



Universidad Nacional Autónoma de México

Posgrado en Ciencias de la Tierra



Análisis de la curvatura y la geometría de la estructura de Cantarell, e interpretación tectónica de los cinturones de pliegues y cabalgaduras del Mioceno Medio del sur del Golfo de México y Sierra de Chiapas: implicaciones en la exploración de hidrocarburos.

T e s i s

para obtener el grado de
Doctor en Ciencias
(Geología Estructural y Tectónica)

presenta

Jaime de Jesús Mandujano Velázquez

Tutor: Dr. Duncan Keppie Moorhouse

2007



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

A todo el apoyo brindado por parte de las personas que hicieron posible la culminación de esta tesis.

A mi director de tesis John Duncan Keppie Moorhouse, por las infinitas diversas propuestas de los temas de cada capítulo de la tesis, así como por su invaluable paciencia durante el desarrollo y corrección de las mismas.

A las personas que formaron parte de los comités de evaluación de los exámenes interanuales, y fueron parte activa durante todo el desarrollo de la tesis y la publicación de los artículos: Joaquín Eduardo Aguayo Camargo, Elena Centeno García, Rubén V. Kachaturov, Gustavo Tolson Jones y Esteban Cedillo Pardo, un infinito agradecimiento por su tiempo y adecuado asesoramiento.

A los investigadores que conformaron el jurado para el examen de grado: Dante J. Morán Zenteno, Ángel Francisco Nieto Samaniego, Gustavo Tolson Jones, Luigi Solari Lovati, Javier Francisco Pacheco Alvarado, Gabriel Chavez Cabello y John Duncan Keppie Moorhouse

Agradezco de una forma muy especial la continua asesoría de estructural hacia el final de la tesis por parte de Mario Ernesto Vázquez Meneses.

Les estoy infinitamente agradecido a Adán Oviedo Pérez, José Antonio Escalera Alcocer, Alberto Aquino López, Jesús García Hernández, Miguel Varela Santamaría, José Robles Nolasco, Arturo Soto Cuervo, Juan Manuel Ham Wong, Ubaldo Medina Flores, todos ellos de PEMEX, tanto por facilitar y autorizar la información para la realización de este trabajo, así como por las adecuadas sugerencias en partes específicas de la tesis.

Un agradecimiento final a Alma América Porres Luna, Baldomero Carrasco Velásquez, Mario Guzmán Vega, Felipe Ortuño Arzate, Luis Mario Palacios Reyes, todos del Instituto Mexicano del Petróleo, por darme las facilidades para realizar los estudios de doctorado, así como por permitirme usar la información y compartir conmigo su conocimiento y experiencia.

INDICE

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

RESULTADOS

DISCUSION

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO I. Curvature analysis applied to the Cantarell structure, southern Gulf of Mexico: implications for hydrocarbon exploration

Abstract

Introduction

The mathematical algorithm

Application of the mathematical algorithm to the Cantarell structure

Conclusions

Acknowledgments

References

CAPÍTULO II. Cylindrical and conical fold geometries in the *Cantarell* structure, southern Gulf of Mexico: implications for hydrocarbon exploration

Abstract

Introduction and geological setting

Theoretical relationship between conical folds and curvature

Structure

The curvature of the conical terminations at Cantarell

Conclusions

Acknowledgements

References

CAPÍTULO III. Middle Miocene Chiapas fold and thrust belt of Mexico: a result of collision of the Tehuantepec Transform/Ridge with the Middle America Trench.

Abstract

Introduction

Geological setting

Interpretation of reflection seismic data

Sierra de Chiapas

Sonda de Campeche

Evidence for subduction erosion

Tectonic interpretation

Acknowledgements

References

Figure captions

CONCLUSIONES GENERALES

RESUMEN

En esta tesis se derivó un algoritmo matemático para calcular la curvatura máxima de cada punto de una superficie en cuatro direcciones ubicadas a 45° , el cual fue aplicado al contorno estructural de la cima de la brecha del Cretácico-Paleógeno (K-P) en la estructura de Cantarell, mostrando que los valores más altos de curvatura ocurren adyacentes a las fallas y la charnela del pliegue, los cuales coinciden a su vez con los campos de hidrocarburos mayores. Posteriormente, análisis geométricos de los contornos estructurales de la brecha (K-P) y los carbonatos del Kimmeridgiano, definen a la estructura de Cantarell como un pliegue cilíndrico que presenta 3 conos con ejes sub verticales, dos ubicados en sus terminaciones NW y SE, y el tercero en su parte central, todos ellos clasificados de tipo en falda. Asimismo se derivaron las relaciones trigonométricas que permitieron observar que la curvatura se incrementa exponencialmente hacia el vértice de cualquier superficie cónica, las cuales se aplicaron tanto a la brecha (K-P) así como a los carbonatos del Kimmeridgiano de la estructura de Cantarell, definiendo que las áreas donde los ápices de los conos NW y central intersectan a la parte cilíndrica del pliegue, presentan el mayor fracturamiento, porosidad y permeabilidad de la estructura, y que mientras el cono NW se abre a profundidad creando un incremento de volumen, los otros dos conos se cierran a profundidad.

Posteriormente se realizó el estudio de la evolución Tectónica de Tehuantepec para el Mioceno Medio. Se definió un evento compresivo en la Sonda de Campeche y la Sierra de Chiapas que representa un estilo tectónico de thin skin para el Mioceno Medio, con un décollement en la unidad de sal del Caloviano, así como un evento extensional del Mioceno Superior-Plioceno con un décollement del Oligoceno para la Sonda de Campeche. El acortamiento total a través del cinturón plegado de Chiapas-Campeche fue de 106 km. Asimismo el proceso de subducción-erosión en la margen de Guatemala se restringió al intervalo 18-11 Ma, y probablemente también afectó la margen de Chiapas. Factores como la reducción del ángulo de subducción ligado a una ausencia o gap de magmatismo de 10 a 13 Ma en Chiapas, la erosión por subducción originada probablemente por la morfología Ridge/Transforma de Tehuantepec a la margen de Tehuantepec, y el traslado hacia el NE de la trinchera Mesoamericana, debieron haber colaborado para la generación de la Sierra de Chiapas y la Sonda de Campeche durante el Mioceno Medio. Actualmente los cinturones plegados de Chiapas-Tabasco y la Sonda de Campeche constituyen las trampas estructurales más importantes en el almacenamiento de hidrocarburos en México.

ABSTRACT

This thesis proposes a mathematical algorithm to calculate the greatest local curvature of a contoured surface in any of four directions at 45° to one another. Applying this algorithm to the structure contour map at the top of the Cretaceous-Paleogene (K-P) breccia in the Cantarell structure shows that the highest

curvatures occur adjacent to faults and the hinge of the fold, and these values coincide with the largest hydrocarbon fields.

Geometric analyses of the breccia and Kimmeridgian contours of the Cantarell field shows that it is a cylindrical fold with conical terminations NW and SE and a conical portion in its middle part, with subvertical cone axes and apron-like terminations. Also trigonometrical relations were derived for conical folds that show the curvature increases exponentially towards the apex of any cone. This mathematical relationship was applied to the Breccia (K-P) and Carbonate (Kimmeridgian) of the Cantrell structure, defining that the areas where the NW and central cone apex intersect the cylindrical part of the fold, this present the biggest fracturing, porosity and permeability of the structure, and that while in the NW cone of the fold is opens with depth indicating an increase in the volume, in the central and NW cones are closing with depth.

