, J. y R. Arenas**, 1986, Estudio tectónico-sedimentario en el Mar Mexicano, estados de Chihuahua y Durango: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, v. 47, 43-88
- Bally, A. W., P. L. Gordy, y G. A. Stewart**, 1966, Structure, seismic data and orogenic evolution of Southern Canadian Rocky Mountains: Bulletin of Canadian Petroleum Geology, v. 14, 337-381.
- Bally, A. W.**, 1983, Seismic Expressions of Structural Styles: A Picture and Work Atlas, Tulsa, Oklahoma, E. U. A., AAPG Special Publication, v. 2.
- Bally, A. W., D. Bernoulli, G. A. Davis y L. Montadert**, 1989, Listric normal faults, *in* Foster, N. H. y Beaumont, E. A. (eds.), Structural Concepts and Techniques III: Detached Deformation, Treatise of Petroleum Geology, Reprint Series No. 11: Tulsa, Oklahoma, E. U. A., AAPG, 650 pp.
- Biddle, K. T. y C. C. Wielchowsky**, 1994, Hydrocarbon Traps, *in* L. B. Magoon y W. G. Dow (eds.), The Petroleum system-from source to trap: Tulsa, Oklahoma, E. U. A., AAPG Memoir 60, 219-235.
- Brown, A. R.**, 1999, Interpretation of Three-Dimensional Seismic Data: Tulsa, Oklahoma, E. U. A., AAPG Memoir 42, SEG Investigations in Geophysics, No. 9, Fifth Edition, 514 pp.
- Brown, L. F., R. G. Loucks, R. H. Treviño y U. Hammes**, 2004, Understanding growth-faulted intraslope sub-basins by applying sequence-stratigraphic principles: Examples from the South Texas Oligocene Frio Formation: AAPG Bulletin, v. 88, No. 11, 1501-1522.
- Cloos, E.**, 1968, Experimental Analysis of Gulf Coast Fracture Patterns: AAPG Bulletin, v. 52, No. 3, 420-444.
- Crans, W., G. Mandl y J. Haremboure**, 1980, On the theory of growth faulting: a geomechanical delta model based on gravity sliding: Journal of Petroleum Geology, v. 2, No. 3, 265-307.
- Dahlstrom, C. D.**, 1969, Balanced Cross Sections: Canadian Journal of Earth Sciences, v. 6, No. 4.
- Davis, G. H. y S. J. Reynolds**, 1996, Structural Geology of Rocks and Regions: New York, E. U. A., John Wiley and Sons Inc.

Davison, I., 1986, Listric normal fault profiles: calculation using bed-length balance and fault displacement: *Journal of Structural Geology*, v. 8, No. 2, 209-210.

de Cserna, Z., 1979, Cuadro tectónico de la sedimentación y magmatismo en algunas regiones de México durante el Mesozoico: Programas y resúmenes del V Simposio sobre la Evolución Tectónica de México, *Revista del Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 11-14.

Destro, N., P. Szatmari, F. Alkmim, L. Magnavita, 2003, Release faults, associated structures, and their control on petroleum trends in the Reconcavo rift, northeast Brazil: *AAPG Bulletin*, v. 87, No. 7, 1123-1144.

Dula, W. F., 1991, Geometric Models of Listric Normal Faults and Rollover Folds, *AAPG Bulletin*, v. 75, No. 10, 1609-1625.

Echánove E., O., 1976, Geología del Paleoceno-Eoceno, Cuenca de Burgos, *in Memoria del III Simposium de Geología del Subsuelo, Zona Noreste, Reynosa, Tamaulipas, Petróleos Mexicanos*, 254-271.

Echánove E., O., 1986, Geología petrolera de la Cuenca de Burgos. Parte I. Consideraciones geológico-petroleras: *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, XXXVIII (1), 3-19.

Edwards, M. B., 1976, Growth Faults in Upper Triassic Deltaic Sediments, Svalbard: *AAPG Bulletin*, v. 60, No. 3, 341-355.

Elliott, D., 1983, The construction of balanced cross-sections: *Journal of Structural Geology*, v. 5, 101-105.

