

01179

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERIA

6  
29

MODELADO DINAMICO DE LA SUBSIDENCIA Y LA TERMICIDAD  
EN UN TRANSECTO DE  
LA PROVINCIA CHIAPAS TABASCO

ARTURO ORTIZ UBILLA

**TESIS**

PRESENTADA EN LA DIVISION DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO DE LA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DE LA  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER  
EL GRADO DE

**MAESTRO EN INGENIERIA**  
(EXPLORACION DE RECURSOS ENERGETICOS DEL SUBSUELO)

CIUDAD UNIVERSITARIA

1996

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

**TESIS**

**COMPLETA**

## **DEDICATORIA**

---

**A mis hijos:**

**DAFNE JAICIVI**

**ESAU**

**HABID**

**Con orgullo y cariño**

**A mi esposa:**

**SARA**

**Con cariño por su ayuda y apoyo**

**A mis padres:**

**GILDARDO ORTIZ**

**AIDA UBILLA**

**Como muestra de agradecimiento**

**A mis hermanos y demás familiares:**

## AGRADECIMIENTOS

---

Por medio de estas líneas quiero manifestar mis más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que de alguna manera colaboraron en la realización del presente trabajo:

A las autoridades del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), por la oportunidad y las facilidades que me brindaron tanto para la realización de los estudios de posgrado en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, como para la culminación de estos con la elaboración del presente trabajo de tesis. De manera especial al M en C. Baldomero Carrasco Velázquez, Gerente de Geociencias, quién me alentó y apoyó en todo momento y, por su confianza.

A las autoridades de Petróleos Mexicanos (PEMEX) Exploración, por las facilidades proporcionadas para la consulta y obtención de la información geológica utilizada en la elaboración de este trabajo, en particular para el Dr. Guillermo Pérez Cruz y M en C. Noel Holguín Quiñones.

Al Dr. Felipe Ortuño Arzate por llevar a cabo la dirección de este trabajo de tesis.

A Dr. Jaime Rueda Gaxiola, Dr. Juan José Valencia Islas, Dr. Jaime Barceló Duarte y M en C. Noel Holguín Quiñones, por su aceptación de ser sinodales del jurado examinador, y quiénes con la revisión del informe del presente estudio y sus comentarios y sugerencias, ayudaron a enriquecer sustancialmente el contenido de dicho trabajo

A la Ing. Alicia Rivero Torres, por su asesoría y ayuda en el manejo de algunos de los programas informáticos aquí utilizados.

## CONTENIDO

	Página
<b>RESUMEN</b>	
<b>I. GENERALIDADES</b>	1
I.1. INTRODUCCION	1
I.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
I.3. OBJETIVO	3
I.4. HIPOTESIS	3
I.5. LOCALIZACION DE LA SECCION	4
I.6. FUENTES DE INFORMACION DE LA SECCION	5
I.7. METODOLOGIA DE TRABAJO	6
I.8. TRABAJOS PREVIOS	8
I.9. MARCO GEOLOGICO	9
I.9.1. Basamento	10
I.9.2. Cubierta Sedimentaria	12
I.9.3. Marco Tectónico Regional	13
<b>II. ANALISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION</b>	17
II.1. COLUMNA GEOLOGICA	17
II.2. MARCO ESTRUCTURAL	19
II.3. SECCION MODELADA	20
II.4. DESCRIPCION DE LAS UNIDADES	21
II.4.1. Basamento	21
II.4.2. Sal	22
II.4.3. Serie Jurásico Superior	24
II.4.4. Serie Cretácico Inferior	26
II.4.5. Serie Cretácico Medio	29
II.4.6. Serie Cretácico Superior	31
II.4.7. Serie Paleoceno	35
II.4.8. Serie Eoceno	36
II.4.9. Serie Oligoceno	38
II.4.10. Serie Mioceno	41
II.4.11. Serie Plioceno	43

II.4.12. Serie Pleistoceno	45
II.4.13. Serie Reciente	46
<b>III. ANALISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA</b>	<b>47</b>
<b>III.1. CONCEPTOS TEORICOS DE LA SUBSIDENCIA</b>	<b>47</b>
III.1.1. Subsistencia	47
III.1.2. Historia de Sepultamiento	48
III.1.3. Descompactación	50
III.1.4. Paleobatimetría	54
III.1.5. Eustatismo	56
III.1.6. "Backstripping"	57
III.1.7. Subsistencia Tectónica	60
<b>III.2. ANALISIS DE SUBSIDENCIA DE LA SECCION</b>	<b>63</b>
III.2.1. Curvas de Compactación	63
III.2.2. Historia de Sepultamiento	68
III.2.3. Historia de Subsistencia Total	96
III.2.4. Historia de Subsistencia Tectónica	102
III.2.5. Implicaciones Geodinámicas	107
<b>IV. ANALISIS Y MODELADO TERMICO</b>	<b>113</b>
<b>IV.1. CONCEPTOS TEORICOS DE LA TERMICIDAD</b>	<b>113</b>
IV.1.1. Flujo de Calor	114
a. Fuentes de Generación	114
b. Transmisión del Calor	117
IV.1.2. Historia Térmica	122
<b>IV.2. ANALISIS TERMICO DE LA SECCION</b>	<b>126</b>
IV.2.1. Historia de Flujo de Calor	126
IV.2.2. Historia Térmica	129
<b>V. SINTESIS</b>	<b>143</b>
<b>VI. CONCLUSIONES</b>	<b>153</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>158</b>

## RESUMEN

En el presente estudio se realiza el modelado numérico de la evolución de la subsidencia y la termicidad a lo largo de una sección geológica del Area Mesozoica Chiapas-Tabasco, mediante la integración de los resultados del modelado unidimensional de trece puntos de control localizados dentro de ésta. Una síntesis de los conceptos teóricos fundamentales de la subsidencia y la termicidad considerados dentro del modelado, complementa este estudio.

La sección estudiada se localiza hacia las porciones más noroccidental del estado de Chiapas y surcentral de Tabasco, ligeramente al sur de la ciudad de Villahermosa, Tab., dentro de la Planicie Costera del Golfo. Comprende una longitud aproximada de 91 Km, guardando una orientación general de SW-NE, y se encuentra dentro de la Provincia de las Cuencas del Sureste.

Esta sección representa una porción de una cuenca sedimentaria mesozoica-cenozoica, cuyo basamento se considera de tipo Igneo-metamórfico del Paleozoico Tardío, típicamente de carácter continental. La cubierta sedimentaria por su parte, de una manera general, está conformada por rocas de naturaleza salina del Jurásico Medio (?) en la base, sobreyacidas por una secuencia arcillo-calcárea del Jurásico Tardío, la cual es seguida por una de tipo eminentemente carbonatado del Cretácico, que está influenciada parcialmente por depósitos terrígenos en su parte alta y, por último, por una secuencia predominantemente terrígena del Cenozoico.

Con base en el análisis por "backstripping", se establecieron los espesores de depósito probables de las diferentes unidades sedimentarias y, con esto, las tasas de sedimentación respectivas, así como las geometrías de estas acumulaciones, a lo largo de la sección. Además, se describe a través del tiempo, su grado de compactación y la ubicación espacial que guardan con el posterior depósito de unidades más jóvenes.

La subsidencia total se define desarrollada espacial y temporalmente, de manera diferencial a lo largo de la sección, individualizando la ocurrencia de sectores o bloques dentro de ella, y cinco etapas principales de diferente proporción de hundimiento. Tres de



éstas se caracterizan con una tasa de subsidencia relativamente alta, acaecidas durante el: 1) Jurásico Medio-Tardío; 2) Cretácico Medio-Tardío en el sector suroccidental de la sección, Cretácico Tardío-Eoceno en la porción central y, Paleoceno-Oligoceno en la parte nororiental; 3) Mioceno-Reciente. Las otras dos etapas se refieren como de subsidencia atenuada, que se desarrollaron en el: 1) Cretácico Temprano, extendiéndose hasta el Cretácico-Tardío en los sectores central y nororiental de la sección; 2) Cretácico Tardío-Oligoceno, en la parte suroccidental y, Eoceno-Oligoceno en la porción central.

El comportamiento de las curvas de subsidencia tectónica obtenidas a partir de la subsidencia total de la sección, se relaciona con el desarrollo de una cuenca de carácter extensional, en donde la Fase de Estiramiento o "Rift" se caracteriza para el Jurásico Medio-Tardío, en la que se incluye la primer etapa de alta tasa de subsidencia total, y, la Fase Termotectónica para el Cretácico Temprano-Reciente, en la que se engloban las otras cuatro etapas de subsidencia total. El Factor de Estiramiento  $\beta$  relacionado al desarrollo de esta cuenca, se estima con un promedio de 1.8.

La definición de variaciones de comportamiento en las curvas de subsidencia tectónica, con respecto al de las curvas definidas de manera teórica para una cuenca extensional, sugieren para la sección una historia de carácter polifásico, más que un evento de subsidencia simple, que, en función del grado de participación que tiene la subsidencia tectónica en la subsidencia total, se caracteriza con cinco etapas, una, la primera, desarrollada en la fase de estiramiento y, las cuatro restantes, en la fase termotectónica. Estas son: 1) Activación, debida al adelgazamiento de la litósfera; 2) Atenuación, una etapa de estabilidad; 3) Flexural, probablemente debida por deformación fuera de la región de la sección de estudio; 4) Atenuación-Inversión, asociada con un evento de deformación y levantamiento dentro de la cuenca; 5) Colmatación, relacionada con un aporte importante de volumen de sedimentos.

Bajo la consideración de una historia de flujo de calor variable, el marco de temperatura modelado de la cubierta sedimentaria de la sección varía entre 32°C para el Jurásico y, 175-200°C en la actualidad. El gradiente geotérmico muestra variaciones laterales, relacionadas con la ubicación estructuralmente alta de la Sal, y verticales (tipo "dog-leg") por la distinta conductividad térmica de las unidades sedimentarias. Dentro de este marco térmico de referencia modelado, la Serie Jurásico Superior, el Tithoniano incluido, progresó a rangos cada vez mayores de una manera diacrónica a lo largo de la sección, primero la porción suroeste (pozos 1 al 5) y, después, la noreste (pozos 6 al 13).

# I. GENERALIDADES

## I.1. INTRODUCCION

En años recientes los resultados obtenidos de los estudios tradicionales de exploración, que con objetivos petrolíferos se han venido efectuando a nivel mundial, se han encontrado con la problemática de verse calificados como de alto riesgo económico, ya que el promedio de éxito que se viene alcanzando durante la posterior etapa de perforación de pozos exploratorios, ha llegado a ser sólo de alrededor del 10 %.

En la actualidad, la determinación y localización de nuevos yacimientos de hidrocarburos, presenta cada vez mayores complejidades geológicas. Las manifestaciones superficiales de hidrocarburos, ya de casi nula ocurrencia, y la identificación de una estructura anticlinal, que no siempre constituye un yacimiento, han dejado de ser las principales guías de la exploración.

Es por esto que actualmente, las actividades llevadas a cabo en los trabajos de exploración geológica con objetivos petroleros, se están enriqueciendo continuamente con la implementación y desarrollo de nuevas metodologías y técnicas de análisis. Estas tienen como finalidad, tratar de optimizar los

resultados que de estos estudios se obtengan, a manera de reducir en lo más posible el grado de incertidumbre que llevan consigo, y que redunden en una evaluación más real de las perspectivas petrolíferas de una región determinada.

Así, se ha dado paso a una etapa de análisis de carácter más descriptivo y cuantitativo, del porqué y del cuándo de los mecanismos inherentes a la generación, entrapamiento y conservación de los hidrocarburos en determinadas regiones, persiguiendo un mayor entendimiento de las complejidades geológicas.

El Modelado de Cuencas (Welte y Yukler, 1981; Nakayama y Lerche, 1987 a y b; Welte y Yalcin, 1988; Ungerer, P. *et al.*, 1990, 1991), es una técnica de estudio que tiene la finalidad de analizar dentro de un marco cuantitativo e interactivo, varios de los principales procesos geológicos involucrados con el origen y evolución de los hidrocarburos dentro de una cuenca sedimentaria. La subsidencia y la termicidad de la cuenca, así como la maduración de la materia orgánica y la migración de los hidrocarburos, son los cuatro procesos que primordialmente se consideran y analizan con esta técnica.

El hecho de que estos procesos puedan ser descritos mediante ecuaciones matemáticas, y

## GENERALIDADES

---

de que éstas puedan manejarse y resolverse iterativamente cada vez de manera más eficiente por medio de sistemas informáticos, ha desembocado en la implementación y desarrollo de programas de cómputo, en los que, los modelos geológicos conceptuales tradicionales pueden ser simulados matemáticamente y, de esta manera, evaluados y analizados cuantitativa e interactivamente. Esta modalidad de evaluación geológica petrolera se ha referido también como Modelado Numérico.

Este modelado, dependiendo del carácter de los algoritmos definidos para los diferentes procesos geológicos que se toman en cuenta en los programas de computación, pueden aportar soluciones en una (1D), dos (2D) y hasta tres dimensiones (3D).

El carácter cuantitativo implícito en este modelado, se considera que puede recrear un escenario geológico de mayor poder de resolución en cuanto a la evaluación petrolífera que se realiza de una región determinada, con lo cual se espera reducir considerablemente el grado de incertidumbre y de riesgo económico de las actividades exploratorias petroleras.

### 1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El hecho de que el modelado numérico constituya una técnica de estudio geológico relativamente nueva, desarrollada apenas en la pasada década de los 80's, que continúa aún

progresando y que se encuentra todavía en una etapa de difusión y diversificación dentro del ámbito de los estudios de las ciencias de la tierra, plantea la problemática de que su utilización requiere del conocimiento de cuáles conceptos geológicos son básicamente utilizados y, bajo qué criterio éstos son considerados matemáticamente dentro del análisis, a fin de reconocer, de la mejor manera, desde un punto de vista geológico, las implicaciones que conllevan sus resultados.

Este tipo de trabajos se hacen necesarios para contar con un marco cuantitativo de referencia de los modelos geológicos cualitativos y, en México, a la fecha, pocos son los estudios que bajo esta técnica de análisis se han llevado a cabo, por lo que se considera que la realización de éstos, como una herramienta más de evaluación geológica de la evolución de áreas específicas, deben incrementarse.

Particularmente el Área Mesozoica Chiapas-Tabasco en el sureste mexicano, la zona de estudio del presente trabajo, cuenta con relativamente pocos estudios de modelado numérico, Sosa y Hegre (1994) y Sosa P., A. A. (1994) trabajaron sobre el tiempo de generación y expulsión de los hidrocarburos, pero sin detallar sobre los aspectos de la subsidencia. Por otro lado, hacia la zona de Campeche, trabajos similares fueron realizados por Raedeke, L. D. *et al.* (1994) y Schoellkopf, N. B. *et al.* (1994); mientras que Alzaga R., H. (1994) incurrió en el análisis de la subsidencia en la zona de la Sierra de Chiapas.