Afterwards was obtained the Middle Miocene tectonic evolution of the Tehuantepec. The compressive event of the Sierra de Chiapas and the Sonda de Campeche represents a thin skinned tectonic style, with décollement in the Callovian salt horizon, and an Upper Miocene-Pliocene extensional event, with an Oligocene décollement in the Sonda de Campeche. The total shortening across the Chiapas-Campeche foldbelt was over 106 km. The subduction erosion process was verified along Guatemala margin for the Middle Miocene (18-11 Ma), and probably also affected the Chiapas margin. Development of the Chiapas fold-and-thrust belt for the Middle Miocene is contemporaneous with a magmatic gap between 10-13 Ma in Chiapas, the subduction erosion of the Chiapas margin, and appears to be related to the collision of the Tehuantepec Ridge/transform with the Middle America Trench and its morphology, and the NE translation of the Middle America Trench. Currently, the Chiapas-Tabasco and the Sonda de Campeche folds and thrust belts constitute the most important traps in the hydrocarbons storage in Mexico.

INTRODUCCION

Actualmente la Sonda de Campeche, la cual esta definida como la parte de la plataforma somera del elemento tectónico denominado bloque de Akal (Ángeles *et al.*, 1994, Fig. 1), tiene una gran importancia económica debido a que aloja campos y estructuras que proporcionan aproximadamente la producción del 70 % del aceite y 30 % del gas de México (Ángeles *et al.*, 1994). En años recientes la producción de hidrocarburos en reservorios fracturados ha llegado a ser muy importante en México, debido a que el campo productor más grande denominado Cantarell, localizado en el sur del Golfo de México, es una estructura plegada, fracturada y fallada, la cual ha producido aproximadamente 7.86 bbl de 20-24° API de aceite en los últimos 22 años (Aquino *et al.*, 2003). Por lo anterior la identificación de los factores que controlan la ubicación de este tipo de trampas de hidrocarburos es de gran importancia económica.

El cinturón de pliegues y cabalgaduras de la Sonda de Campeche aloja hidrocarburos que aparentemente tienen relación con los cinturones de Chiapas-Tabasco y la Sierra de Chiapas.

curvatures occur adjacent to faults and the hinge of the fold, and these values coincide with the largest hydrocarbon fields.

Geometric analyses of the breccia and Kimmeridgian contours of the Cantarell field shows that it is a cylindrical fold with conical terminations NW and SE and a conical portion in its middle part, with subvertical cone axes and apron-like terminations. Also trigonometrical relations were derived for conical folds that show the curvature increases exponentially towards the apex of any cone. This mathematical relationship was applied to the Breccia (K-P) and Carbonate (Kimmeridgian) of the Cantrell structure, defining that the areas where the NW and central cone apex intersect the cylindrical part of the fold, this present the biggest fracturing, porosity and permeability of the structure, and that while in the NW cone of the fold is opens with depth indicating an increase in the volume, in the central and NW cones are closing with depth.

Afterwards was obtained the Middle Miocene tectonic evolution of the Tehuantepec. The compressive event of the Sierra de Chiapas and the Sonda de Campeche represents a thin skinned tectonic style, with décollement in the Callovian salt horizon, and an Upper Miocene-Pliocene extensional event, with an Oligocene décollement in the Sonda de Campeche. The total shortening across the Chiapas-Campeche foldbelt was over 106 km. The subduction erosion process was verified along Guatemala margin for the Middle Miocene (18-11 Ma), and probably also affected the Chiapas margin. Development of the Chiapas fold-and-thrust belt for the Middle Miocene is contemporaneous with a magmatic gap between 10-13 Ma in Chiapas, the subduction erosion of the Chiapas margin, and appears to be related to the collision of the Tehuantepec Ridge/transform with the Middle America Trench and its morphology, and the NE translation of the Middle America Trench. Currently, the Chiapas-Tabasco and the Sonda de Campeche folds and thrust belts constitute the most important traps in the hydrocarbons storage in Mexico.

INTRODUCCION

Actualmente la Sonda de Campeche, la cual esta definida como la parte de la plataforma somera del elemento tectónico denominado bloque de Akal (Ángeles *et al.*, 1994, Fig. 1), tiene una gran importancia económica debido a que aloja campos y estructuras que proporcionan aproximadamente la producción del 70 % del aceite y 30 % del gas de México (Ángeles *et al.*, 1994). En años recientes la producción de hidrocarburos en reservorios fracturados ha llegado a ser muy importante en México, debido a que el campo productor más grande denominado Cantarell, localizado en el sur del Golfo de México, es una estructura plegada, fracturada y fallada, la cual ha producido aproximadamente 7.86 bbl de 20-24° API de aceite en los últimos 22 años (Aquino *et al.*, 2003). Por lo anterior la identificación de los factores que controlan la ubicación de este tipo de trampas de hidrocarburos es de gran importancia económica.

El cinturón de pliegues y cabalgaduras de la Sonda de Campeche aloja hidrocarburos que aparentemente tienen relación con los cinturones de Chiapas-Tabasco y la Sierra de Chiapas.