Ewing, T. E., 1991, The Gulf of Mexico structural framework, in Bally, A. W., Palmer, A. R. (eds.), *The Geology of North America-an overview: Boulder, Colorado, E. U. A., Geological Society of America, The Geology of North America*, v. I, 31-52.

Feng, J. y R. T. Buffler, 1996, Post Mid-Cretaceous Depositional History, Gulf of Mexico Basin, *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, v. 46, 9-25.

Galloway, W. E., D. Bebout, W. Fisher, J. Dunlap, R. Cabrera-Castro, J. Lugo-Rivera, T. Scott, 1991, The Cenozoic, *in Salvador, A., ed., The Gulf of Mexico Basin: Boulder, Colorado, Geological Society of America, The Geology of North America*, v. J., 245-324.

Galloway, W. E., 1989, Genetic Stratigraphic Sequences in Basin Analysis I: Architecture and Genesis of Flooding-Surface Bounded Depositional Units: AAPG Bulletin, v. 73, No. 2, 125-142.

Galloway, W. E., P. Ganey-Curry, X. Li y R. T. Buffler, 2000, Cenozoic depositional history of the Gulf of Mexico basin: AAPG Bulletin, v. 84, No. 11, 1743-1774.

Giles, K. A. y T. F. Lawton, 2002, Halokinetic sequence stratigraphy adjacent to the El Papalote diapir, northeastern Mexico: AAPG Bulletin, v. 86, No. 5, 823-840.

Goldhammer, R. K., 1999, Mesozoic sequence stratigraphy and paleogeographic evolution of northeast Mexico, *in* Bartolini, C., Wilson, J., y Lawton, T. (eds.), Mesozoic Sedimentary and Tectonic History of North-Central Mexico: Boulder, Colorado, E. U. A., Geological Society of America Special Paper 340.

Hamblin, W. K., 1965, Origin of "reverse drag" on the down thrown side of normal faults: Bulletin of the Geologic Society of America, v. 16, 1154-1164.

Hatcher, R. D., 1995, Structural Geology, Principles, Concepts and Problems: Upper Saddle River, N. J., E. U. A., Prentice Hall.

Hentz, T. F., M. De Angelo, M. H. Holtz, S. Saturai y 18 más, 2004, Definición del marco geológico y de los plays de exploración del Mioceno de la Cuenca de Burgos, Norte de México: Austin, Texas, E. U. A., The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology. Reporte interno BEG-PEMEX.

Jackson, M. P. A. y C. J. Talbot, 1991, A Glossary of Salt Tectonics: The University of Texas, Bureau of Economic Geology, Geological Circular 91-4, 44 pp.

López Ramos, E., 1982, Geología de México, Tomo II, México, D. F.

Lowell, J. D., 1990, Structural styles in petroleum exploration: Tulsa, Oklahoma, E. U. A., Oil and Gas Consultants International Inc., 460 pp.

Marshak, S. y N. Woodward, 1988, Introduction to Cross-Section Balancing, *in* Marshak, S. y Mitra, G. (eds.), Basic Methods of Structural Geology: Englewood Cliffs, N. J., E. U. A., Prentice Hall.

Ortiz-Ubilla, A. y G. Tolson, 2004, Interpretación estructural de una sección sísmica en la región Arcabuz-Culebra de la Cuenca de Burgos, NE de México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 21, No. 2, 226-235.

Padilla y Sánchez, J. R., 1996, *Elementos de Geología Estructural*, México, D. F.

Padilla y Sánchez, J. R., 1986, Post Paleozoic tectonics of northeast Mexico and its role in the evolution of the Gulf of Mexico: *Geofísica Internacional*, v. 25 No.1, 157-206

Peel, F. J., C. J. Travis y J. R. Hossack, 1995, Genetic Structural Provinces and Salt Tectonics of the Cenozoic Offshore U. S. Gulf of Mexico: A Preliminary Analysis, *in* M. P. A. Jackson, D. G. Roberts y S. Snelson (eds.), *Salt Tectonics: a global perspective*: AAPG Memoir 65, 153-175.