## GENERALIDADES

---

El Area Mesozoica Chiapas-Tabasco, una porción terrestre de la Provincia de las Cuencas del Sureste, en la actualidad se puede referir como una región en una etapa de exploración relativamente madura. Dada la abundancia de estudios de carácter geológico y geofísico en general ahí realizados, así como los numerosos pozos de exploración y de desarrollo perforados, se conceptúa como una zona en la que el potencial prospectivo de yacimientos de hidrocarburos no ha sido aún agotado, por lo que requiere todavía de más estudios de detalle que conduzcan a tener un mayor entendimiento de su historia geológica. Se considera que el modelado numérico de la subsidencia y la termicidad pueden contribuir al respecto.

### 1.3. OBJETIVO

El presente estudio tiene como objetivo primordial, analizar el contexto evolutivo de la subsidencia y de la termicidad en una sección geológica del Arca Mesozoica Chiapas-Tabasco, mediante la técnica del modelado numérico unidimensional.

Como objetivo complementario se persigue recapitular y sintetizar la serie de conceptos geológicos fundamentales que, como parte integral del análisis de cuencas sedimentarias, son utilizados y manejados dentro del modelado de la subsidencia y la termicidad de una cuenca, y analizar el

tratamiento que se les da dentro de programas informáticos.

### 1.4. HIPOTESIS

Los objetivos anteriores podrán ser alcanzados si se describe dentro de un marco cuantitativo, el modelo geológico cualitativo con que se caracteriza la evolución del relleno sedimentario (subsidencia) y la historia térmica del sector de la cuenca en la que la sección se encuentra. Con esto se pretende evaluar los espesores originales de depósito de cada una de las diferentes unidades estratigráficas, por medio de la variación de los valores de porosidad como función del sepultamiento, así como la disposición espacial que a lo largo de la sección guardaron como producto de dicho sepultamiento. Las curvas de sepultamiento que se obtendrán a partir de esta información, por otro lado, se considera que permitirán conocer de qué manera y cuánto influyó la actividad tectónica en la evolución de la sección y de la cuenca.

A partir de la información de temperaturas actuales en los pozos de control de la sección, y en conjunción con los resultados anteriormente mencionados, se podrá elaborar un modelo de la historia térmica a lo largo de la sección y analizar el comportamiento que la serie Jurásico Superior, la unidad considerada en la región como la principal roca generadora de hidrocarburos, tuvo dentro de este marco térmico de referencia.

## GENERALIDADES

---

Este marco cuantitativo que se obtendrá con el modelado numérico de la sección constituirá una integración de la información geológica disponible, a modo de una evaluación que puntualice en qué aspectos es necesario contar con más datos y en dónde se adolece de ellos, a manera de buscar su obtención y utilización en la elaboración de un marco cuantitativo más apegado a la realidad.

La aplicación de la técnica del modelado numérico, redundará en la síntesis de los principales conceptos teóricos allí involucrados y de su manejo dentro de programas informáticos.

### 1.5. LOCALIZACION DE LA SECCION

La sección por modelar se encuentra localizada en el sureste de México, específicamente hacia las porciones más noroccidental del estado de Chiapas y surentral del estado de Tabasco, ligeramente al sur y sureste de la ciudad más importante de la región, Villahermosa, Tab. (Fig. 1)

Se ubica dentro de un cuadrángulo delimitado por los paralelos 17° 35' y 18° 06' de latitud norte, y los meridianos 92° 45' y 93° 25' de longitud oeste. La sección, aunque con una pequeña flexión, guarda una orientación general de SW-NE y comprende una longitud aproximada de 91 Km.

Desde el punto de vista fisiográfico se encuentra ubicada dentro de la Provincia de la

Planicie Costera del Golfo, concretamente hacia su porción suroriental. Esta es una provincia caracterizada por una topografía sensiblemente plana, con la presencia sólo de algunas colinas suaves de escasa elevación, en la que se tiene desarrollado un desnivel de altitud que va desde los 250-300 m en su extremo sur, hasta los 0 m en las costas del Golfo de México, en su parte norte. Afloran sedimentos marinos siliciclásticos del Neógeno y aluviales del Cuaternario.

El Río Grijalva constituye su principal corriente hidrográfica en el área de la sección, de hecho ésta última se ubica al oriente de dicho río, al cual, un poco al nororiental de la ciudad de Villahermosa, vienen a confluír las corrientes de otros dos ríos de menor magnitud, como son el Teapa y Tacotalpa, que se encuentran al oriente de la sección.

En el contexto de las regiones productoras de hidrocarburos de la República Mexicana, la sección estudiada se ubica en la Provincia de las Cuencas del Sureste, particularmente dentro de su porción terrestre, en la zona referida como el Area Mesozoica Chiapas-Tabasco y, específicamente de ésta última, hacia sus estribaciones meridionales (Fig. 2).

Esta provincia se encuentra limitada al oriente por la Cuenca de Macuspana, al poniente por la Cuenca de Comalcalco y hacia el sur por la Sierra de Chiapas. Esta área se continúa hacia el norte, ya dentro de la región marina, en donde se le refiere como el Pilar Tectónico Reforma-Akal.

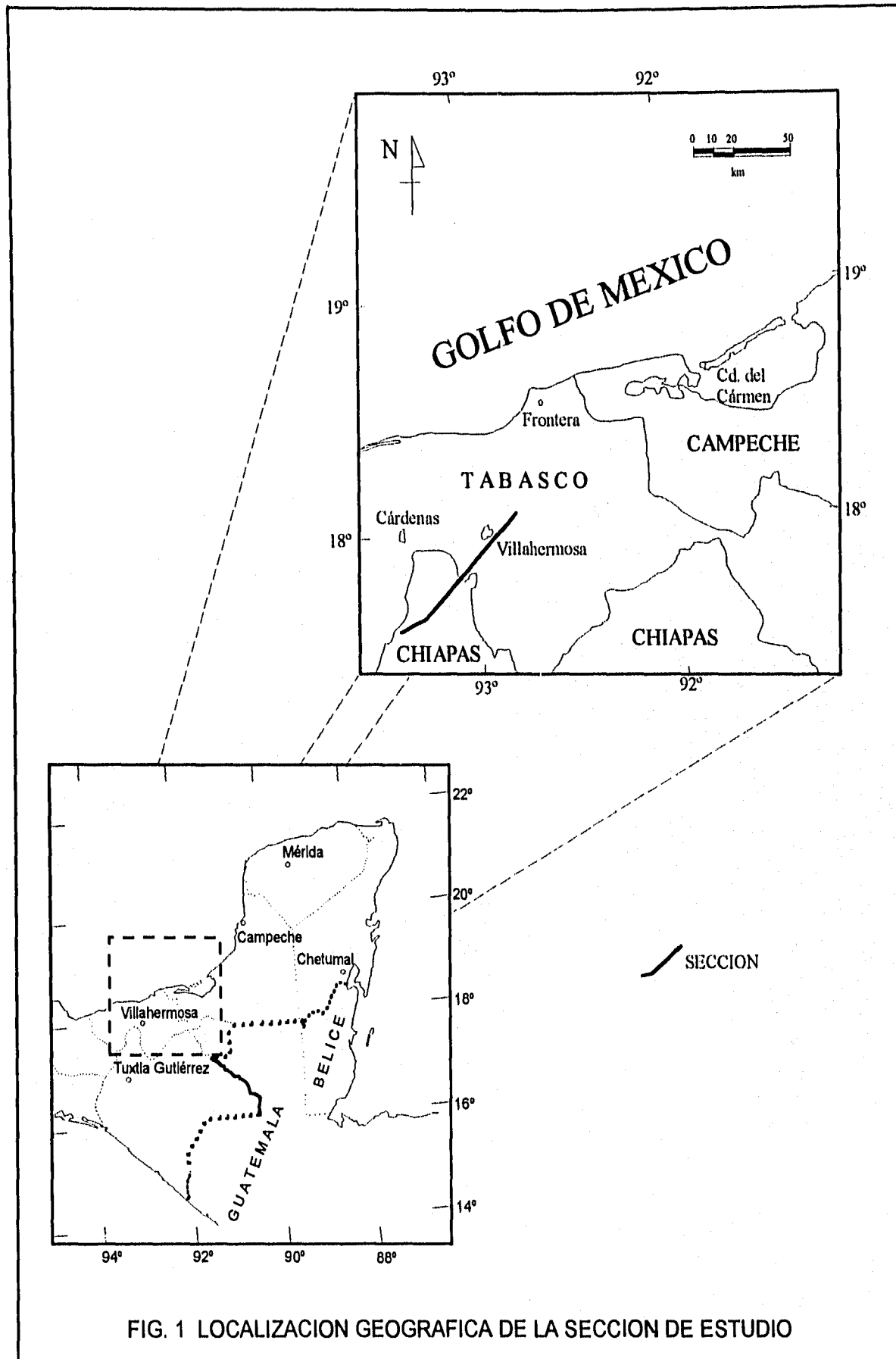


FIG. 1 LOCALIZACION GEOGRAFICA DE LA SECCION DE ESTUDIO

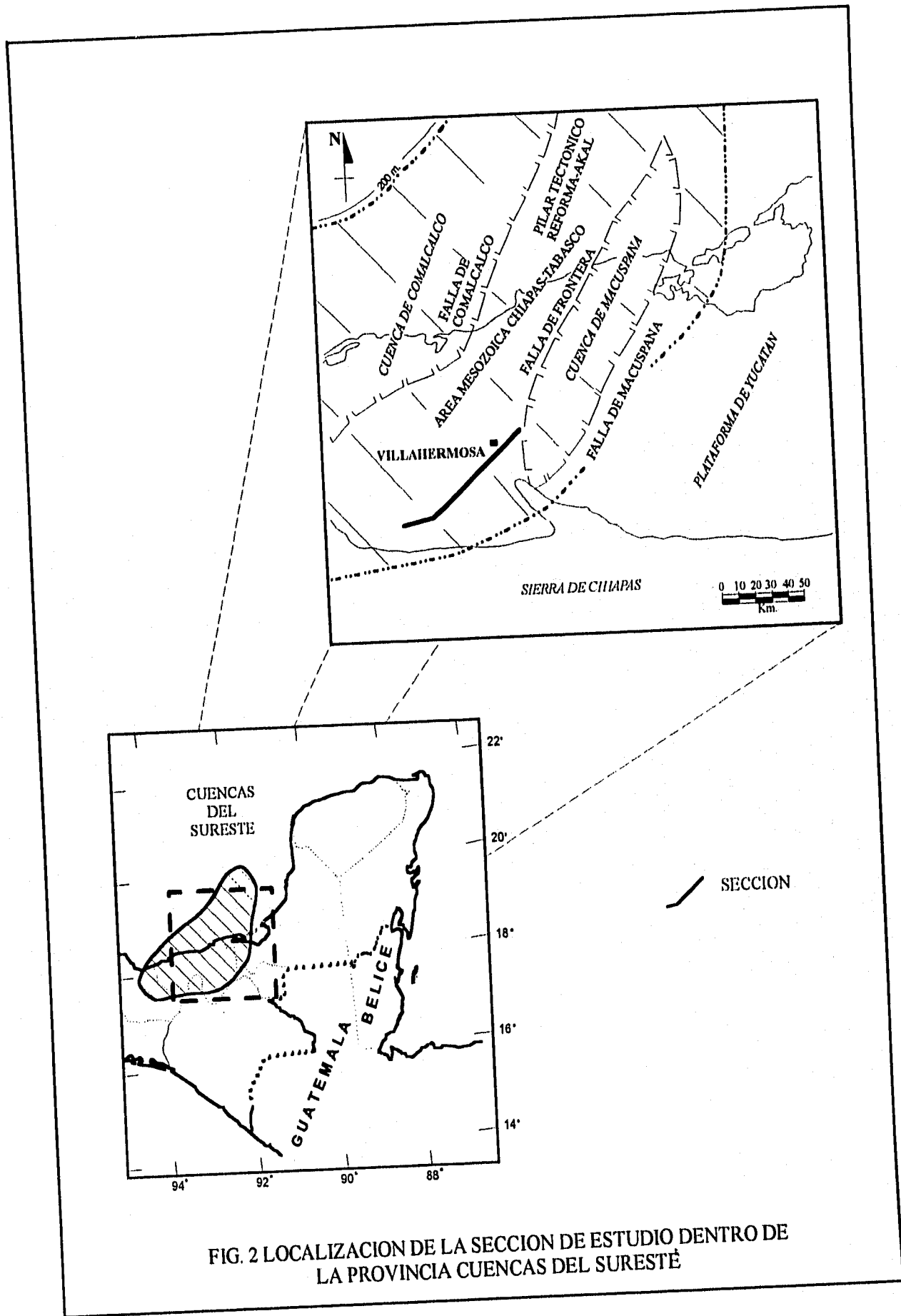


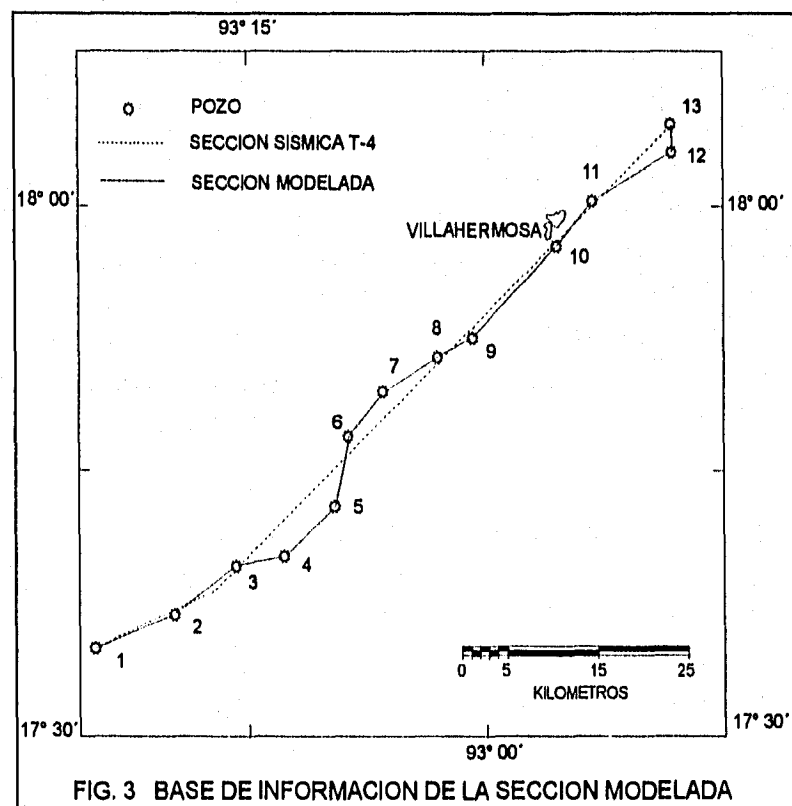
FIG. 2 LOCALIZACION DE LA SECCION DE ESTUDIO DENTRO DE LA PROVINCIA CUENCAS DEL SURESTÉ

## GENERALIDADES

El Area Mesozoica Chiapas-Tabasco y el Pilar Tectónico Reforma-Akal (Santiago A., J. *et al.*, 1984), también han sido referidos conjuntamente como el Cinturón Calcáreo Plegado de Reforma-Akal (Meneses R., J. J., 1980) y como "Horst" Villahermosa (Viniestra O., F., 1981; Holguín Q., N., 1985), así como de manera independiente, como Pliegues Villahermosa y Pliegues Sonda de Campeche respectivamente (García M., G., 1994).