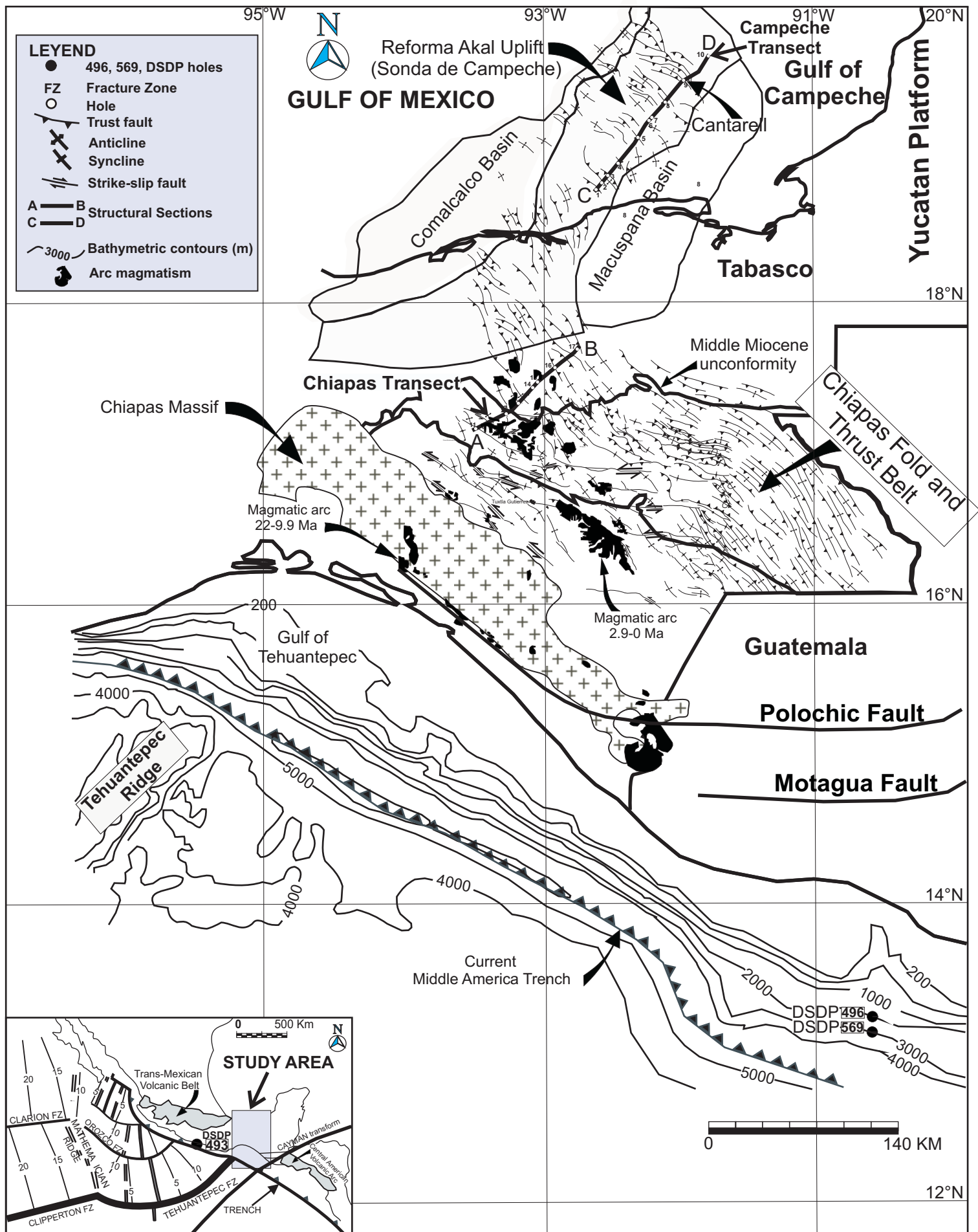


Figure 1. Map of eastern of Mexico showing the locations of the Chiapas foldbelt, the reflection seismic sections, the Tehuantepec Transform/Ridge, the Chiapas massif and other tectonic and geographical elements.

La estructura de Cantarell es un anticlinal con orientación principal NE-SW, intrusionado por sal en su flanco SE, cortado por fallas con echados subverticales. Esta estructura está limitada en su parte oeste por una falla casi vertical N-S, y hacia el límite NE por una serie de cabalgamientos con vergencia hacia el NE. El límite sur-oriental Nohoch-Akal es una cabalgadura con vergencia hacia el oeste (Mitra *et al.*, 2005). La interpretación de perfiles de reflexión sísmica a través de la estructura de Cantarell sugiere que las fallas inversas hacia el NE: (i) se profundizan hacia el SW en fallas verticales, de manera que la estructura es una flor positiva relacionada a movimiento lateral derecho a través del tren de fallamiento principal N-S (Rojas *et al.*, 1998; Pacheco, 2002); o (ii) se conectan hacia el SW por medio de una rampa a un cabalgamiento (el cabalgamiento de Sihil) localizado en el plano evaporítico del Oxfordiano-Caloviano, de manera que la estructura de Cantarell es un “flat-topped fault-bend fold” el cual es parte de la geometría de pliegues y cabalgaduras (Mitra *et al.*, 2005). Una variante del último modelo sugiere que la margen NE de la estructura de Cantarell está sujeta a una inestabilidad gravitacional que ha generado depósitos por deslizamientos, flujos de escombros y abanicos deltaicos (García *et al.*, 2005). En lo que se refiere a la edad de la estructura de Cantarell, esta fue considerada inicialmente de edad Cretácico Superior-Oligoceno (Namson *et al.*, 1995), posteriormente secciones sísmicas de reflexión mostraron que la estructura está discordantemente sobreyacida por depósitos del Mioceno tardío (Pacheco, 2002; Mitra *et al.*, 2005), lo cual coincide con un hiatus en estratigrafía. Éste fue sincrónico con el desarrollo del cinturón de pliegues y cabalgaduras de la Sierra de Chiapas, lo cual sugiere que existe una conexión genética entre ambos (Keppie & Moran, 2005). Una fase extensional posterior fue observada por la presencia de fallas normales que cortan rocas desde el Mioceno Superior al Cuaternario en la Sonda de Campeche (Meneses, 1980; Ángeles *et al.*, 1994).

Los factores que controlan la ubicación de los campos de los hidrocarburos pueden ser: la porosidad, la permeabilidad, el plegamiento, el fallamiento y el fracturamiento. La porosidad y la permeabilidad de los sedimentos que alojan a los hidrocarburos han sido estudiados por Porres & Castrejón (1991), y Porres *et al.*, (1996), e indican que las brechas del Cretácico Superior-Paleógeno tienen las mejores condiciones de porosidad de hasta un 25%. Actualmente este horizonte es el principal almacén de los hidrocarburos y está sobreyacido por los horizontes arcillosos del Paleógeno. Esta brecha ha sido interpretada como el resultado del impacto del meteorito Chicxulub en el norte de la Península de Yucatán (Grajales *et al.*, 2000). Otros estudios como el de Harris *et al.*, 1960 y Narr, 1991, han indicado una correlación entre la densidad del fracturamiento respecto a su ubicación en la estructura que lo aloja. Asimismo, Harris *et al.*, (1960) atribuyó la densidad del fracturamiento a las diferencias en la curvatura de la estructura, como por ejemplo los rangos en el cambio de orientación de la estratificación alrededor de las charnelas de los pliegues. Otros trabajos corresponden a Woodring *et al.* (1940) y Narr (1991) quienes relacionan la variación de la inclinación de la charnela del pliegue con el grado de fracturamiento observado en estructuras naturales. En 1994, Lisle expresa la curvatura cuantitativamente usando un análisis Gaussiano a través de dos direcciones perpendiculares (basado en Calladine, 1986), y produjo un modelo en el cual la densidad de

fracturamiento fue inferida basándose en la curvatura en puntos específicos de la superficie plegada. Saldivar y Castrejón (2001) emplearon una simplificación de la técnica del análisis de la curvatura e integraron registros geofísicos para producir una correlación entre fracturas sub-sísmicas y el comportamiento dinámico de los campos de hidrocarburos.

En esta tesis se presenta el estudio de la curvatura, su relación con las terminaciones cónicas, y su influencia con el almacenamiento de los hidrocarburos en la estructura de Cantarell; así también se propone un modelo de evolución tectónica en el cual el Ridge de Tehuantepec colisionó con la Trinchera Meso-Americana en el Mioceno Medio, y se observaron las implicaciones que tuvo este en la génesis de los sistema de pliegues y cabalgaduras de la Sierra de Chiapas, la Sonda de Campeche, y en las trampas estructurales de hidrocarburos en el sur de México. Este trabajo está conformado por tres capítulos en formato de artículos, los cuales muestran la evolución de la investigación doctoral: **Capítulo I: Curvature analysis applied to the Cantarell structure, southern Gulf of Mexico: implications for hydrocarbon exploration** (Mandujano *et al.*, 2005), **Capítulo II: Cylindrical and conical fold geometries in the Cantarell structure, southern Gulf of Mexico: implications for hydrocarbon exploration** (Mandujano & Keppie, 2006), y el **Capítulo III: Middle Miocene Chiapas fold and thrust belt of Mexico: a result of collision of the Tehuantepec Transform/Ridge with the Middle America Trench** (Mandujano & Keppie, artículo aceptado por la revista "Journal of the Geological Society, London", 16-Mayo-2007).