Pérez Cruz, G. A., 1992, *Geologic Evolution of the Burgos Basin, Northeastern México*: Houston, Texas, Rice University, tesis doctoral, 155 pp

Pindell, J., L. Kennan, J. Rosenfeld, J. Granath et al., 2004, Análisis Paleogeográfico Mesozoico-Cenozoico y Dinámica de Cuencas en el Golfo de México Profundo y Márgenes: La Relación entre Evolución Tectono-sedimentaria y Sistemas Petroleros: Tectonic Analysis Inc., reporte interno TAI-PEMEX.

Rowan, M. G., M. P. A. Jackson y B. Trudgill, 1999, Salt-Related Fault Families and Fault Welds in the Northern Gulf of Mexico: *AAPG Bulletin*, v. 83, No. 9, 1454-1484.

Rowan, M. G., F. Peel y B. Vendeville, 2004, Gravity-driven fold belts on passive margins, *in* K. R. McClay (ed.), *Thrust tectonics and hydrocarbon systems*: AAPG Memoir 82, 157-182.

Salvador, A., 1987, Late Triassic-Jurassic Paleogeography and Origin of Gulf of Mexico Basin: *AAPG Bulletin*, v. 71, No. 4, 419-451.

Schlische, R. W., 1995, Geometry and Origin of Fault-Related Folds in Extensional Settings: *AAPG Bulletin*, v. 79, No. 11, 1661-1678.

Schultz-Ela, D. A., 1992, Restoration of cross-sections to constrain deformation processes of extensional terranes: *Marine and Petroleum Geology*, v. 9, 372-388.

Shelton, J. W., 1984, Listric Normal Faults: An Illustrated Summary: AAPG Bulletin, v. 68, No. 7, 801-815.

Suppe, J., 1983, Geometry and Kinematics of Fault-Bend Folding: American Journal of Science, v. 283, 684-721.

Téllez, M., A. Islas, J. de León, A. Castañón et al., 2003, El potencial gasífero de los plays Eoceno Wilcox y Queen City en la Cuenca de Burgos: El Fronterizo, Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros sede Reynosa, Vol. 3 No. 2, 16-31.

Uribe Cifuentes, R. M., V. Mercado, J. Méndez, A. Guerra, 2003, Modelado geológico e inversión elástica en el play Midway, Cuenca de Burgos: El Fronterizo, Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros sede Reynosa, Vol. 3 No. 3, 17-22.

Vail, P. R., R. M. Mitchum, J. M. Widmier, J. B. Sangree, 1977, Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, *in* C. E. Payton (ed.), Seismic Stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration: AAPG Memoir 26, 516 pp.

Vargas Hernández, E., H. G. López, J. Contreras, 2003, Plays terciarios en el área Chukua, Región Marina Suroeste: Reporte interno PEP, RMSO.

Whitbread, A., T. Nicholson y W. Owens, 2001, Structural evolution of a detached delta system-the Vicksburg of south Texas: The Leading Edge, v. 20, No. 10, 1106-1117.

White, N. J., J. A. Jackson y D. McKenzie, 1986, The relationship between the geometry of normal faults and that of the sedimentary layers in their hanging walls: Journal of Structural Geology, v. 8, No. 8, 897-909.

Williams, G. y I. Vann, 1987, The geometry of listric normal faults and deformation in their hanging walls: Journal of Structural Geology, v. 9, No. 7, 789-795.

Woodward, N., S. Boyer y J. Suppe, 1989, Balanced Geological Cross-Sections: an Essential Technique in Geological Research and Exploration: Washington, D. C., E. U. A., American Geophysical Union, Short Course in Geology, v. 6, 132 pp.

Ziga, R., G., H. R. Gallardo, M. Téllez y M. G. Bernabé, 1999, Sistemas Petroleros de la Cuenca de Burgos, México: Tercera Conferencia Internacional Conjunta AMGP/AAPG, Revitalización de Provincias Petroleras Maduras, Veracruz, México.

Zwanziger, J. A., 1979, Provincias Mesozoicas Productoras en el Noreste de México: Ingeniería Petrolera, v. 19, 35-40.