### I.6. FUENTES DE INFORMACION DE LA SECCION

La elaboración de la sección de estudio se llevó a cabo a lo largo de trece pozos de control, los cuales denominadamente, por conveniencia del desarrollo del trabajo, fueron manejados mediante una numeración consecutiva en sentido SW-NE, como se muestra esquemáticamente en la Figura 3.





## GENERALIDADES

---

La información estratigráfica correspondiente a estos trece pozos, fue proporcionada por Petróleos Mexicanos (PEMEX), lo mismo que, los datos geoquímicos y de temperatura de fondo de pozo (BHT) de algunos de ellos.

La información acerca del comportamiento estructural de las distintas unidades estratigráficas de la cubierta sedimentaria, así como sus variaciones laterales a lo largo de la sección, fueron consideradas a partir de la interpretación en profundidad de una sección sísmica mostrada por García M., G. (1994) en su trabajo de tesis.

Tomando en cuenta que entre ambas secciones, la definida en el presente estudio por los diferentes pozos analizados y la referida por García (*op. cit.*), no presentan espacialmente un desplazamiento importante, se considera que tomar en cuenta las características que se definen en ésta última, para la primera, prácticamente no conlleva un margen de error considerable (Fig. 3).

### 1.7. METODOLOGIA DE TRABAJO

El presente estudio, constituye un trabajo en el que se analiza una parte de la metodología involucrada en el modelado de cuencas, en específico la solución unidimensional de la subsidencia y la termicidad, y su aplicación al

caso particular de una sección geológica del Área Mesozoica Chiapas-Tabasco. Su desarrollo se sintetiza llevado a cabo en tres partes principales:

A) Investigación y análisis de los conceptos y bases teóricas de la subsidencia y la termicidad, que son manejados dentro de los estudios de Análisis de Cuencas Sedimentarias, y los que, a su vez, son utilizados en el trabajo del modelado numérico.

Esta primera parte, representada en la porción inferior izquierda del diagrama de flujo de la metodología de trabajo (Fig. 4), se realizó mediante la consulta de bibliografía especializada relativa a los conceptos geológicos teóricos de la subsidencia y la termicidad, cuyos principales aspectos fueron sintetizados e integrados a manera de notas teóricas, de modo que pudieran ser empleados como base de consulta y referencia, en el desarrollo de las diferentes fases de trabajo y análisis del modelado.

Esta parte del trabajo culminó con el análisis del tratamiento práctico que a estos conceptos se les da dentro de algunos programas informáticos específicos, que en el caso del presente trabajo particularmente fueron BASINMOD y GENEX.

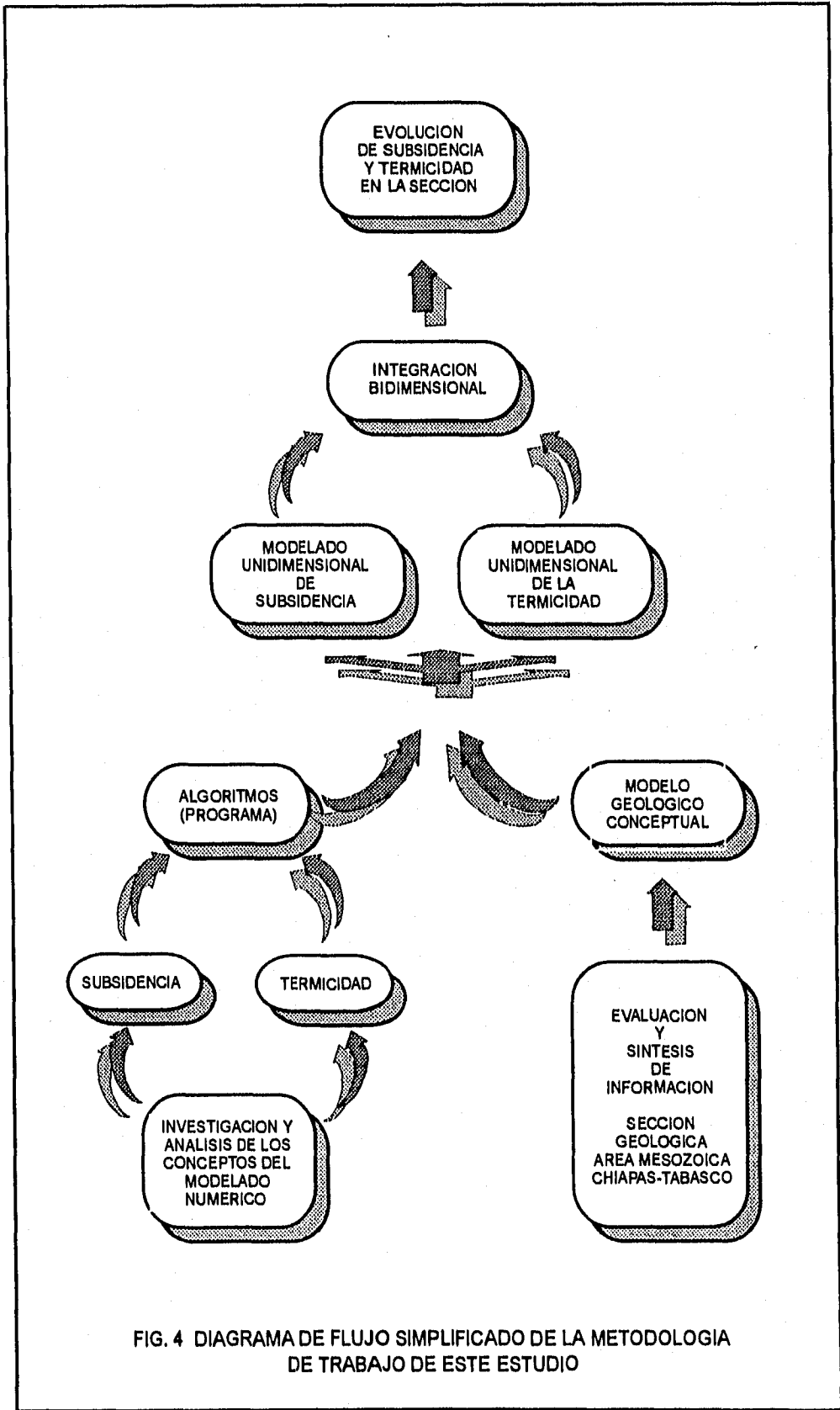


FIG. 4 DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO DE LA METODOLOGIA DE TRABAJO DE ESTE ESTUDIO

## GENERALIDADES

---

### B) Evaluación y síntesis de la información geológica de la región de la sección.

Esta otra parte del presente estudio, desarrollada más o menos simultáneamente con la etapa anterior, como se esquematiza en la porción inferior derecha de la Figura 4, consistió de la obtención y análisis de los datos de carácter geológico de la sección estudiada y de la zona en la cual se encuentra ubicada ésta última, contenidos en informes técnicos inéditos y en publicaciones diversas, a partir de los cuales se obtuvo el marco geológico y el modelo geológico conceptual de evolución de las mismas.

Con esta actividad, específicamente, se integró la información de los 13 pozos de control contenidos en la sección, así como aquella de carácter stratigráfico, estructural, sísmica, tectónica y geoquímica de la región.

### C) Realización del modelado de la subsidencia y la termicidad de la sección.

Esta tercera parte del desarrollo del trabajo, constituye la aplicación práctica de la técnica del modelado numérico de la subsidencia y la termicidad, y es la conjunción de las dos etapas anteriores, como se puede observar esquemáticamente en la Figura 4. Consistió de la realización del modelado unidimensional de cada uno de los trece pozos de la sección.

En primera instancia se efectuó el análisis de subsidencia de la sección, que se llevó a cabo en función de la reconstrucción y evaluación

de la geometría de la cubierta sedimentaria a través del tiempo, esto es, del modelado de los espesores descompactados y de la variación de la porosidad de las diferentes unidades de la columna, de las proporciones de sedimentación, así como de la subsidencia total y tectónica.

La estimación de la subsidencia tectónica se hizo mediante la aplicación del método de "backstripping" a las distintas unidades litológicas presentes, lo cual se realizó con el auxilio de los programas BASINMOD y GENEX. Los resultados obtenidos al respecto fueron utilizados en la caracterización de la historia tectónica de la sección.

Por otro lado, el análisis de termicidad de la sección, esto es, la determinación espacial y temporal de la temperatura dentro de la cubierta sedimentaria, se realizó en función del establecimiento de la historia de flujo de calor, lo cual se hizo a su vez, mediante la estimación de los actuales valores de este tipo allí prevaecientes, en función de los datos de temperatura de fondo de pozo (BHT), y de los valores presentes durante su historia de comportamiento tectónico. Este análisis se desarrolló también con el auxilio de los programas BASINMOD y GENEX.

Posteriormente, los resultados puntuales obtenidos de éstas dos actividades, se integraron a lo largo de la sección simulando un comportamiento bidimensional, de lo que, finalmente, se realizó el análisis de la evolución de la subsidencia y termicidad en la sección (Fig. 4).

## GENERALIDADES

---

### I.8. TRABAJOS PREVIOS

En el área de la sección que nos ocupa, se han realizado trabajos exploratorios con objetivos petroleros desde principios de siglo, sobre todo encaminados al estudio de los materiales terciarios; pero no es sino hasta a finales de la década de los 60's, con la perforación del pozo Jalapa 3 que cortó rocas cretácicas, que se inició una etapa de estudios geológico-geofísicos con objetivos más profundos. En la década de los 70's, las actividades de los trabajos exploratorios se vieron coronados exitosamente con la perforación de los pozos Cactus- 1 y Sitio Grande- 1, productores en rocas del Cretácico Tardío y Medio a profundidades de alrededor de los 4 000 m (Santiago A., J. *et al.*, 1984), dentro de yacimientos que después fueron calificados como de carácter gigante, a los cuales se les fueron adicionando, paulatinamente, nuevos descubrimientos de varias dimensiones, para que la región se constituyera como una de las zonas productoras de hidrocarburos más importantes de México.

Los estudios realizados en la década de los 80's y lo que va de los 90's, han aumentado considerablemente la cantidad y calidad de la información del subsuelo, a partir de la cual se ha podido ir delincando, con un mayor grado de certidumbre, las características e historia geológica de la región.

Algunos de los varios de estos trabajos que pudieron ser consultados, y de los que de

alguna manera aportaron información que fue utilizada en el desarrollo del presente estudio, se citan a continuación acompañados de una breve reseña de sus tópicos más importantes.

Viniestra O., F. (1981), en la caracterización del Banco Carbonatado de Yucatán, presenta una síntesis estratigráfica y estructural de gran parte del Área Mesozoica Chiapas-Tabasco, así como de sus condiciones petroleras.

Santiago A., J. *et al.* (1984) proporcionan una descripción sintética del marco tectónico y estratigráfico del Área Mesozoica Chiapas-Tabasco, además de referir las principales características petroleras de las rocas almacenadoras, generadoras y sello de la zona.

Los trabajos de Holguín Q., N. (1988) y de González y Holguín (1992), proporcionan una integración y evaluación de diversos parámetros geoquímicos, y su relación con los hidrocarburos presentes en el sureste de México, caracterizando a las rocas del Tithoniano como las principalmente generadoras.

Salvador, A. (1991 a y b) editó un compendio de la geología y de los recursos de la Cuenca del Golfo de México, en el que diferentes aspectos estratigráficos y tectónicos del sureste de México se encuentran resumidos.

Mandujano V., J. *et al.* (1992) dan una descripción de la distribución espacial y temporal de las diferentes facies sedimentarias en la Provincia de la Sierra de Chiapas, en donde determinan tres periodos de subsidencia:

## GENERALIDADES

---

Jurásico Tardío-Cretácico Medio, Cretácico Tardío-Paloceno y Eoceno Tardío-Oligoceno, y relacionan la historia tectónica de la región a un margen transformante asociado a la apertura del Golfo de México, con reactivaciones de transeurrencia del Cretácico Tardío hasta nuestros días.

García M., G. (1994) realizó una interpretación estructural regional de varias líneas sísmicas a través de las diferentes cuencas que constituyen la Provincia de Cuencas del Sureste, caracterizando dos eventos de deformación que afectaron la región, uno de tipo compresional ocurrido en el Mioceno Tardío, en el que marca como principal nivel de despegue a la secuencia evaporítica del Jurásico Medio, y otro de carácter extensional del Neógeno Tardío. Proporciona también una integración regional de la nomenclatura estratigráfica de la región.

Alzaga R., H. (1994) llevó a cabo un análisis de subsidencia en la porción centro-occidental de la Sierra de Chiapas, concluyendo que las mayores tasas de subsidencia se registraron durante el Jurásico Medio y Cretácico Temprano, en bloques con depósitos de plataforma, y en el Jurásico Tardío, en bloques con sedimentos de cuenca, caracterizando la subsidencia jurásica como termotectónica y la del Cretácico como flexural.

Sosa y Hegre (1994) realizaron el modelado de 36 pozos por medio del programa GENEX en las Cuencas del Sureste y propusieron que la generación de los hidrocarburos en el "Horst" de Villahermosa se dió hace 45 Ma, a partir de

un kerógeno tipo II que actualmente se califica como maduro a sobremaduro, mientras que la expulsión se registró hasta hace 21 Ma.

Williams R., C. T. (1995) describió el desarrollo y evolución que las diferentes facies sedimentarias que se presentaron en la margen sur de la Plataforma Aislada Cretácica Artesa-Mundo Nuevo, como producto de su ahogamiento durante fines del Cretácico Medio y Cretácico Tardío.

### 1.9. MARCO GEOLOGICO

En este inciso se describen de forma resumida, las particularidades geológicas del área en la que se encuentra ubicada la sección de estudio del presente trabajo.