RESULTADOS

En el **capítulo I** se realizó el estudio de la curvatura de la estructura de Cantarell con el objeto de ver la relación que tenía esta con la distribución de los reservorios principales en la misma. En primera instancia se generó una fórmula matemática que calculara el valor de la curvatura de una curva formada por tres puntos, un punto pivote central y los otros dos en 4 direcciones principales diferentes a 45° entre ellas. Posteriormente se realizó un algoritmo que eligiera la máxima curvatura de las 4 calculadas en cada punto y la graficara. Estos productos del cálculo y graficado de la curvatura de una superficie se aplicaron a la estructura de Cantarell, obteniendo la gráfica de la curvatura mayor de cada punto o nodo de la malla con lo cual se generó un mapa en color para los diferentes valores de curvatura, los cuales coincidieron con: el sistema de fracturamiento Noroeste en el flanco Noreste de la estructura de Cantarell, el sistema de fracturamiento Norte-Sur en la porción media sur de la estructura, y el sistema NW-SE en el límite de los bloques de Akal y Nohoch. En estos tres sistemas se encuentran las fallas principales, y asociadas a estas los pozos con mayor producción de hidrocarburos. Otros grupos de valores altos de curvatura coincidieron con la zona de la charnela de las estructuras de Nohoch y Cantarell, así como con la culminación del pliegue. Todo lo anterior nos permitió proponer que los reservorios principales están controlados por el fracturamiento asociado a

tres aspectos: 1) la alta curvatura, 2) el fallamiento, y 3) las terminaciones dómicas de la estructura.

El **Capítulo 2** se enfocó al estudio de la geometría de la estructura de Cantarell independientemente de su génesis. En este capítulo 2 o segundo artículo se muestra que la parte central de la estructura de Cantarell puede ser descrita como un pliegue cilíndrico sub-horizontal con secciones cónicas en sus terminaciones NW y SE, y una tercera geometría cónica en su parte media, con respectivos ejes cónicos sub-verticales, observando que donde se intersectan las partes cónicas con la parte cilíndrica del pliegue se presentan los mayores valores de curvatura con el más alto potencial para el almacenamiento de hidrocarburos.

Este trabajo inicia con el desarrollo teórico de la relación entre la curvatura y una superficie cónica, establecimiento las relaciones matemáticas que permitieron calcular la variación de la curvatura en un cono en función de la distancia al ápice del mismo. Partiendo del caso más simple en el cual la sección del cono se asemeja a un círculo, entonces la máxima curvatura ocurrirá en el plano perpendicular al eje del cono. De esa forma se obtuvieron dos fórmulas para calcular esta variación de la curvatura a través de un cono, la primera fórmula puede ser aplicada directamente cuando es posible medir la distancia a través del eje del pliegue, mientras que la segunda se aplica en casos donde la distancia a través de la traza del pliegue es medida sobre una superficie horizontal, definiendo matemáticamente que la curvatura se incrementa conforme disminuye el radio de la sección perpendicular al eje del cono o hacia el ápice del mismo. Usando estas ecuaciones la curvatura fue graficada contra la distancia del ápice del cono para diferentes ángulos apicales, produciendo una gama de curvas en las cuales se observa que la curvatura se incrementa gradualmente hacia el ápice del cono hasta que alcanza un punto en el cual esta se incrementa exponencialmente.

Posteriormente se analizó la evolución de la curvatura en las tres porciones cónicas de Cantarell, tanto para la Brecha del Cretácico Superior-Paleógeno (K-P), como para el Kimmeridgiano. Este análisis geométrico se inició con la graficación de los polos en un estereograma meridional o de Wulff de los datos obtenidos de los mapas de contornos estructurales realizados por PEMEX de ambos horizontes para cada una de las terminaciones cónicas. La distribución de los datos de cada una de estas tres terminaciones cónicas denominadas NW, central y SE, se observaron como círculos menores con ejes centrales sensiblemente verticales correspondiendo a los ejes de los conos, y echados más suaves que correspondieron con los ejes de los pliegues, mientras que la parte central cilíndrica del bloque de Akal se manifestó como círculos mayores para ambos horizontes.

Al aplicar la ecuación 1 a las partes cónicas de la estructura de Cantarell se observó que en el cono NW la curvatura en la brecha es mayor que la del Kimmeridgiano, mientras que en los conos SE y central la curvatura de la brecha es ligeramente menor que la del Kimmeridgiano. Asimismo se obtuvieron las distancias a las cuales en cada uno de los conos la curvatura se empieza a incrementar exponencialmente. Finalmente se hicieron las inferencias de espacio creado para el almacenamiento de los hidrocarburos en función de la diferencia de la curvatura entre los dos horizontes estudiados en cada una de las terminaciones cónicas.

El **Capítulo 3** tuvo por objetivo establecer un modelo que explicara la génesis de los cinturones plegados de la Sonda de Campeche y la Sierra de Chiapas.

Se inicia haciendo una reseña de los eventos estratigráficos y sedimentológicos de la Sierra de Chiapas y la Sonda de Campeche a partir de la fase intracontinental rift de extensión para el Triásico-Jurásico Medio, pasando a la transición rift-margen pasiva para el Jurásico Superior, continuando con el desarrollo de la margen pasiva y sus plataformas carbonatadas del Berriasiano-Cenomaniano, evolucionando a las plataformas inundadas del Turoniano-Campaniano, la carga flexural y la compresión del Mioceno (Maestrichtiano-Mioceno), hasta culminar con la extensión del Plioceno-Holoceno.

Posteriormente se procedió a interpretar dos transectos sísmicos elaborados por PEMEX, uno de la Sierra de Chiapas y el segundo de la Sonda de Campeche, ambos con orientación NE-SW aproximadamente paralelos a la dirección de máxima deformación del sistema de deformación compresiva principal, los cuales conjuntamente con la incorporación de algunas columnas estratigráficas y litológicas de los pozos, permitieron establecer: la distribución de litofacies y la estratigrafía del Jurásico Superior al Reciente, el sistema de fallamiento relacionados a la fase compresiva del Mioceno Medio en ambos cinturones, el sistema de fallamiento asociado a la fase distensiva del Plioceno-Reciente y la distribución de cuerpos de sal en la Sonda de Campeche, y finalizar con la generación del modelo geológico, el balanceo de las secciones para obtener el acortamiento de las mismas mediante su restitución.

Posteriormente se propuso un modelo de evolución de la subsidencia y erosión subducción del Mioceno Medio de la margen de Guatemala, con base en el cual se estableció el modelo de erosión subducción de la margen de Tehuantepec, y conjuntamente con otros aspectos como la disminución del ángulo de subducción, el arribo del Ridge de Tehuantepec a la trinchera Mesoamericana y su desplazamiento hacia el NE, la morfología misma del Ridge de Tehuantepec, así como un gap de magmatismo de 10-13 Ma en las inmediaciones del Macizo de Chiapas, todo esto nos permitió establecer el modelo de generación de los cinturones de pliegues y cabalgaduras de la Sierra de Chiapas y la Sonda de Campeche, y la formación de las trampas de los hidrocarburos en ambos cinturones.