Esta sección, de una manera general y, en función de los componentes mayores de una cuenca sedimentaria, esto es, de su basamento y de su cubierta sedimentaria, se puede decir que representa una porción de una cuenca sedimentaria mesozoica-cenozoica, ya que el relleno sedimentario presente en ésta, involucra rocas y sedimentos con un rango de edad del Jurásico Medio al Reciente, el cual vino a desarrollarse sobre un basamento ígneo-metamórfico Paleozoico Tardío.

Es precisamente que en función de éstos dos elementos mayores, el basamento y la cubierta sedimentaria, que se describe el marco geológico de la sección.

## GENERALIDADES

---

### I.9.1. Basamento

En el área que se define ocupada por la sección estudiada, ninguno de los diferentes pozos contenidos en ésta llegaron al basamento de la cuenca, no teniéndose, por tanto, en esta porción evidencias de manera directa del tipo de rocas que lo constituyen.

Por esta razón, su carácter se infiere a partir de la información de pozos cercanos que sí lo alcanzaron, y de la tendencia de distribución que éstas rocas definen al ser correlacionadas más regionalmente, con otras ocurrencias de este basamento en localidades adyacentes, ya sea en otros pozos o en afloramientos.

En las inmediaciones del área de la sección, las localidades más cercanas con información acerca de las características del basamento de la cuenca, corresponden a las de los pozos Cobo-301 y Villa Allende-1, localizados hacia el oriente y sur de la sección respectivamente (Fig. 5).

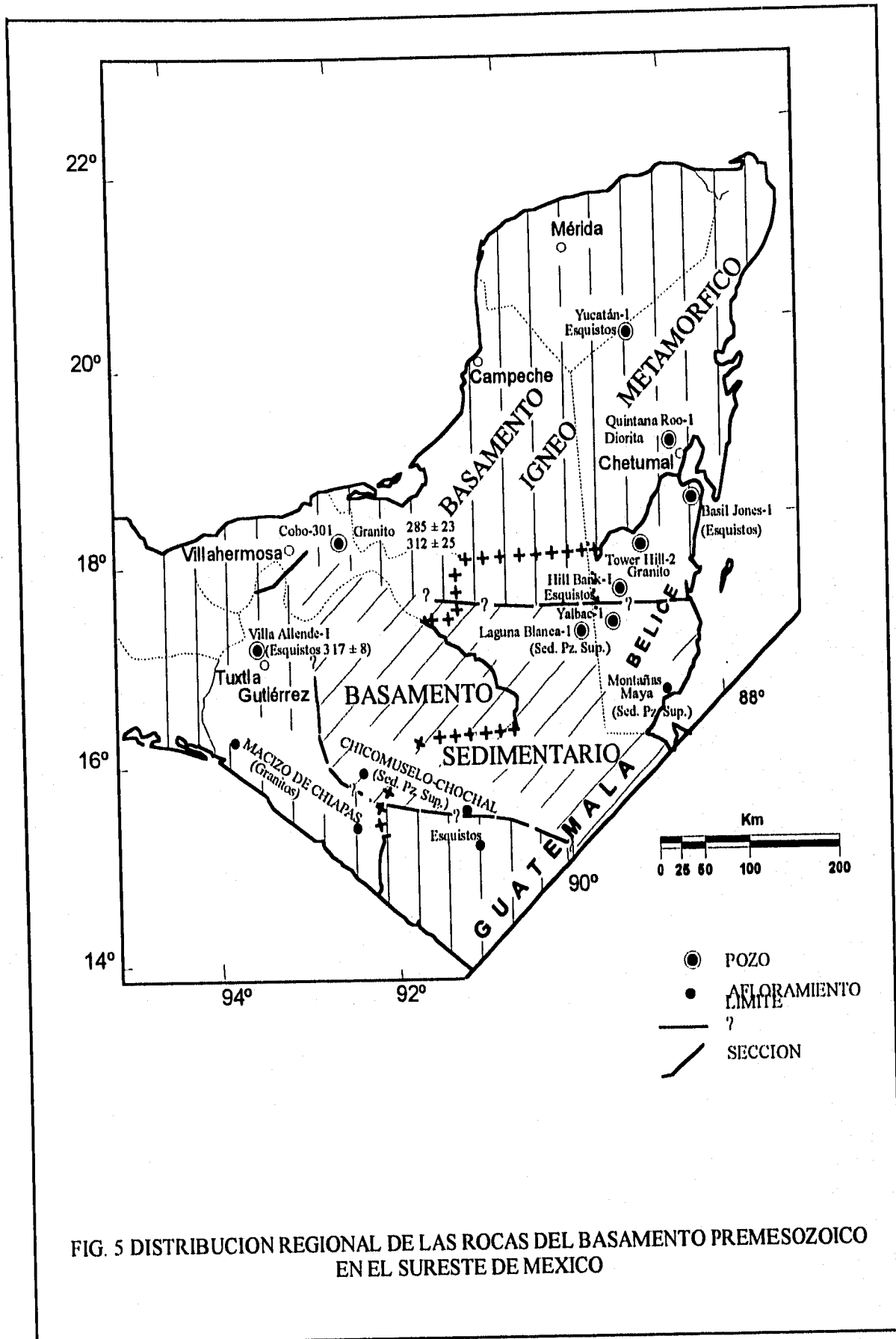
En el pozo Cobo-301 se reporta la presencia de rocas graníticas a una profundidad de 5 620 m, las cuales han sido clasificadas como granito de biotita (*in* García M., G., 1994), a las que se les han determinado edades radiométricas por el método K-Ar de  $312 \pm 25$  Ma (*in* Mandujano V., J. *et al.*, 1992) y de  $285 \pm 23$  Ma, esto es Carbonífero y Pérmico respectivamente. Aunque se debe mencionar que se ha expresado cierta duda, de que sí estas rocas representan un verdadero

basamento, o de que sí constituyen un horizonte sedimentario clástico, ya que García (*op. cit.*), reporta que se manifiestan buenos reflectores sísmicos debajo de la base de este pozo.

Por su parte, en el pozo Villa Allende-1 se encontraron rocas metamórficas a la profundidad de 4 200 m, las cuales se clasificaron como esquistos, que proporcionaron una edad radiométrica de  $317 \pm 8$  Ma (Carbonífero).

Regionalmente, más información de basamento se tiene en el sur del estado de Chiapas, en donde se encuentra expuesto el Macizo de Chiapas (Fig. 5), una amplia zona en la que se presentan aflorando predominantemente rocas graníticas, así como algunas rocas metamórficas asociadas, a las que se les han reportado la determinación de edades radiométricas principalmente paleozoicas.

También en la región de Chicomuselo, Chis., en donde se tienen aflorando rocas sedimentarias del Paleozoico Tardío (Misisípico, Pensilvánico y Pérmico), las cuales en parte están sensiblemente metamorfoscadas (López R., E., 1979; Woods, R. D. *et al.*, 1991), se consideran que también forman parte del basamento de la región, ya que la relación estratigráfica que guardan con las rocas mesozoicas está dada por una discordancia angular, lo cual indica dos historias depositacionales diferentes.



## GENERALIDADES

---

Estrechamente relacionadas a éstas últimas, se tienen las rocas del mismo tipo y edad que se encuentran aflorando en el área de Chochal, Guatemala central; en los pozos Laguna Blanca-1 y Yalbac-1, del nororiente de Guatemala y Belice central respectivamente; así como en las Montañas Maya, igualmente en Belice (Fig. 5).

Otras localidades se tienen también en el norte de Belice, en donde el pozo Tower Hill-2 cortó un basamento constituido por rocas ígneas clasificadas como granitos, así como en los pozos Hill Bank-1 y Basil Jones-1, en donde se encontraron rocas metamórficas que se reportan como esquistos.

En los pozos Yucatán-1 y Quintana Roo-1, éstos ya en México, de la misma manera, se reporta la presencia de rocas metamórficas, definidas como esquistos en el primero (López, R. E., 1979; Woods, R. D. *et al.*, 1991) y rocas ígneas en el segundo, en este caso, una diorita con edades radiométricas de  $583 \pm 42$  Ma y de  $285 \pm 23$  Ma.

Se puede concluir de lo anteriormente descrito, que el basamento de esta porción del sureste mexicano se puede caracterizar como litológicamente heterogéneo, debido a los varios tipos de roca que se encuentran constituyéndolo.

Las tendencias de distribución espacial que pudieran seguir en la región cada una de estas litologías, con lo cual se pudiera inferir el tipo de basamento de la sección estudiada, desde un

punto de vista particular, resultan difíciles de establecer con seguridad, dado lo disperso de las localidades conocidas.

Pero de una manera general, se pueden delinear dos tendencias mayores: una de rocas ígneas y metamórficas (basamento ígneo-metamórfico), en el área hacia el nororiente y sur de la sección, y la otra de rocas sedimentarias (basamento sedimentario), en la zona hacia el oriente de la misma (Fig. 5).

El tiempo y la historia de conformación de este complejo mosaico de litologías que constituyen el basamento, no se detalla en el presente trabajo, por lo que sólo se le caracterizará como del Paleozoico Tardío con base en los datos mencionados, radiométricos en las rocas ígneas y metamórficas, y paleontológicos en las rocas sedimentarias.

Dentro de este marco de referencia, se considera que el carácter del basamento de la sección estudiada, bien pudiera ser de tipo ígneo-metamórfico, dado que se localiza dentro de la tendencia de distribución que para este tipo de rocas se delinea en la correlación de la Figura 5.

Aunque, no habría que descartar totalmente la probable ocurrencia de rocas sedimentarias, sobre todo tomando en cuenta la referencia de la presencia de reflectores sísmicos estratificados profundos, por debajo de la base de los sedimentos mesozoicos del pozo Cobo-301.



## GENERALIDADES

---

De una manera u otra, lo que sí se puede aseverar concluyentemente acerca de la naturaleza del basamento de la sección estudiada, es que es de carácter netamente continental.

### I.9.2. Cubierta Sedimentaria

La información litoestratigráfica aportada por los diferentes pozos presentes en la sección de estudio, incluye datos directos que refieren una secuencia sedimentaria eminentemente de carácter marino, cuyo rango de edad varía desde el Jurásico Tardío (Oxfordense) hasta el Reciente.

Más regionalmente, otros pozos e información sísmica, describen la base de la cubierta sedimentaria caracterizada por la presencia de sedimentos evaporíticos (típicamente sal), que se considera de probable edad Jurásico Medio (Viniestra O., F., 1981; Salvador, A., 1987, 1991 a y b); Meneses R., J. J., 1990; García M., G., 1994). Esto viene a ser apoyado por la característica manifestación de diapirismo en algunas porciones de la región.

De esta manera, litológicamente, una columna compuesta de la cubierta sedimentaria en el área que ocupa la sección estudiada, se puede referir conformada por cuatro unidades principales (Fig. 6), los cuales, del más antiguo al más joven son:

- (I) en la base, rocas de carácter salino a las que se les considera del Jurásico Medio,
- (II) una secuencia arcillo-calcárea Jurásico Superior,
- (III) un paquete de rocas eminentemente carbonatadas del Cretácico, las cuales hacia su porción alta (la parte Cretácico Superior) y en la porción noroeste de la sección, se encuentran influenciadas por la presencia de material terrígeno, y,
- (IV) una secuencia de tipo predominantemente terrígena del Cenozoico, en la que como característica importante, hacia la cima se describe un continuo incremento de la proporción de material arenoso.

En la región, cada uno de estas unidades principales, se ha subdividido en una o más partes, esto según características litológicas de más detalle, pero primordialmente, con base en los datos bioestratigráficos aportados por los diversos estudios que de este tipo se han realizado.

Por esta razón, dichas subdivisiones comúnmente son referidas, por el nombre de la serie o piso estratigráfico que representan. En la Figura 6 se muestran esquemáticamente las diferentes series que se consideran en la sección estudiada, así como los espesores máximo y mínimo con que aquí se presentan.

ERA	SISTEMA	SERIE	M a	LITOLOGIA SINTETICA	ESPEJOR (m)	UNIDAD	
C E N O Z O I C O	CUATERNARIO	RECIENTE	1.6		0-102	IV	
		PLEISTOCENO			0-2000		
	T E R C I A R I O	NEOGENO	PLIOCENO	5.3			250-1320
			MIOCENO		23.7		
		PALEOGENO	OLIGOCENO	36.6			160-600
	EOCENO		57.8				85-700
	PALEOCENO		66.4		0-400		
	M E S O Z O I C O	CRETACICO	SUPERIOR	91			0-440
MEDIO			113			200-1225	
INFERIOR			144		300-550		
JURASICO		SUPERIOR	163		1060 (P) ≈ 1100	II	
		MEDIO		183		≈ 1200	I

FIG.6 COLUMNA COMPUESTA DE LA CUBIERTA SEDIMENTARIA EN EL AREA DE LA SECCION ESTUDIADA.

## GENERALIDADES

---

Las rocas de la Serie Jurásico Superior, a menudo son referidas más pormenorizadamente como Oxfordiano, Kimmeridgiano y Tithoniano, asimismo, en algunas ocasiones las series Cretácico Superior y las del Cenozoico, se describen con nombres formacionales. Una descripción estratigráfica más detallada de todas estas series se realiza en el Capítulo II.

Lo que sí es conveniente señalar, es que en el área que nos ocupa, no se tienen datos o evidencias de la ocurrencia de rocas o sedimentos mesozoicos más antiguos que la sal. De hecho el pozo Villa Allende-1, que cortó la totalidad de la cubierta sedimentaria, después de las rocas evaporíticas, entró directamente al basamento.

Refiriéndose específicamente a las rocas de carácter continental y transicional, que se encuentran sobreyaciendo al basamento granítico de la Sierra de Chiapas, las Formaciones Todos Santos y San Ricardo, al parecer hacia el área de estudio, más que distribuirse debajo de la sal, cambian de facies lateralmente a ésta última.

### 1.9.3. Marco Tectónico Regional

El Área Mesozoica Chiapas-Tabasco, ha sido referida como un rasgo de segundo orden, dentro de una cuenca sedimentaria mayor

como lo es la Cuenca del Golfo de México (Ewing, T. E., 1991), en donde las características geológicas que la individualizan, aunque de acuerdo a las definidas regionalmente para el Golfo de México, son particularmente propias.

En cuanto al origen de esta región, se considera que forma parte, y que experimentó, de la evolución de la margen divergente sur de la Cuenca del Golfo de México, esto visto dentro de un contexto evolutivo relacionado con un modelo de apertura extensional tipo "rift"- "drift" de dirección sensiblemente NW-SE (Fig. 7), desarrollado a partir de la fragmentación de la Pangea durante el Mesozoico.

Esta es una interpretación que en la actualidad, en lo general, es comúnmente referida y de las más aceptadas por numerosos autores (Pindell, J. L., 1985; Salvador, A., 1987 y 1991; Winker y Buffler, 1988, Marton y Buffler, 1993; entre otros), aún cuando en lo particular, todavía se manifiestan algunas incertidumbres y diferencias de opinión, acerca de las edades de las etapas definidas y de la geometría cinemática de la extensión.

Dentro de este contexto, esta margen divergente sur, usualmente referida como Bloque Yucatán, se considera que se separa de la parte meridional de Norteamérica, mediante una primera fase de extensión cortical (etapa "rift"), la cual fue seguida por

## GENERALIDADES

---

una fase de dispersión de piso oceánico y subsidencia termal de las márgenes pasivas resultantes (etapa "drift").

Esto propició por un lado, la atenuación o adelgazamiento de la corteza continental involucrada en el proceso, constituyéndose así una corteza transicional hacia las márgenes continentales, en donde la evolución de la subsidencia parece ajustarse al modelo de estiramiento cortical de McKenzie, D. P. (1978), y por otro, la ocurrencia de corteza oceánica hacia el centro del Golfo.

Un esquema de distribución de los tipos de corteza resultantes de estos procesos para la región del Golfo de México (Fig. 7), refiere la presencia de tres tipos de corteza continental en función de sus espesores (Winker y Buffler, 1988; Buffler, R. T. *et al.*, 1993):

- Continental en sentido estricto, de 33 a 48 Km de espesor
- Transicional Gruesa, de 20 a 35 Km de espesor
- Transicional Delgada, de 6 a 20 Km de espesor

Específicamente, el área de estudio se ubica dentro de ésta última porción, la cual se marca como profundamente sepultada (Marton y Buffler, 1993).

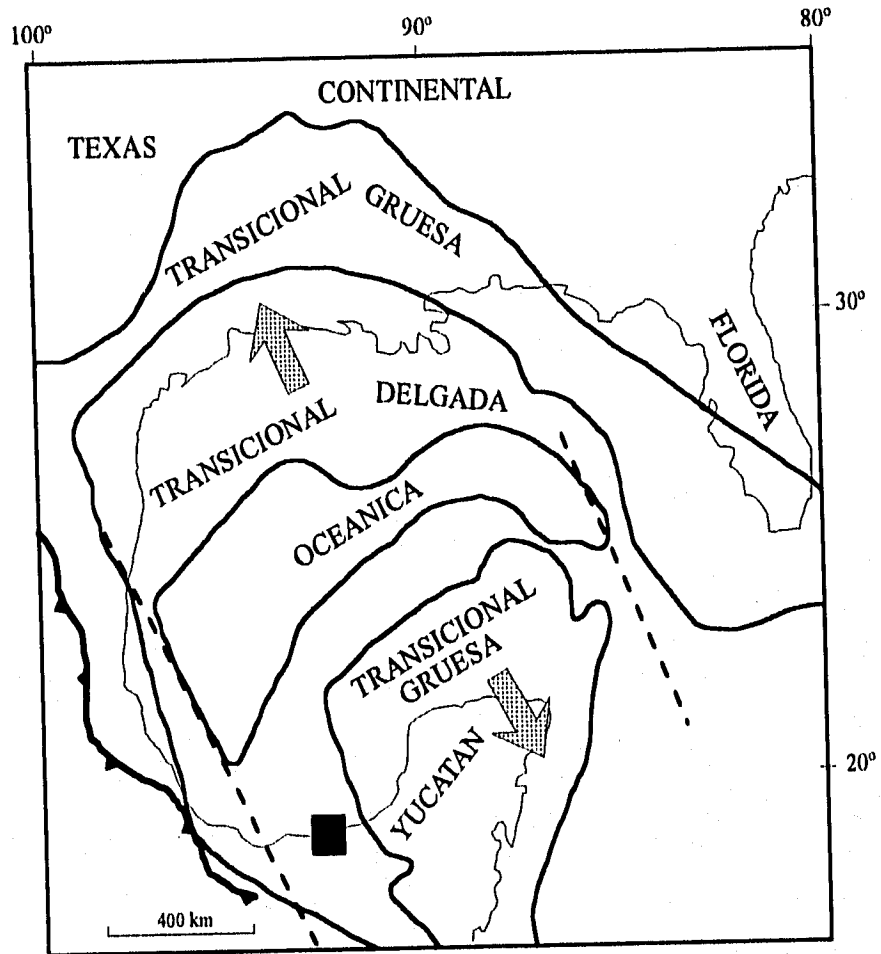
Existe un consenso generalizado de que, tomando como referencia los depósitos locales

de capas rojas que se encuentran en la región del Golfo, la etapa de fragmentación ("rift") se inició durante el Triásico Tardío, extendiéndose hasta la parte final, o poco después del depósito de la sal, esto es Calloviense Tardío-Oxfordense Temprano (Pindell, J. L., 1985; Salvador, A., 1991b) y hasta la parte terminal del Jurásico Tardío según Marton y Buffler (1993), que incluyen dentro de esta etapa los sedimentos clástico-carbonatados del Jurásico Superior.

La etapa de deriva y generación de piso oceánico (etapa "drift"), los primeros autores la restringen a un espacio de tiempo corto al inicio del Jurásico Tardío, mientras que los segundos, la marcan del Jurásico más Tardío al Cretácico más Temprano.

Algo que es conveniente tener en cuenta dentro de esta concepción, es que durante el proceso de apertura, la margen occidental del Bloque Yucatán se postula delimitada por el desarrollo de una zona transformante de componente lateral derecha, uno de los dos límites de transformación sensiblemente paralelos de dirección NNW-SSE que se relacionan con dicho proceso (Fig. 7).

El área de la sección estudiada, se encuentra ubicada hacia la porción occidental del Bloque Yucatán, ya cerca de esta margen oeste, por lo que durante la etapa extensional pudo haberse manifestado en ella, alguna actividad relacionada con este tipo de límite mayor, posiblemente bajo la forma de procesos de carácter transtensivo.



--- Zonas de Transformación Postuladas

➡ Dirección de Apertura

■ Área de Estudio

FIG. 7 ESQUEMA DE DISTRIBUCION DE LOS TIPOS DE CORTEZA EN EL AREA DEL GOLFO DE MEXICO (Mod. de Marton y Buffler, 1993)

## GENERALIDADES

---

Dentro de este marco evolutivo, se ha considerado que para la parte temprana del Cretácico Temprano, ya estaba completa, o fue cuando se completó la etapa de evolución distensiva de la Cuenca del Golfo de México, con lo que a partir de ese momento se marca el cese de la actividad tectónica en la región.

Con esto, se pasa a caracterizar como una zona estable o de relativa quietud tectónica, que vino a constituirse en una parte integral de la porción meridional de Norteamérica, en donde sólo se llevó a cabo el desarrollo de una intermitente subsidencia.

Para el tiempo Cretácico, regionalmente, la actividad tectónica se concentraba hacia las márgenes occidental y meridional de Norteamérica (Ross y Scotese, 1988). En la primera porción, siempre de carácter convergente, mientras que en la segunda, la cual estuvo relacionada a la evolución del Caribe, inicialmente fue de tipo divergente, hasta el Cretácico Medio, y después de índole transformante de componente lateral izquierda, hasta el Cretácico Tardío (Fig. 8).

Durante el Cretácico Tardío y Terciario Temprano no se refieren evidencias de alguna perturbación importante en la región, aún cuando durante este tiempo se caracteriza la ocurrencia de dos eventos mayores en áreas regionalmente adyacentes.

Uno en la totalidad de la parte este de México (al noroeste del área de la sección de estudio), en donde se desarrollaba la Orogenia

Laramide, un evento estrechamente relacionado a la convergencia pacífica, que se sobrepuso y modificó los rasgos y la configuración inicial de la margen occidental de la Cuenca del Golfo de México (Winker y Buffler, 1988; Salvador, A., 1991b).

El otro hacia el sur de la zona de la sección, en la margen meridional de Norteamérica, en donde se daba la activación del sistema transformante de tipo sinestral Motagua-Polichic, mediante el cual el Bloque Chortis comenzó a ser removido del sur de Norteamérica, desplazándose hacia el oriente (Fig. 8).

Esta fase de aparente quietud tectónica en la región de la sección estudiada, al parecer se prolongó hasta la Epoca Miocénica, cuando se hizo patente una etapa de deformación de carácter compresivo con rasgos de desplazamiento a rumbo, en la que, las secuencias mesozoicas y terciarias hasta entonces depositadas, fueron plegadas y falladas, conformando estructuras con una dirección preferencial NW-SE.

El paroxismo de este evento, se ha marcado acaecido en el Mioceno Temprano (Schoellkopf, N. B. *et al.*, 1994), y Mioceno Tardío (García M., G., 1994), y su origen se ha relacionado a la combinación de esfuerzos compresivos, producto de la influencia en la región de los procesos de la convergencia pacífica, dado el desplazamiento hacia el

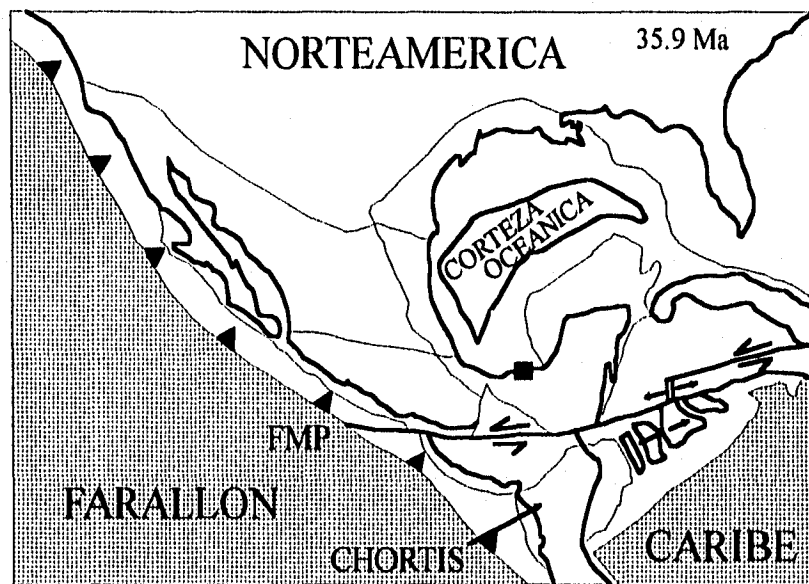
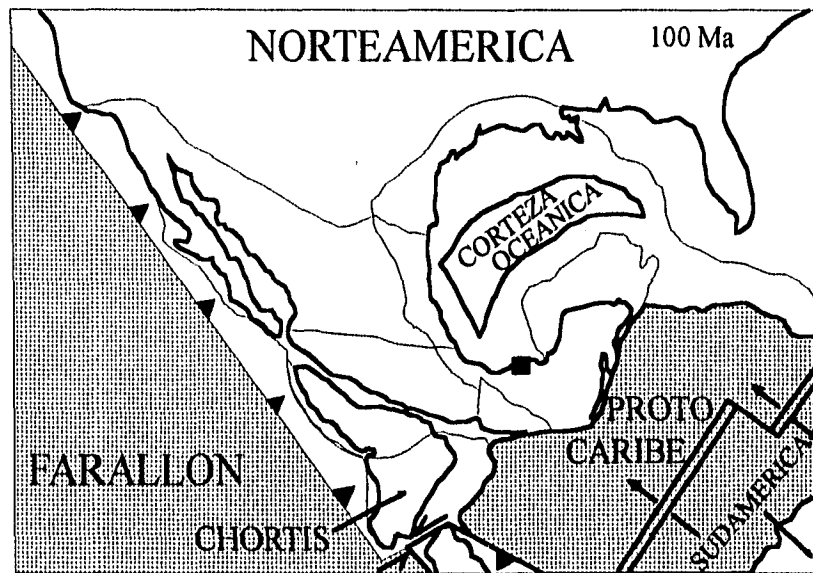
## GENERALIDADES

---

oriente sufrido por ésta con el movimiento en esa dirección del Bloque Chortis, así como de carácter transcurrente, relacionados con el límite de transformación.

La arquitectura actual que se visualiza de la estructuración NE-SW de las Cuencas del Sureste (Fig. 2), se sugiere que constituye la

respuesta a un evento de carácter distensivo más joven desarrollado en la región, el cual se caracteriza por la ocurrencia de grandes fallas de crecimiento sindepositacional, de posible edad Mioceno Tardío y Plio-Pleistoceno (García M., G., *op. cit.*).



■ Area de Estudio      FMP Falla Motagua-Polochic

FIG. 8 ESQUEMAS DE RECONSTRUCCION TECTONICA DEL SUR DE NORTEAMERICA PARA EL CRETACICO MEDIO (100 Ma) Y OLIGOCENO (35.9 Ma) (Mod. de Ross y Scotese, 1988)



## II. ANALISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION

En el presente capítulo, se integran los datos geológicos que caracterizan la sección de estudio, y se sintetiza el modelo conceptual de evolución bajo el cual se interpreta el desarrollo de la cubierta sedimentaria de ésta última, dentro de la cuenca en la que se encuentra.

En esta integración, se hacen resaltar los parámetros geológicos básicos que se utilizan, en la conformación del banco de datos que se maneja en la realización del modelado numérico de la subsidencia y la tectonicidad de la sección.

### II.1. COLUMNA GEOLOGICA

Como ya se mencionó, la columna geológica presente en la sección de estudio, está conformada por las diferentes unidades que conforman el basamento y la cubierta sedimentaria de la cuenca en la que se encuentra. Del primero no se cuenta con información de carácter directo en los pozos de control de la sección, por lo que se establecieron consideraciones regionales (ver

Marco Geológico), pero sí de la segunda, ya que casi fue perforada en su totalidad.

La información proporcionada por los trece pozos de referencia contenidos en la sección (Fig. 9), define la secuencia estratigráfica de la cubierta sedimentaria conformada por varias unidades, las cuales se manifiestan comprendidas dentro de un rango de edad que va desde el Jurásico Tardío hasta el Reciente.

De estas unidades, a aquellas del Mesozoico y Paleógeno, de manera común, denominadamente se les ha referido en función de su edad, mientras que a aquellas del Neógeno, se les ha individualizado en su mayoría mediante un nombre formacional específico, y se les había agrupado exclusivamente dentro del Mioceno.

Los correspondientes espesores de cada una de las unidades perforadas en cada uno de los trece pozos de control de la sección, se sintetizan en la Figura 9, en donde, se puede observar que no todos los pozos penetraron la columna completa de la cubierta sedimentaria. Esto debido a que, o no tuvieron la profundidad de perforación necesaria para alcanzar las series más antiguas, o bien, a que se manifiesta de manera local la ausencia de alguna de ellas por erosión o no depósito (?).

## ANALISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION

---

En sí, todas estas unidades conforman y son una evidencia directa, del carácter de la mayor parte de la secuencia de la cubierta sedimentaria que se tiene presente en la sección, la cual, en función de la información geológica y geofísica de áreas alcañas, así como de aquella que se aporta en la sección sísmica interpretada por García M., G. (1994), cuya representación esquemática se muestra en la Figura 10, se complementa en su parte basal con la presencia de una unidad sedimentaria más, la que en este estudio es referida denominadamente como Sal.

Esta unidad, considerada de edad Jurásico Medio, aunque no fue cortada por ninguno de los pozos tomados en cuenta en la sección, al parecer constituye la última serie hacia la base de la cubierta sedimentaria, antes de pasar al basamento de la cuenca.

Es conveniente mencionar aquí que, en recientes trabajos de carácter bioestratigráfico realizados en esta región del sureste de México, se han referido nuevos datos de este tipo (Salmerón U., P. *et al.*, 1991; Galloway, W. E. *et al.*, 1991; entre otros), los cuales han redundado en la consideración de nuevos rangos de edad para algunas de las unidades estratigráficas de la cubierta sedimentaria de esta zona. Sobre todo en lo que corresponde a aquellas formaciones del Neógeno que se consideraban dentro del Mioceno y a las que ahora se les marca comprendidas dentro del Mioceno, Plioceno y Pleistoceno (Fig. 11).

En función de lo anteriormente mencionado, la columna estratigráfica que se considera presente a lo largo de la sección, la cual constituye el marco de referencia para la realización del modelado de la subsidencia y la termicidad de esta última, en el presente trabajo se caracteriza conformada por trece unidades o series cronoestratigráficas.

Estas series han sido individualizadas y denominadas en función de la edad de cada una de ellas, para lo que se tomó en cuenta inclusive los datos cronoestratigráficos más recientes, como a continuación se refieren:

Reciente  
Pleistoceno  
Plioceno  
Mioceno  
Oligoceno  
Eoceno  
Paleoceno  
Cretácico Superior  
Cretácico Medio  
Cretácico Inferior  
Jurásico Superior  
Sal  
Basamento

El marco geocronológico de referencia que se emplea en el presente trabajo para definir los límites de tiempo de cada una de estas distintas series, es la escala de tiempo presentada por la Geological Society of America en 1983 (ver Fig. 6).

ERA	SISTEMA	SERIE	POZO-1	POZO-2	POZO-3	POZO-4	POZO-5	POZO-6	POZO-7	POZO-8	POZO-9	POZO-10	POZO-11	POZO-12	POZO-13	
CENOZOICO	CUATERNARIO	RECIENTE			REC 13					REC 7	REC 10	REC 7	REC 30	REC 12	REC 102	
		PLEISTOCENO														ZAR 734
		PLIOCENO														ECJ 701
	TERCIARIO	NEOGENO	MIOCENO													
				P.S. 365	P.S. 292	P.S. 346							P.S. 2012	P.S. 318	P.S. 1538	
				FIL 120	FIL 330	FIL 480	P.S. 1974						FIL 407	FIL 262	FIL 530	A.I. 360
		C.I. 250	C.S. 164	C.S. 615							C.S. 228	C.S. 270	C.S. 460			
		M.J. 2685	C.I. 96	ENC 100	ENC 912	DEP 528	P.S. 2242	P.S. 3050	P.S. 4254	P.S. 4677	C.I. 685	C.I. 115	C.I. 120			
			ENC 167	ENC 100	ENC 320						ENC 840	ENC 100	DEP 236			
		M.J. 2965	M.J. 2105*	DEP 862							DEP 1170*				DEP 619*	
	PALEOGENO	OLIGOCENO	OLI 365	OLI 383		OLI 360	OLI 492	OLI 158						OLI 643*	OLI 412	OLI 286
		EOCENO	EOC 160	EOC 235		EOC 340	EOC 375	EOC 714	EOC 240	EOC 363	EOC 85				EOC 142	EOC 1723
		PALEOCENO	PAL 163	PAL 35		PAL 157			PAL 386	PAL 412	PAL 184	PAL 340			PAL 310	
MESOZOICO	CRETACICO	SUPERIOR	KS 242	KS 240				MEN 110	MEN 197	MEN 107				S.F. 40		
					KS 3			S.F. 188	S.F. 134	S.F. 131	KS 165			A.N. 115		
								A.N. 32	A.N. 111	A.N. 160						
	MEDIO	KM 1225	KM 180*		KM 165*	KM 769	KM 200	KM 54	KM 350	KM 61*				KM 63		
	INFERIOR	KI 180*				KI 506*	KI 510	KI 525	KI 264*							
JURASICO	SUPERIOR						TIT 460							TIT 257		
							KIM 170	JS 452*						KIM 364*		
							OXF 430*									

LEYENDA

- REC Reciente
- ZAR Zargazal
- ECJ Encajonado
- A.S. Amate Superior
- A.I. Amate Inferior
- P.S. Paraje Solo
- FIL Filisola
- C.S. Concepción Superior
- C.I. Concepción Inferior
- ENC Encanto
- DEP Depósito
- M.I. Mioceno Inferior
- OLI Oligoceno
- EOC Eoceno
- PAL Paleoceno
- K.S. Cretácico Superior
- MEN Méndez
- S.F. San Felipe
- A.N. Agua Nueva
- K.M. Cretácico Medio
- K.I. Cretácico Inferior
- J.S. Jurásico Superior
- TIT Tithoniano
- KIM Kimmeridgiano
- OXF Oxfordiano




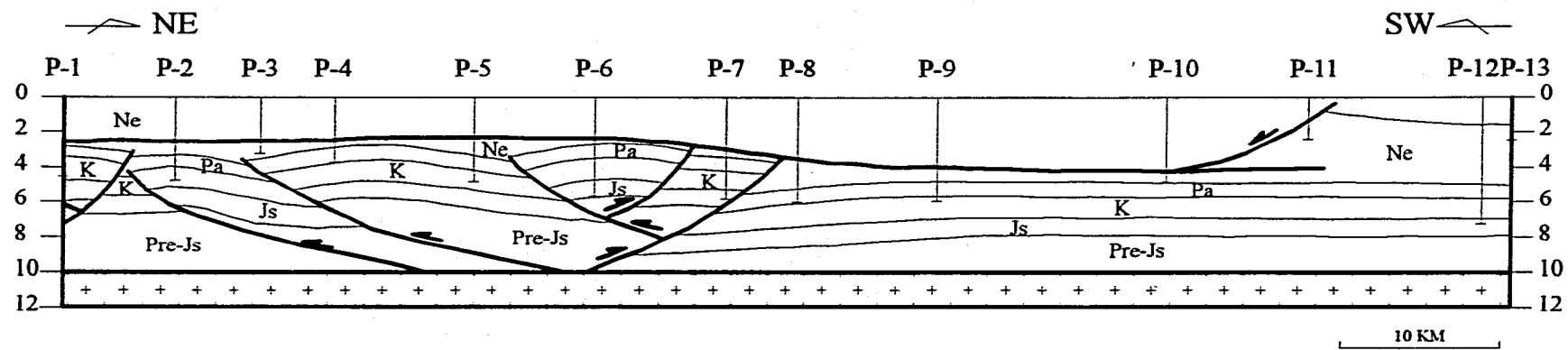
-  Erosión o No Depósito
-  No Perforado
-  Falla
- 20 Espesor
- 20\* Espesor Alcanzado

FIG. 9 TABLA DE CORRELACION ESTRATIGRAFICA DE LAS COLUMNAS DE LOS POZOS DE CONTROL A LO LARGO DE LA SECCION.



#### LEYENDA

	Pozos de Referencia	Ne	Neógeno	Js	Jurásico Superior
//	Falla de Crecimiento	Pa	Paleógeno	Pre-Js	Pre-Jurásico Superior
//	Falla Inversa	K	Cretácico	+++	Basamento

FIG. 10 SECCION ESQUEMATICA DE LA INTERPRETACION EN PROFUNDIDAD DE LA SECCION SISMICA DE GARCIA, M. G. (1994).

## ANALISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION

FORMACION	EDAD ANTERIOR		EDAD ACTUAL
PARAJE SOLO	M I O C E N O	SUPERIOR	PLEISTOCENO
FILISOLA			PLIOCENO
CONCEPCION SUPERIOR			
CONCEPCION INFERIOR			
ENCANTO		MEDIO	MIOCENO
DEPOSITO		INFERIOR	

FIG. 11. TABLA COMPARATIVA DE LAS EDADES ANTERIORES Y ACTUALES DE LAS FORMACIONES DEL MIOCENO-PLEISTOCENO DEL SURESTE DE MEXICO

### II.2. MARCO ESTRUCTURAL

El comportamiento estructural presente a lo largo de la sección de estudio, considerado a partir de la interpretación de la sección sísmica de García M., G. (1994) (ver Fig. 10), se bosqueja caracterizado por rasgos de deformación tanto de carácter compresivo (pliegues y fallas inversas), como de carácter extensivo (fallas de crecimiento).

Los primeros se manifiestan afectando predominantemente las series mesozoicas y paleógenas, así como también la parte inferior de las neógenas, mientras que los segundos, se tienen presentes prácticamente sólo dentro de estas últimas series. Estos rasgos deformacionales, se delinear a lo largo de la

sección afectando exclusivamente a las rocas de la cubierta sedimentaria.

En relación a las estructuras compresivas, hacia la porción suroccidental de la sección, éstas se definen asociadas a un nivel de despegue regional desarrollado hacia el contacto de las unidades Sal - Basamento (Pre-Js - Bas en Fig. 10). Su presencia se restringe exclusivamente a dicha porción suroccidental de la sección. En la porción nororiental, característicamente, no se manifiestan estas estructuras.

Los rasgos deformacionales de carácter extensivo, aunque de hecho dentro de la sección prácticamente se bosqueja un solo rasgo, se marcan distribuido a casi todo lo largo de esta última, exclusivamente dentro de la secuencia neógena.

## ANÁLISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION

---

La presencia de ambos tipos de rasgos deformativos en la sección, son indicativos de la ocurrencia de desplazamientos horizontales de la columna sedimentaria. Los rasgos de tipo compresional, caracterizan un acortamiento, sobre todo en la porción suroccidental de la sección, y el extensional, una distensión o estiramiento.

### II.3. SECCION MODELADA

Para los efectos del presente estudio de la subsidencia y la tectonicidad de la sección, se considera que la disposición relativa actual que guardan entre sí las localidades de cada uno de los trece pozos de control, se ha mantenido sin variación después de los eventos deformativos, que aún cuando hayan experimentado acercamientos y/o alejamientos relativos, ninguna de ellas llegó a sobrepasar lateralmente a la localidad inmediatamente adyacente, con lo que el comportamiento estructural de la sección, puede simplificarse a la geometría resultante de una correlación lateral de las distintas columnas estratigráficas.

Esto redundará en una sección de tipo estratigráfico, en la que los desplazamientos horizontales que hayan experimentado las localidades de control consideradas en la sección, no han sido tomados en cuenta.

Dado que para la realización del modelado unidimensional, como se explica con mayor detalle en el siguiente capítulo, se recomienda considerar a la cima del basamento de la cuenca como el nivel estratigráfico respecto al cual se refiera la cuantificación del comportamiento y desarrollo de la cuenca a través del tiempo, en el presente trabajo, este nivel de referencia de la cima del basamento, se considera representado por la base de la unidad Sal.

Por otro lado, debido a que ninguno de los pozos de control de la sección alcanzó directamente dicho nivel de referencia, de hecho cada uno de ellos terminó en una distinta serie estratigráfica de la cubierta sedimentaria (Fig. 9), la ubicación y distribución espacial de este nivel de referencia a lo largo de la sección, se define por la extrapolación lateral a cada una de las columnas de los pozos, de las características y espesores de las series estratigráficas faltantes hasta la cima del basamento.

Esta extrapolación se llevó a cabo, auxiliándose de la información que se encuentra contenida en las interpretaciones paleogeográficas y de litofacies que se han realizado de la región ( PEMEX, 1985; Salvador, A., 1991; McFarlan Jr. y Menes, 1991; Shol, N. F. *et al.*, 1991; Galloway, W. E. *et al.*, 1991; Williams R., C. T., 1995, entre otros), así como del comportamiento lateral de las series bosquejadas en la sección estructural de García M., G. (1994) (Fig. 10).

## ANALISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION

---

Como resultado de lo anterior, el marco de distribución estratigráfica tomado en cuenta para la sección de estudio, se muestra sintetizado en la tabla de correlación de la Figura 12 por medio de los espesores con que se considera se manifiestan en cada uno de los trece pozos de control las diferentes series de la cubierta sedimentaria. La representación diagramática de la correlación lateral de las columnas de estos pozos (Fig. 13), constituye la sección estratigráfica que se modela en el presente trabajo.

En dicha sección estratigráfica se puede observar que, la ubicación del nivel estratigráfico de referencia del modelado, la cima del basamento, se encuentra espacialmente más elevado que en la interpretación de la sección sísmica de García M., G. (1994), sobre todo hacia la porción suroccidental, en donde el espesor estratigráfico mínimo probable que se le considera a la serie basal de la cubierta sedimentaria, la Sal, es notablemente menor que el espesor que se bosqueja por deformación. Hacia la porción nororiental su ubicación es sólo ligeramente más elevada en la primera que en la segunda.

Aún cuando en el modelado de la subsidencia y la termicidad de la sección de estudio no se atienden cuantitativamente los desplazamientos horizontales que pudieron haber ocurrido dentro de ella, no se pierde de vista la influencia que estos movimientos pudieron tener, ya que al analizar con una mayor atención la correspondiente evolución vertical de cada una de las columnas de control, la

ocurrencia de aquéllos puede llegar a ser reconocida.

### II.4. DESCRIPCION DE LAS UNIDADES Y SERIES ESTRATIGRAFICAS

A continuación se presenta una explicación de manera más detallada, acerca de la integración del marco de distribución estratigráfica tomado en cuenta para la sección de estudio. Esto se acompaña de una descripción más particularizada de las principales características de cada una de las series aquí consideradas, lo cual se expone siguiendo un orden estratigráfico ascendente, en donde también se resume el modelo de evolución sedimentaria que se bosqueja para la cubierta de la sección, el cual ha sido tomado en cuenta en el desarrollo de este estudio.

#### II.4.1. Basamento

Las rocas que se encuentran constituyendo esta serie basal de la sección, como ya se describió y analizó más detalladamente en el capítulo anterior, son de carácter ígneo-metamórfico y se les ha asignado al Paleozoico Tardío.

## ANÁLISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION

---

Su espesor estratigráfico no se conoce por lo que su base no es referida en la sección, pero sí su cima que, en función de estar sobreyacida por una columna sedimentaria normal, se define posicionada a diferentes profundidades (Fig. 13), confiriéndole una geometría irregular a la distribución que esta serie guarda a lo largo de la sección. De una manera general, se puede caracterizar conformando una serie de bloques diferencialmente más elevados o hundidos.