DISCUSION

Las dos partes primeras partes de trabajo se enfocaron específicamente al estudio de las superficies actuales de la brecha (K-P) y de los carbonatos del Kimmeridgiano. La ecuación generada para calcular la máxima curvatura de un punto es aplicable a cualquier superficie, mientras que las ecuaciones obtenidas de las relaciones trigonométricas de las superficies cónicas solo pueden ser aplicadas a este tipo de superficies, por lo que el primer paso es verificar que se traten de superficies cónicas, establecer su tipo, ubicación y orientación de las mismas, para de esta forma poder obtener la distribución de la curvatura a lo largo del cono.

La ecuación de la curvatura nos permitió identificar en la estructura de Cantarell áreas de máxima curvatura, trazas de fallas normales y cabalgaduras, así como el

contacto de la brecha con la masa salina. Asimismo las ecuaciones obtenidas de las superficies cónicas, solo se enfocaron a las terminaciones cónicas de la estructura de Cantarell, observando que las zonas de máxima curvatura se localizaron donde los ápices de los conos NW y central se unieron con la parte cilíndrica de la estructura. De los resultados de ambos análisis se observó que hacia la porción del cono central de la estructura de Cantarell, es donde convergen la mayoría de los factores que debieron haber propiciado el desarrollo de los mejores reservorios de la estructura. Una aportación adicional que proporcionó el análisis de curvatura en las partes cónicas del pliegue, corresponde al comportamiento a profundidad que posee cada uno de los conos, ya que mientras unos conos se abren otros se cierran, lo que implica que se inhiban o generen espacios que puedan funcionar como reservorios de hidrocarburos.

Respecto al modelo de evolución del sureste de México, la mayoría de las reconstrucciones del Eoceno yuxtaponen el bloque de Chortis del norte de Centro América contra el sur de México, e infieren ~1100 km de desplazamiento lateral izquierdo Cenozoico sobre la zona de fallamiento Acapulco-Motagua-Caymán, la cual es el límite norte inferido de la placa del Caribe. Sin embargo esta hipótesis de la transcurrancia izquierda del bloque Chortis es incompatible con los siguientes aspectos:

- La presencia de Sedimentos del Cretácico Superior-Reciente sin deformar que cruzan la traza de la zona de la falla Motagua en el Golfo de Tehuantepec (Sanchez-Barreda, 1981), lo cual está corroborado con datos de gravedad (Couch and Woodcock, 1981). Asimismo, en los contornos de gravimetría y magnetimetría paralelos a la costa, no se observa ningún desplazamiento a lo largo de la traza proyectada de la zona de la falla Motagua (De la Fuente-Duch *et al.*, 1991;

- De acuerdo a diferentes autores, los desplazamientos laterales izquierdos de la zona de fallas de Motagua han sido reportadas con las siguientes magnitudes: 20-0 km (Muller, 1979; Johnson, 1984), desde pequeños hasta 20 km (McBirney, 1963; McBirney *et al.*, 1967; Laurence, 1975). En la falla Polochic los desplazamientos se reportan desde nulos (Bonis, 1967), pocos kilómetros en Guatemala y adyacente a México (Anderson *et al.*, 1985), hasta ~130 km (Burkart *et al.*, 1987). Asimismo en México, el batolito de Chiapas no presenta desplazamientos significativos, y los sedimentos de la planicie costera adyacentes al mismo están sin afectar.

- La migración del punto triple hacia el oriente en la parte trasera del bloque Chortis implicaría una elongación del arco magmático del sur de México en esa misma dirección, sin embargo arcos magmáticos del Cretácico Tardío han sido reportados en Chiapas al norte de la zona de la falla Motagua (Burkart *et al.*, 1987), así como en el Golfo de Tehuantepec (Sánchez-Barreda, 1981). Estos datos implican la existencia de una trinchera al sur del Golfo de Tehuantepec y oeste de Guatemala durante el Cretácico Tardío, lo cual es incompatible con la presencia del bloque de Chortis adyacente al sur de México.

- No existen contrapartes en el Bloque de Chortis de dos características que ocurren en el Complejo de Xolapa del sur de México: a) el engrosamiento hacia el sur de la secuencia sedimentaria Jurásico-Cretácico (Ortega-Gutiérrez y Elías-Herrera, 2003), y b) el incremento hacia el sur del metamorfismo de alta

temperatura-baja presión (Ortega-Gutiérrez y Elías-Herrera, 2003) del Cretácico Temprano (Herrmann *et al.*, 1994). En vez de todo esto se observan Rocas Cretácicas y Jurásicas sin metamorfizar (Horne *et al.*, 1990) en la parte norte central del Bloque de Chortis.

- Ninguno de los límites N-S de los terrenos tectónicos reconocidos del sur de México (Guerrero-Mixteco-Zapoteco-Juarez-Maya; Campa y Coney, 1983; Sedlock *et al.*, 1993; Keppie, 2004), que están truncados en la costa sur de México han sido registrados en el bloque Chortis (Donnelly *et al.*, 1990). Por otro lado, facies de granulitas del Precámbrico del Complejo Oaxaqueño del sur de México (Keppie *et al.*, 2003), han sido reportados en el Bloque Chortis como gneises de facies de anfibolita de ~1 Ga (Manton, 1996).

Después de observar estas evidencias, es difícil asumir dos aspectos: 1) que la traza de la zona de la falla Motagua haya estado dentro de la trinchera de Acapulco, y 2) que el bloque Chortis haya estado ubicado adyacente al sur de México en el Cenozoico temprano.

Una posible alternativa respecto al modelo de evolución del sureste de México consiste en asumir que el límite transformante entre las placas de Norteamérica y el Caribe, identificada en la fosa de Caymán se extienda hacia el oeste-suroeste bajo la cadena volcánica del pacífico de Guatemala, y que con la aplicación de un movimiento puro de la falla de transforma de Caymán de ~1100 km en contra de las manecillas del reloj, con un polo cerca de Santiago de Chile, durante el Cenozoico haya regresado a su posición original.

Observando las reconstrucciones de las características del Océano Pacífico, sugieren que la colisión del Mioceno Medio del Ridge/Transforma de Tehuantepec con la trinchera de Acapulco originó: a) una somerización asimétrica de la zona de subducción, y b) un gap del arco volcánico en el sureste de México, intervalo en el cual se desarrolló el sistema de pliegues y cabalgaduras de Chiapas y la Sonda de Campeche, mientras el ridge/transforma de Tehuantepec se hundía hacia el oeste, y el volcanismo de arco se restableció en el gap.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, T. H., Ertlac, R. J., & Sandstrom, M. A., 1985. Late-Cretaceous allochthons and post-Cretaceous strike-slip displacements along the Cuico-Chixoy-Polochic Fault, Guatemala: *Tectonics*, **4**, p. 353-374.
- Ángeles, A. F. J., Reyes, N. J., Quezada, M. J. M. & Meneses, R. J., 1994. Tectonic evolution structural styles and oil habitat in the Campeche Sound, México. *Transactions of the Gulf Coast Association of Geological Societies*, **XLI**, 53-62.
- Aquino, L. J. A., Ruiz, M. J., Flores, F. M. A., & García, H. J., 2003. The Sihil field: another giant below Cantarell, offshore Campeche, Mexico. *In: Halbouty, M. T., (Ed.), Giant oil and gas fields of the decade 1990-1999. American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, **78**, 141-150.
- Bevis, M., & Isacks, B. L., 1984. Hypocentral trend surface analysis: probing the geometry of Benioff zones. *Journal of Geophysical Research*, **89**, No. B7, July 10, 1984, 6153-6170.