Esta geometría irregular está definida para el tiempo actual, pero para los inicios de la evolución de la cuenca, se le considera una disposición de carácter sensiblemente horizontal plana y bajo condiciones subaéreas, lo que se caracteriza con una paleobatimetría de 0 m.

### II.4.2. Sal

Esta unidad, como ya se ha mencionado anteriormente, aún cuando dentro de la sección no se cuenta con evidencias directas de su presencia debido a que no fue cortada por ninguno de los pozos de referencia, se ha establecido presente en razón de que en el área de la sección, se cuentan con numerosas manifestaciones que apoyan su presencia hacia la base de la columna sedimentaria de la región (ver Viniegra O., F., 1981; Salvador, A., 1987, 1991 (a); Meneses R., J. J., 1990; García M., G., 1994; entre otros).

Estas evidencias son tanto de tipo directo en otros pozos, como en el caso del Pozo Villa Allende-1, así como de tipo indirecto en información sísmica. La común referencia de actividad halocinética en esta región, ya que esta serie se describe conformada por rocas de carácter evaporítico, básicamente sal, constituye también un importante apoyo de su ocurrencia hacia la base de la cubierta sedimentaria.

El carácter litológico de esta unidad en la sección, se define por correlación con el que se ha descrito en afloramientos y pozos cercanos. Este se caracteriza fundamentalmente conformado por halita, con un bajo contenido de residuos insolubles, principalmente arcilla.

El espesor actual de esta secuencia de rocas es un rasgo bastante variable en la región de la sección, dada la característica plasticidad de este tipo de materiales, lo que los hace por naturaleza tener un comportamiento bastante móvil, que viene a repercutir en una inconsistencia de espesor a lo largo de su área de distribución.

Reportes de estas rocas hacia el sur del área les señalan espesores ligeramente menores a los 1 000 m, pero siendo de carácter incompleto ya que no se les tiene controlada su base; por otro lado en el pozo Villa Allende-1 se cortó un espesor total de 1380 m (Meneses R., J. J., 1990), mientras que en la sección de García M., G. (1994) se puede observar un espesor interpretado mínimo de alrededor de 1 000 m hacia la zona menos deformada (Fig. 10).



ERA	SISTEMA	Ma	POZO-1	POZO-2	POZO-3	POZO-4	POZO-5	POZO-6	POZO-7	POZO-8	POZO-9	POZO-10	POZO-11	POZO-12	POZO-13	
MESOZOICO	CUATERNARIO	0.01			13					7	10	7	30	12	102	
					RECIENTE					R E C I E N T E						
			365	292	346	596*	151*	206*	309*	222*	2012	318	1538	734		
			P L E I S T O C E N O													
	1.6	250	380	945	480	1378*	350*	476*	716*	746*	1320	647	1110	831		
		P L I O C E N O														
	5.3	2685	3132	*2300*	1774	528	1741*	2368*	3229*	3709*	*1500*	840	336	*1000*		
		M I O C E N O														
	23.7	365	383	*370*	360	492	158	300*	450*	588	*650*	*700*	F554/286	*450*		
		O L I G O C E N O														
	36.6	160	235	*290*	340	375	714	240	363	85	*600*	*1100*	1723	*1723*		
		E O C E N O														
	57.8	163	35	*100*	157		386	412	184	340	*330*	*320*	310	*300*		
		P A L E O C E N O														
	66.4	242	240	*200*	247	50*	330	442	398	165	*160*	*160*	155	*155*		
		C R E T A C I C O S U P E R I O R														
	91	1225	*1100*	*1000*	*900*	769	200	54	350	*250*	*200*	*150*	63	*63*		
		C R E T A C I C O M E D I O														
	113	*500*	*500*	*500*	*500*	*510*	510	525	*500*	*450*	*400*	*350*	300*	300*		
		C R E T A C I C O I N F E R I O R														
144							1	1	0	0						
	J U R A S I C O S U P E R I O R															
163							1	2	0	0						
	S A L															
183																
PALEOZOICO	B A S A M E N T O															

### LEYENDA

- ESPESOR PROPORCIONAL
- \*\* ESPESOR POR CORRELACION
- F FALLA
-  EROSION
-  NO DEPOSITO

FIG. 12. MARCO ESTRATIGRAFICO Y SUS VARIACIONES LATERALES DE ESPESOR A LO LARGO DE LA SECCION ESTUDIADA EN FUNCION DE LOS POZOS DE REFERENCIA

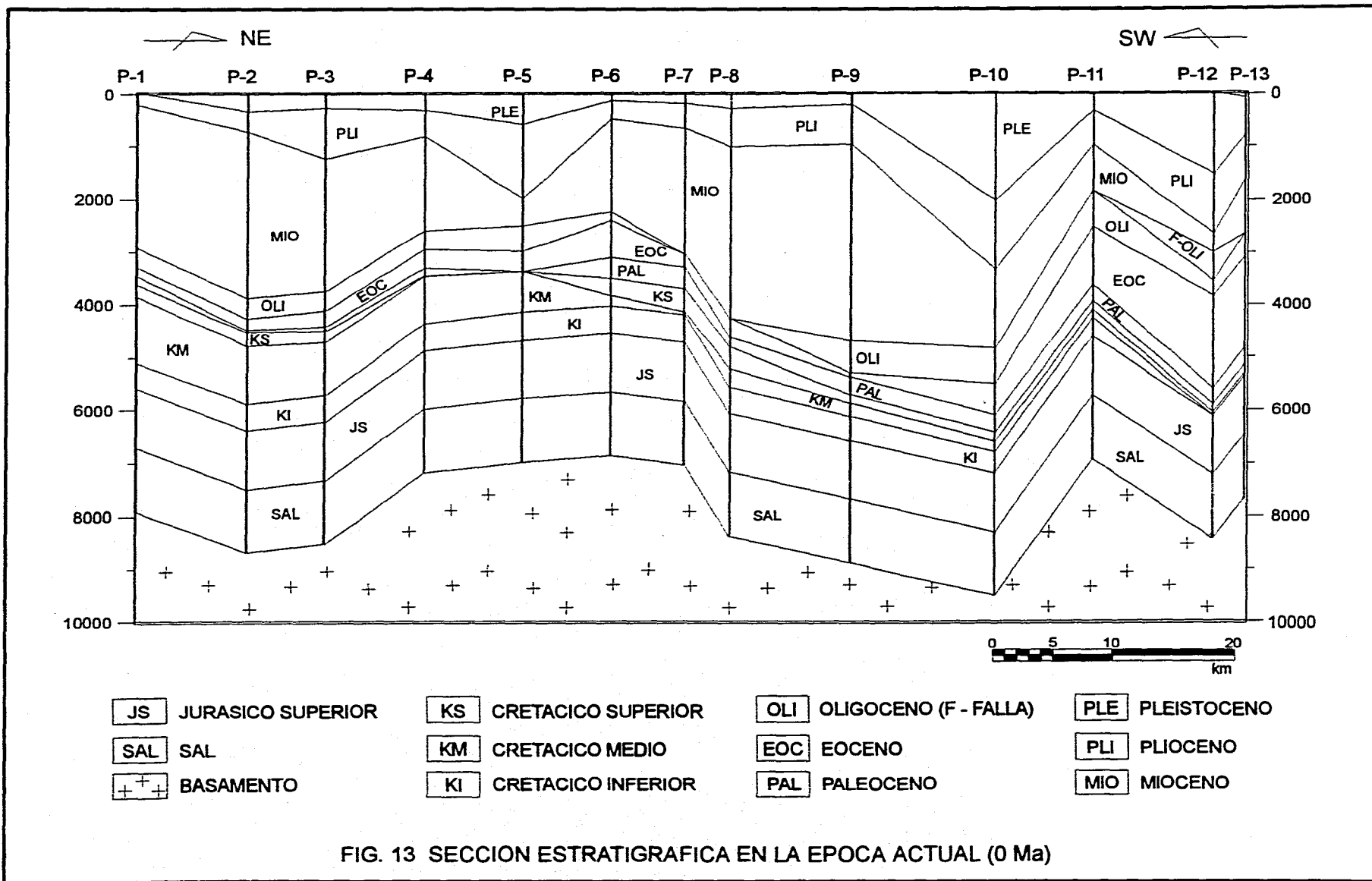


FIG. 13 SECCION ESTRATIGRAFICA EN LA EPOCA ACTUAL (0 Ma)

## ANÁLISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION

---

La edad de las rocas de esta unidad, no ha podido ser establecida de manera totalmente concluyente, debido a que en la región no se les han encontrado evidencias directas de ningún tipo de registro fósil que ayudase a determinar el tiempo específico de su depósito. Sin embargo, también, es de aceptación general en la región de la sección de estudio, que estas rocas salinas se distribuyen estratigráficamente de manera normal debajo de sedimentos bien ubicados como oxfordianos, por lo que una edad por posición estratigráfica de Jurásico Medio les ha sido comúnmente asignada, restringiéndola algunos autores sólo al Calloviano.

Se ha sugerido que las rocas de esta serie se formaron en aguas someras hipersalinas de amplia distribución horizontal, con bajos e intermitentes influjos de aguas marinas y aún de aguas dulces de ríos, en donde predominaron ampliamente los procesos de evaporación, en un ambiente de laguna evaporítica desarrollada bajo un clima extremadamente árido. Desde el punto de vista batimétrico, es probable que las profundidades máximas relacionadas a este depósito no debieron exceder de los 5 m..

Con base en lo anteriormente expresado, en la realización del modelado de la subsidencia y la tectonicidad de la sección en el presente trabajo, a esta unidad se le considera distribuida a todo lo largo de la sección, en función de la amplia distribución regional que se le refiere en la zona, bajo las siguientes características:

1.- Proporcionalmente constituida por un 95 % de sal (halita) y un 5 % de arcilla.

2.- Con un espesor mínimo estimado de 1 200 m, el cual se maneja con un comportamiento lateralmente constante (Figs. 12 y 13).

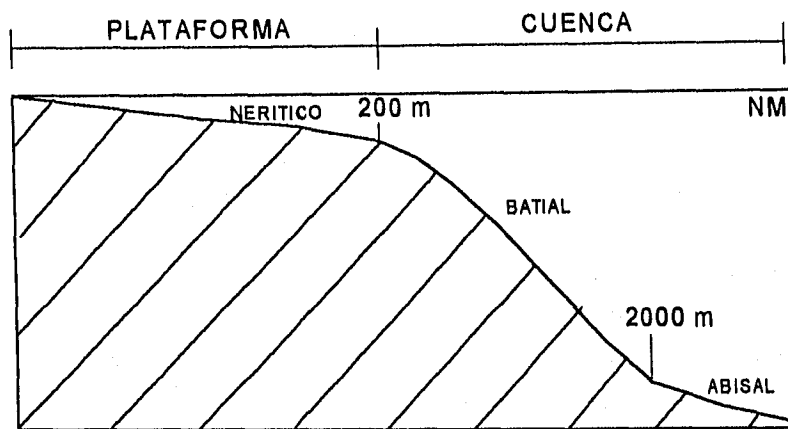
3.- En cuanto a su edad, se toma en consideración el rango más amplio que se le ha referido, esto es, Jurásico Medio, lo cual involucra un intervalo de tiempo entre los 183 y 163 Ma (Fig. 12), según la escala de tiempo de la Geological Society of America (1983), lo cual les representa un período de 20 Ma.

4.- Por lo que se refiere a la profundidad de su depósito, desde un punto de vista práctico se le asigna un valor de 0 m como parámetro paleobatimétrico.

Es conveniente mencionar aquí que, los parámetros cuantitativos descriptivos de las condiciones paleobatimétricas prevalecientes durante el desarrollo de los depósitos que conforman la columna de la cubierta sedimentaria de la sección, dado los pocos análisis realizados al respecto, son estimados a partir de las condiciones ambientales con que se caracterizan cada una de las diferentes unidades y series estratigráficas presentes.

A menudo, dichas condiciones ambientales son bastante generales, ya que se refieren como plataforma y cuenca, las cuales implican rangos paleobatimétricos muy amplios, entre 0 y 200 m en la primera y entre 200 y más de 2000 m en la segunda, como se puede observar en el siguiente esquema:

## ANÁLISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION



La plataforma, que equivale a la zona nerítica, se subdivide en tres zonas: la interna, que se marca hasta una profundidad de 20 m, la media hasta los 100 m y, la externa hasta los 200 m. En la cuenca se incluyen las zonas batial y abisal, la primera con dos subzonas: la superior hasta los 500 m y la inferior hasta los 2000 m; la segunda se relaciona a profundidades que exceden este último valor. En el presente trabajo, para la estimación de los parámetros paleobatimétricos se consideran los valores mínimos de los rangos de estas condiciones ambientales, y se toma en cuenta también, la secuencia de evolución sedimentaria referida para la región.

### II.4.3. Serie Jurásico Superior (JS)

La presencia de esta serie sedimentaria hacia la porción inferior de la sección de estudio, está evidenciada directamente en tres de los pozos de control aquí considerados en los que

fue parcialmente atravesada, el 6, 7 y 12 (Fig. 9). Los dos primeros se encuentran ubicados hacia la porción central de la sección, mientras que el último hacia el extremo nororiental de la misma (Figs. 10 y 13).

Hacia la porción suroccidental de la sección no se cuenta con evidencias directas de la distribución de esta serie, pero su presencia, también en este sector, se marca a partir de su configuración dentro de la sección sísmica de apoyo aquí utilizada (Fig. 10), así como de su manifestación en afloramientos localizados ligeramente hacia el sur del área de la sección.

Las rocas de esta serie, en la zona de la sección, en algunas ocasiones se describen y se manejan separadamente como tres series individuales, cada una de las cuales han sido referidas en función del piso geológico que representan, esto es, como series cronoestratigráficas, que son Oxfordiano, Kimmeridgiano y Tithoniano. Pero de igual manera, a menudo en algunos reportes no se

## ANÁLISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION

---

llega a referir dicha diferenciación, citándoseles por tanto de manera conjunta con el nombre de la serie que representan, esto es, como Jurásico Superior, acepción que en el presente trabajo también es tomada en consideración, debido a que se tienen algunas dificultades para manejarlas siempre como series individuales (pozos 6 y 7 de Fig. 9).

Litológicamente la secuencia de rocas que caracteriza a esta serie en el área de la sección de estudio, de una manera general se puede describir conformada en la porción basal por "mudstone" y "wackestone" con algunas dolomías, dolomías arenosas y areniscas, así como el desarrollo de algunos bandeamientos arcillosos. Hacia la parte media por "mudstone" arcillo-limoso con algunas dolomías e intercalaciones de anhidrita y, en la porción superior, por un predominio de dolomías microcristalinas de color café oscuro a negro y "mudstone" arcilloso con algunas dolomías arcillosas.