- Bonis, S. B., 1967. Geologic reconnaissance of the Alta Verapaz fold belt, Guatemala: Unpublished Ph. D. thesis, Louisiana State University, Baton Rouge, 146 p.
- Burbach, G. B., Frohlich, C., Pennington, W. D., & Matumoto, T., 1984. Seismicity and Tectonics of the Subducted Cocos Plate. *Journal of Geophysical Research*, **89**, No. B9, September 10, 1984, 7719-7735.
- Burkart, B. Deaton, B. C., Dengo, C., & Moreno, G., 1987. Tectonic wedges and offset Laramide structures along the Polochic fault of Guatemala and Chiapas, Mexico: Reaffirmation of large Neogene displacements. *Tectonics*, v. **6**, p. 411-422.
- Bravo, H., 2004. Geometry and state of stress of the Wadati-Benioff zone in the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Journal of Geophysical Research*, **109**, B04307, doi: 10.1029/2003JB002854, 1-14.
- Calladine, C. R., 1986. Gaussian curvature and shell structures, *In*: Gregory, J. A., ed., *The mathematics of surfaces*: Oxford, Clarendon Press, 1986, 179-196 p. *The Institute of mathematics & applications conference series*. New series number **6**, 282 p.
- Campa, M. F., & Coney, P. J., 1983. Tectonostratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. **20**, p. 1040-1051
- Clift, P. D., & Vannucchi, P., 2004. Controls on tectonic accretion versus erosion in subduction zones: Implications for the origin and recycling of the continental crust: *Review of Geophysics*, **42**, Paper number 2003RG000127, 1-31.
- Couch, R., & Woodcock, S., 1981. Gravity and structure of the continental margins of southwestern Mexico and northwestern Guatemala. *Journal of Geophysical Research*, v. **86**, p. 1829-1840.
- Damon, P. E., & Montesinos, E., 1978. Late Cenozoic volcanism and metallogenesis over an active Benioff zone in Chiapas, Mexico. *Arizona Geological Society Digest*, **11**, 155-168.
- De la Fuente, D. M., Mena, J. M., & Aiken, C. L. V., 1991. Cartas gravimétricas de la República Mexicana: 1. Carta de Anomalía de Bouguer: Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, escala 1:3,000,000.
- De la Rosa, Z. J. L., Eboli, M. A. & Dávila, S. M., 1989. Geología del Estado de Chiapas: Subdirección de Construcción, Unidad de Estudios de Ingeniería Civil, Subjefatura de Estudios Geológicos, Departamento de Geología, 1989, Informe inédito, G-10.
- Donnelly, T. W., Horne, G. S., Finch, R. C., & López-Ramos, E. 1990. Northern Central America; the Maya and Chortis blocks, *In*: Dengo, G., and Case, J. E. (eds.), *The Caribbean region: The geology of North America*, *Geological Society of America*, v. **H**, p. 37-76.
- Engelbreton, A. C., Cox, A., & Gordon, R. G., 1985. Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific Basin. *Geology Society of America*, Special Paper, **206**, 1-59.
- Fay, N., Humphreys, E. D. & Coblenz, D. D. 2006. The Pacific-North America plate boundary in the western United States: dynamics of the Sierra Nevada block and implications for western U.S. tectonics. *Geological Society of America*. Abstracts with programs Specialty Meeting No. 2, p. 109. Paper No. 14-8.

- Ferrusquía, V., 1996. Contribución al conocimiento geológico de Chiapas, el área Ixtapa-Soyaló. *Universidad Nacional Autónoma de México, Boletín del Instituto de Geología*, **109**, 1-130 p.
- Galloway, W. E., Bebout, D. G., Fisher, W. L., Dunlap, Jr. J. B., Cabrera, C. R., Lugo, R. J. E., & Scott, T. M., 1991. Cenozoic, *In: Salvador, A., (ed) The Gulf of Mexico Basin. The Geology of North America*, **J**, 245-324.
- García, H. J., González, C. M., Zavaleta, R. J., Chernikoff, O. A., & Ploszkiewicz, V., 2005. Structural style of the Gulf of Mexico's Cantarell complex. *The Leading Edge*, February, p. 136-138.
- Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Smith, A. G., Bleeker, W., & Lourens, L. J., 2004. A New Geologic Time Scale, with special reference to Precambrian and Neogene. *Episodes*, **27**, No. 2, June 2004, 83-100.
- Grajales, N. J. M., Cedillo, P. E., Rosales D. M. C., Morán, Z. D., Alvarez, W., Claeys, P., Ruiz, M. J., García, H. J., Padilla, P., & Sánchez, R. A., 2000. Chicxulub impact: the origin of reservoir and seal facies in the southeastern Mexico oil fields. *Geology*, **28**, (4), 307-310.
- Grajales, N. J. M., 2001. Origen, diagénesis e importancia petrolera de la secuencia carbonatada del límite Cretácico-Terciario en el sureste de México. *Tesis de Doctorado (Geología)*. Unidad de Ciclos Profesionales y de Posgrado, Colegio de Ciencias y Humanidades, Programa del Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, 240 pages.
- Harris, J. F., Taylor, G. L., & Walper, J. W., 1960. Relation of deformational structures in sedimentary rocks and local structure. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, **44**, 1853-1873.
- Hernández, Q. J. E., 2002. Interpretación global de anomalías magnéticas corticales satelitales sobre la República Mexicana: Tesis de Maestría inédita, del instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, 135 p.
- Herrmann, U. R., Nelson, B. K. & Ratschbacher, L. 1994. The origin of a terrane: U/Pb zircon geochronology and tectonic evolution of the Xolapa complex (southern Mexico). *Tectonics*, v. **13**, no. 2, p. 455-474, april 1994.
- Horne, G. S., Flinch, R. C., & Donnelly, T. W., 1990. The Chortis Block, *In: Dengo, G., and Case, J. E. (eds.), The Caribbean region: The geology of North America*, Boulder, CO, Geological Society of America, v. **H**, p. 55-76.
- Husker, A. L., & Davis, P. M., 2006. Seismic tomography of the Cocos Plate. *Eos Transactions, American Geophysical Union*, **87**(52). Abstract T13F-06.
- Johnson, K. R. 1984. Geology of the Gualán and southern Sierra de las Minas quadrangles, Guatemala. Unpublished Ph. D. thesis, State University of New York at Bing-hampton, 300 p.
- Jiang, D., Lin, S., & Williams, P. F., 2001. Deformation path in high strain zones, with reference to slip partitioning in transpressional plate-boundary regimes. *Journal of Structural Geology*, **23**, 991-1005.
- Keppie, J. D., Dostal, J., Kameron, K. L., Solari, L. A., Ortega, G. F., & López, R., 2003. Geochronology and geochemistry of Grenvillian igneous suites in the northern Oaxaca Complex, southern Mexico: Tectonics implications. *Precambrian Research*, v. **120**, p. 365-389.
- Keppie, J. D., 2004. Terranes of Mexico revisited: A 1.3 billion year odyssey: *International Geology Review*, v. **46**, p. 765-794.

- Keppie, D. J. & Morán Z. D. J. 2005. Tectonic implications of alternative Cenozoic reconstructions for southern Mexico and the Chortis Block. *International Geology Review*, **47**, 473-491.
- Keppie, D. J., Morán, Z. D. J., Martiny, B., & González, T. E., 2007. Synchronous 29-19 Ma arc hiatus, exhumation, and subduction of forearc in southwestern Mexico, *In*: Pindell, J., & James, K., (eds). *Geological Society of London*, Special Publication (accepted, in press)
- Kim, Y., Greene, F., Espejo, L., Pérez, C. X., & Clayton, R. W., 2006. Receiver function analysis of the Middle American subduction zone. *Eos Transactions, American Geophysical Union*, **87**(52). Abstract TT53D-1637.
- Laurence, D. P., 1975. Petrology and structural geology of the Sanarate-El Progreso area, Guatemala. Unpublished Ph. D. thesis, State University of New York at Bing-hampton, 225 p.
- Lisle, R. J., 1994. Detection of zones of abnormal strains in structures using gaussian curvature analysis. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **78**, p. 1811-1819.
- Mammerickx, J., & Klitgord, K. D., 1982. Northern East Pacific Rise: Evolution from 25 m.y. to the present. *Journal of Geophysical Research*, **87**, No. B8, August 10, 1982, 6751-6759.
- Mandujano, V. J. J., & Keppie, J. D., 2002. Evolución litoestratigráfica de 8 pozos en el noreste de la Sonda de Campeche. Tercera Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra. *Abstracts volume of the XVI National Geological Convention 4-8 november 2002*, 337-338, Puerto Vallarta, Jalisco.
- Mandujano, V. J. J., Khachaturov, R. V., Tolson, J. G., & Keppie J. D., 2005. Curvature analysis applied to the Cantarell structure, southern Gulf of Mexico: implications for hydrocarbon exploration. *Computers & Geosciences*, **31**, (5), 641-647.
- Mandujano, V. J. J., & Keppie, D. J., 2006. Cylindrical and conical fold geometries in the *Cantarell* structure, Southern Gulf of Mexico: Implications for hydrocarbon exploration. *Journal of Petroleum Geology*, **29**, No. 3, 215-226.
- Manea, M., Manea, V. C., Ferrari, L., Costoglodov, V., & Bandy, W. L., 2005. Tectonic evolution of the Tehuantepec Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, **238**, 64-77.
- Manea, V. C., & Manea, M., 2006. Origin of the modern Chiapanecan Volcanic arc in southern México inferred from thermal models. *Geological Society of America, Special Paper*, **412**, 27-38.
- Manton, W. L., 1996. The Grenville in Honduras [abs.]: Geological Society of America Abstracts with Programs, v. **28**, no. 7, p. A493.
- Marshak, S., & Woodward, N., 1988. Introduction to cross-section balancing. *In*: Marshak, S., & Mitra, G. (eds) *Basic methods of structural geology*, 303-332.
- McBirney, A. r., 1963. Geology of a part of the central Guatemalan Cordillera: University of California publications in Geological Sciences, v. **38**, p. 177-242.
- McBirney, A. R., Aoki, K. I., & Bass, M., 1967. Eclogite and Jadeite from the Motagua fault zone, Guatemala. *American Mineralogist*, v. **52**, p. 908-918
- Medina, F. U., Ham W. J. M., Namson, J., & Alcántara, G. J. R., 1997. Proyecto Simojovel. Petróleos Mexicanos (PEMEX), Región Sur del Activo Regional de Exploración, Coordinación de Plays Establecidos, (unpublishing report)

- Meneses, G. J., 1980. Geología de la Sonda de Campeche. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, **32**, 1-26.
- Miranda C. E., Ruiz O. A., Castillo R. T., Mata J. M., Granados C. L., & Marín S. C., 1998. Análisis estructural-estratigráfico e importancia económica del extremo SW de la Cuenca de Macuspana (Proyecto Reforma). *Asociación Mexicana de Geofísicos de Exploración, A. C. Memorias de trabajos técnicos. VIII Simposium de Geofísica y Exhibición de Equipo*, Veracruz, Veracruz, México, October 7-9 of 1998.
- Mitra, S., Correa, F. G., Hernández, G. J., & Murillo, A. A., 2005. Three-dimensional structural model of the Cantarell and Sihil structures, Campeche Bay, Mexico. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. **89**, 1, 1-26.
- Mora, J. C., Macías, J. L., Godines, L., Espíndola, J. M., García, P. A. & Sánchez, G. S. 2004b. Miocene to Recent volcanism in southern Mexico. In: Aguirre, D. G. J., Macías, V. J. L., & Siebe, C., (eds) *Proceedings Geological Society of America Penrose Conference: Neógene-Quaternary continental margin volcanism: Mexico*, D. F. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología Publicación Especial **2**, 56.
- Muehlberger, W. R., 1992. Tectonic map of North America: Scale 1:5,000,000: Tulsa, OK. American Association of Petroleum Geologist.
- Muller, P. D., 1979. Geology of the Los Amates quadrangles and vicinity, Guatemala. Unpublished Ph. D. thesis State University of New York at Binghamton, 326 p.
- Murillo, M. G., Grajales, N. J. M., Cedillo P. E., García, H. J., & Hernández, G. S., 2002. Stratigraphic architecture and sedimentology of the main oil-producing stratigraphic interval at the Cantarell Oil Field: the K/T boundary sedimentary succession. *Society of Petroleum Engineers*, **74431**, 1-7.
- Namson, J., & Personal de Petróleos Mexicanos, 1995. Interpretación geológica del subsuelo, "Área Cantarell". Gerencia de Exploración, Región Marina, Subgerencia de Control Geológico de la Perforación Exploratoria. Ciudad del Carmen, Campeche, *unpublished report*.
- Narr, W., 1991. Fracture density in the deep subsurface: techniques with application to Point Argüello oil field. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, **75**, No. 8, p. 1300-1323.
- Ortega, G. F., & Elías, H. M., 2003. Whole sale meeting of the southern Mixteco Terrane and origin of the Xolapa complex [abs.]: Geological Society of America Abstracts with Programs, v. **35**, No. 4, p. 66
- Ortega, V., & Nolasco, J., 2005. Modelo geológico de la Sonda de Campeche. Petróleos Mexicanos (PEMEX), Región Marina del Activo Regional de Exploración, Grupo de Cuencas y Sistemas Petroleros, (unpublishing report).
- Pacheco, G. A. C., 2002. Deformación Transpresiva Miocénica y el Desarrollo de Sistemas de Fracturas en la Porción Nororiental de la Sonda de Campeche. *Tesis de maestría (Geología)*. Unidad de Ciclos Profesionales y de Posgrado, Colegio Ciencias y Humanidades, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México.

- Pardo, M., & Suárez, G., 1995. Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: seismic and tectonic implications. *Journal of Geophysical Research*, **100**, num. B7, 12357-12373.
- Peacock, D. C. P., & Mann A., 2005. Evaluation of the controls on fracturing in reservoir rocks. *Journal of Petroleum Geology*, **28**,(4), p. 385-396.
- Pindell, J. L., Cande, S. C. W., Pitman, W. C., Rowley, D. B., Dewey, J. F., Lebreque, J., & Haxby, W., 1988. A plate-Kinematic framework for models of Caribbean evolution. *Tectonophysics*, **155**, 121-138.
- Pindell, J. L., Lorcan, K., Walter, M., Klaus, S., & Grenville, D., 2006. Foundations of Gulf of Mexico and Caribbean evolution: eight controversies resolved. *Geologica Acta*, **4**, No. 1-2, 303-341.
- Porres, L. A. A., & Castrejón, V. F., 1991. Caracterisation dataille du champ Abkatun-Kanaab (Golfe du Mexique) au moyen des diagraphies differees et de la sismique. *These doctorat, Université de Bordeaux, France*, 409 p.
- Porres, L. A. A., Samudio, O. M. A., Pacheco, G. A. C., & Castrejón, V.F., 1996. Studies on fracturing in carbonate formations in Mexico. *Society of Petroleum Engineers, Proceedings*, p. 17-24.
- Ramos, V. A., & Alemán, A., 2000. Tectonic evolution of the Andes. In: Cordani, U. G., Milani E.; Thomaz, F. A., & Campos, D. A., (eds) *Tectonic evolution of South America*. In **31st** International Geological Congress, Rio de Janeiro, Brazil, 635-685.
- Ramos, V. A., Cristallini, E. O., & Pérez, D. J., 2002. The Pampean flat-slab of the central Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, **15**, 59-78.
- Rebollar, C. J., Espíndola, V. H., Uribe, A., Mendoza, A. & Pérez, V. A. (1999a). Distribution of stresses and geometry of the Wadati-Benioff zone under Chiapas, Mexico, *Geophysical International*, **38**, p. 95-106.
- Ricoy, U. J., 1989. Tertiary Terrigenous Depositional Systems of the Mexican Isthmus Basins. *PhD. Thesis, University of Texas, Austin, Texas*.
- Rojas, R. R., Soriano M. E., & Durán G. J., 1998. Un nuevo modelo estructural del Gigante Cantarell. *Libro de resúmenes de la Primera Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra*, Conjunto AMOXCALLI, Facultad de Ciencias, UNAM, México, D. F. 21-25 de Septiembre de 1998, p. 158-159.
- Ross, M. I., & Scotese, C. R., 1988. A Hierarchical Tectonic Model of the Gulf of Mexico and Caribbean Regions. *Tectonophysics*, **135**, 139-168.
- Sánchez, B. L. A., 1981. Geologic evolution of the continental margin of the Gulf of Tehuantepec in southern Mexico. *PhD. thesis, University of Texas, Austin, Texas*.
- Schaaf, P., Moran, Z. D., Hernandez, B. M., Solís, P. G., Tolson G., & Köhler, H., 1995. Paleogene continental margin truncation in southwestern Mexico: Geochronological evidence. *Tectonics*, **14**, No. 5, 1339-1350.
- Sedlock, R. L., Ortega, G. F. & Speed, R. C., 1993. Tectonostratigraphic terranes and tectonics evolution of Mexico. Geological Society of America. Special Paper **278**, 153 p.
- Sobolev, S. V., & Babeyko, A. Y., 2005. What drives orogeny in the Andes?. *Geology*, **33**, No. 8, DOI. 10.1130/G21557AR.1, August 2005, 617-620.
- Webb, B. C., & Lawrence, J. D., 1986. Conical folds terminations in the Bannisdale slates of the English Lake District. *Journal of Structural Geology*, **8**, (1), 79-86.

Woodring, W. P., Stewardt, R., & Richards, R. W., 1940. Geology of the Kettleman hills oil field, California. U. S. *Geological Survey Professional Paper*, **195**, 170 p.

Zaldivar, R. J., & Castrejón V. F. F., 2001. Caracterización de yacimientos fracturados carbonatados empleando una simplificación de la técnica del análisis de curvatura. GEOS, *Unión Geofísica Mexicana A. C. Boletín informativo*, Epoca 2, resúmenes y programas, **21**, No. 3, p. 194-195.

CONCLUSIONES GENERALES

El algoritmo matemático generado para calcular la curvatura es altamente eficiente, funciona en cualquier de superficie y la base de datos requiere un espacio en memoria mínimo. Estos factores hacen que este método sea una herramienta muy poderosa en el análisis de áreas potenciales para la exploración de hidrocarburos (el software de cálculo puede ser consultado en: http://geologia.igeolcu.unam.mx/Tolson/SoftWare/Paqueteria_Dominio_Publico.html).

El análisis de curvatura de la estructura de Cantarell muestra que las zonas de curvatura local 2/km coinciden generalmente con las fallas principales y las charnelas de los anticlinales de Cantarell y Nohoch. Asimismo, la ubicación de los pozos con mayor producción muy cerca de las fallas principales indica que estas actuaron tanto como canales de migración así como reservorios de los hidrocarburos. Por otro lado la posición de otros pozos con producción importante estuvieron asociados a la porción cómica de la charnela del anticlinal con una curvatura de 4/km, así como en la porción donde la charnela está afectada por una intrusión salina con curvatura de 3/km hacia el sureste de la estructura.

Con base al desarrollo de la parte teórica se pudo observar que la curvatura en los conos se incrementa exponencialmente hacia el ápice del los mismos. Asimismo, el análisis geométrico de la brecha del Cretácico Superior-Paleógeno y el Kimmeridgiano del anticlinal de Cantarell, mostraron que esta estructura es un pliegue cilíndrico sub-horizontal con sus dos terminaciones de tipo cónico, mas un cono central, todos estos clasificados como “conos en falda” (delantal o mandil), con sus ejes subverticales.

Los altos valores de curvatura en la intersección de la parte cilíndrica con la cónica de la estructura, la variación de los ángulos apicales con la profundidad, y la convergencia de los altos valores de curvatura con los sistemas de fallamiento principal, fueron los factores más importantes para la formación de los reservorios de hidrocarburos.

La evolución tectónica-sedimentaria para la Sonda de Campeche y Sierra de Chiapas fue muy similar del Jurásico al Cretácico Medio, asociada a la apertura de la margen pasiva del Golfo de México, mientras que en el Golfo de Tehuantepec estuvo asociada a una sedimentación de prearco en el límite de una zona de subducción.

Los cinturones de pliegues y cabalgaduras de la Sierra de Chiapas y la Sonda de Campeche fueron formados en el Mioceno Medio por un evento de deformación de tipo piel delgada con un nivel de despegue en el Caloviano. Así también se observó un evento Neógeno extensional que afectó solamente a la Sonda de Campeche con un despegue en el Oligoceno.

El acortamiento para el Mioceno Medio varió de 48 % en la porción SW de la Sierra de Chiapas a 7.8 % en la Sonda de Campeche, con un acortamiento total de ambos cinturones de 106 km.

La corta duración de la deformación del Mioceno Medio se debió a la combinación de los siguientes factores: la disminución del ángulo de subducción, el traslado de la trinchera Mesoamericana hacia el NE, un gap de magmatismo entre 10-13 Ma, y la morfología del Ridge de Tehuantepec.

Actualmente, la estructura de Cantarell en la Sonda de Campeche es la trampa de hidrocarburos más grande de México y la cuarta en el mundo. Así también, la presencia de trampas estructurales similares en el frente sepultado de la Sierra de Chiapas, constituyen áreas potenciales para el almacenamiento de hidrocarburos. Sin embargo, en la porción expuesta de este cinturón plegado la ausencia de un sello adecuado y la aparente presencia de materia orgánica inmadura puede explicarnos la ausencia de reservas conocidas actualmente.