En las dos primeras porciones de la secuencia, y sobre todo en la segunda, distintivamente se reporta la ocurrencia de restos de equinodermos, ostrácodos, moluscos y algunos foraminíferos bentónicos, los cuales, en las porciones dolomitizadas, llegan a aparecer como fantasmas. Por otro lado, hacia la porción superior se define una marcada ausencia de los restos de moluscos y ostrácodos, y un evidente predominio de calpionélidos y tintínidos.

Estas tres litofacies con que en sentido vertical se describe a esta serie, se han definido

ampliamente distribuidas en el área de la sección; de hecho, en planos de repartición de litofacies y paleogeográficos que para el Jurásico Tardío se han elaborado (PEMEX, 1985; Salvador, A., 1991), se marcan caracterizando homogéneamente la totalidad de la región, lo cual permite considerar dicha constitución litológica tripartita de la serie, como un rasgo lateralmente continuo a lo largo de la sección.

La base de esta serie no fue alcanzada por ninguno de los pozos de control de la sección, por lo que ni su actual espesor, ni las variaciones laterales que éste pudiera manifestar dentro de la sección son bien conocidas, sobre todo en lo que respecta hacia las porciones de ésta en donde no se tienen evidencias directas de su presencia.

El máximo espesor detectado se tiene en el Pozo 6 en donde se encontraron 1 060 m, mientras que en los pozos 7 y 12 se llegaron a cortar 452 m y 621 m respectivamente (Fig. 9). En la distribución que se le marca dentro de la sección sísmica de apoyo (Fig. 10), se le define con un espesor de poco más de 1 000 m, al cual lateralmente se le manifiesta un comportamiento sensiblemente constante.

El nombre con que se alude a esta serie refiere su edad, caracterizada en la región de la sección en función del contenido fosilífero índice que llega a presentar. PEMEX (1985) y Salvador, A. (1991) refieren la presencia de varios grupos de microfósiles entre los que destacan foraminíferos, equinodermos, tintínidos y calpionélidos, los cuales en algunas

## ANÁLISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION

---

localidades inclusive han permitido diferenciar los pisos Oxfordiano, Kimmeridgiano y Tithoniano (pozos 6 y 12, Fig. 9).

La constitución litológica y el contenido faunístico de esta serie, en lo que corresponde a sus porciones inferior y media (Oxfordiano-Kimmeridgiano), se ha sugerido que se originaron bajo condiciones de depósito relacionadas con medios ambientes marinos abiertos poco profundos, planicies de mareas y lagunares, mientras que las de su parte superior, se refieren asociadas a condiciones de mar abierto y cuenca, las cuales Winker y Buffler (1988) señalan que no debieron implicar aguas muy profundas.

Para efectos del modelado de la sección, tomando en cuenta las características que de esta serie han sido mencionadas en los párrafos precedentes, de una manera general, a ésta última se le describe:

1.- Proporcionalmente constituida por 58 % de caliza, 32 % de lutita y 10 % de arenisca.

2.- Con un espesor mínimo de 100 m, dado que con esta cantidad se cubre perfectamente el espesor perforado en el Pozo 6, el cual debido a que no se conocen consistentemente las variaciones laterales con que pudiera presentarse a lo largo de la sección, se le considera en ésta con un comportamiento lateralmente constante (Figs. 12 y 13).

3.- La edad que se le ha asignado a la serie implica que su depósito se llevó a cabo dentro de un intervalo de tiempo comprendido entre

los 163 y 144 Ma (Fig. 12), lo que le significa un período de 19 Ma de duración.

4.- Las paleopropiedades de los depósitos de la serie Jurásico Superior, se considera que pudieron variar entre 5 y 20 m los oxfordianos y kimmeridgianos, y de 50 a 200 m los tithonianos, por lo que, para el modelado de la sección se toma en consideración una profundidad de 20 m para los primeros y de 100 m para los segundos.

### II.4.4. Serie Cretácico Inferior (KI)

En la región de la sección de estudio, a las rocas de esta serie se les describe como ampliamente distribuidas ya que, por un lado, han sido perforadas por numerosos pozos en el área de la planicie y, por otro, hacia el sur de esta área, ya en la región de la sierra, se les encuentra aflorando extensamente.

Su presencia dentro de la sección, se tiene corroborada de manera directa por medio de varios de los pozos de control aquí considerados en los que llegó a ser atravesada, algunas veces parcialmente y en otras totalmente (Fig. 9). También, de manera indirecta, fue detectada por medio de información sísmica, aún cuando en la sección sísmica de apoyo aquí utilizada (Fig. 10), dada su generalización, no se muestra individualizada del resto de las rocas cretácicas.

## ANÁLISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION

---

Esta serie fue alcanzada en el Pozo 1 y consecutivamente en los pozos 5 al 8. En el Pozo 12, característicamente, aún cuando se llegaron a perforar rocas más antiguas, no se reportó su ocurrencia (Figs. 9 y 10). La composición litológica con que se le caracteriza, es variable a lo largo de la sección, pero se le puede enmarcar en dos dominios principales, uno en la porción suroccidental y otro en la parte nororiental.

En la región suroccidental, el área comprendida entre los Pozos 1 y 5, hacia la zona del primero de éstos, se tiene la presencia de dolomías microcristalinas con relictos de bioclastos e intraclastos y, hacia el segundo, de calizas que varían de "mudstone" a "packstone" de intraclastos y bioclastos; en ambos casos los bioclastos son predominantemente fragmentos de moluscos, ostrácodos, algas, equinodermos y foraminíferos bentónicos (Varela, S. M., 1995). En el Pozo 5 también se llegan a presentar algunos "grainstone" con bioclastos de fragmentos de corales y rudistas.

En la porción nororiental, por su lado, del Pozo 6 hasta el final de la sección, se caracteriza por un "mudstone" arcilloso dolomitizado y dolomías microcristalinas arcillosas con nódulos de pedernal y radiolarios.

Sólo en dos de los pozos de control se cortó de manera completa esta serie, esto es en el Pozo 6, en donde se perforaron 510 m, y en el Pozo 7, que encontró 525 m. Espesores incompletos se tuvieron en los Pozos 1, 5 y 8, en los cuales

se alcanzaron 180, 506 y 264 m respectivamente (Fig. 9). Por otro lado PEMEX (1985), reporta que regionalmente este espesor varía de 500 m en la parte sur del área de la sección, hasta alrededor de 200 m en la parte norte, sugiriéndole por tanto un promedio de 300 m.

La serie, en su nombre, manifiesta su edad, la cual ha sido establecida con base en el contenido fosilífero determinístico que presenta, el cual se conforma, principalmente, de algunas especies de foraminíferos planctónicos y bentónicos, calpionélidos, nanocónidos y tintínidos.

Las rocas que constituyen esta serie se considera que se formaron dentro de varios ambientes depositacionales, que de una manera general, se conjuntan en dos ambientes sedimentarios mayores según las litofacies descritas, uno de plataforma y otro de cuenca, ambos bien delimitados dentro de la sección de estudio (Fig. 14a).

Litológicamente y dado el contenido faunístico exhibido por estas rocas en la sección, la plataforma se manifiesta definida en ésta desde su inicio en su parte suroccidental, hasta el Pozo 5 (Fig. 14a), la cual se ha referido caracterizada de SW a NE, por el desarrollo de ambientes de supramarea, de plataforma interna y de frente o borde de plataforma. Esta porción de plataforma de la sección, constituye sólo una parte del extremo noreste de la denominada Plataforma Artesa-Mundo Nuevo (Williams R., C. T., 1995; Varela S., M., 1995).

## ANÁLISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION

---

Las litofacies encontradas en el Pozo 6 se relacionan con un ambiente de cuenca y, tomando en consideración la distribución regional que para este ambiente se ha bosquejado en los planos de distribución de litofacies del Cretácico Inferior de PEMEX (1985), en la sección se marca desarrollado desde dicho Pozo 6, hasta la finalización de ésta en su parte nororiental (Fig. 14a).

Con base en lo anteriormente mencionado, para el modelado de la sección se tienen las siguientes consideraciones:

1.- La composición porcentual de esta serie, en función de su litología, se considera conformada por 75 % de caliza, 10 % de dolomía y 15 % de lutita.

2.- Por lo que respecta a los espesores con que se le representa a lo largo de la sección, se tiene que hacia el sector suroccidental, en los pozos de control 1 al 5, en donde no se alcanzó la base de la serie, se le estima un espesor de 500 m. Esto como de carácter mínimo, ya que está estimado en función de los espesores totales perforados en los Pozos 6 y 7 (Fig. 12), los que aún cuando ya representan depósitos de cuenca, los cuales generalmente ocurren con espesores menos potentes que aquellos de la plataforma, que son las que caracterizan el sector en discusión, constituyen en sí un parámetro mínimo real de referencia.

En el sector nororiental de la sección, los espesores de esta serie son estimados con base en las consideraciones regionales que de esta

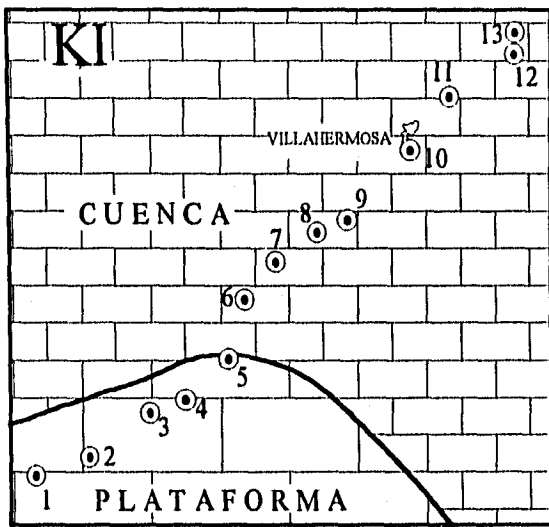
zona se han realizado. Así, tomando en cuenta la referencia de que hacia la porción norte de la región de la sección se manifiesta un marcado adelgazamiento del espesor de las rocas del Cretácico Temprano (PEMEX, 1985), y partiendo de los espesores encontrados en los pozos 6 y 7, se estima un adelgazamiento paulatino de la serie a través de los diferentes pozos de control, hasta alcanzar hacia la parte final noreste de la sección, en los Pozos 12 y 13, el valor promedio de 300 m referido para esta zona (Fig. 12).

Conviene mencionar aquí que, dado que en el Pozo 12 no se manifestaron las rocas de esta serie (Fig. 9), su ausencia se señala producto de haber sido removidas por efectos de erosión, ya que en los mapas de distribución de litofacies y paleogeográficos del Cretácico Inferior de la región, su depositación se refiere que se llevó a cabo de forma homogénea en toda la extensión de esta última (PEMEX, 1985; McFarland y Menes, 1991).

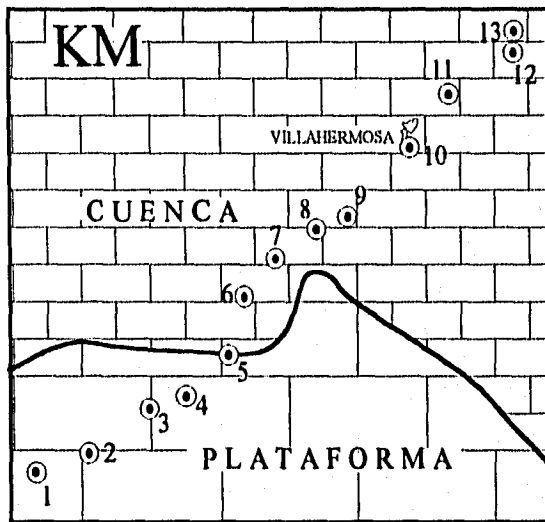
Por tal razón, en la realización del modelado de la subsidencia y la termicidad de la sección, los 300 m de espesor de las rocas Cretácico Inferior considerados en la parte más nororiental de ésta, son tomados en cuenta como un depósito, el cual posteriormente es erosionado (Fig. 12).

En el caso del Pozo 13, el cual no profundizó hasta alcanzar esta serie, se le considera un comportamiento similar al del Pozo 12.

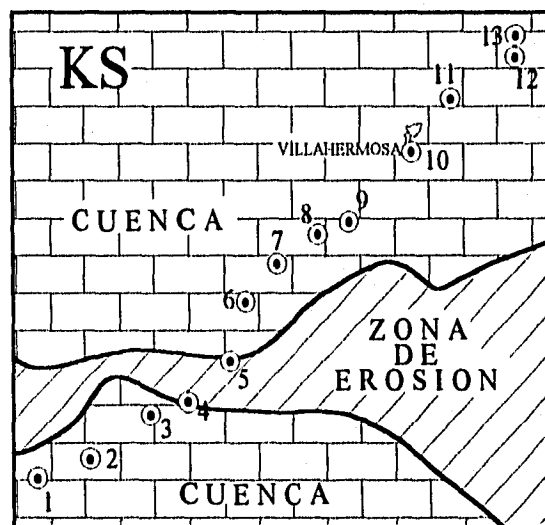




A



B



C

FIG. 14 ESQUEMAS DE DISTRIBUCION DE LOS AMBIENTES DE DEPOSITO CRETACICOS EN EL AREA DE LA SECCION DE ESTUDIO (Mod. de PEMEX, 1985)

## ANÁLISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION

---

3.- En cuanto al tiempo que se toma en consideración para el depósito de esta serie, su edad le implica un intervalo comprendido de los 144 a los 113 Ma (Fig. 12), lo que significa un período de 31 Ma.

4.- Las condiciones paleobatimétricas que, para el modelado de este depósito se marcan en el presente trabajo, en función de sus ambientes deposicionales son, de 20 m para los depósitos de plataforma, de los Pozos 1 al 4, la cual es seguida por una zona de transición entre éstos y los del ambiente de cuenca, en donde se consideran profundidades de 50 m, esto en la porción de los Pozos 5 y 6, para por último, en la zona de cuenca propiamente dicha, que se extiende entre los Pozos 7 y 13, se manejen valores de 300 m.

### II.4.5. Serie Cretácico Medio (KM)

Regionalmente, en la zona de la sección de estudio, esta serie se manifiesta con una amplia distribución. Se le ha encontrado presente tanto en numerosos pozos perforados hacia el área de la planicie, como hacia la zona de la sierra, en donde se hallan conformando extensos afloramientos.

En la sección de estudio, las rocas de esta serie fueron alcanzadas por nueve de los trece pozos de control aquí considerados (Fig. 9). De estos, seis de ellos las alcanzaron a perforar en su totalidad (1, 5, 6, 7, 8 y 12), mientras que los

tres restantes (2, 4 y 9), sólo lo hicieron de manera parcial.

Al igual que la serie anterior, ésta se caracteriza por dos conjuntos litológicos mayores distribuidos a lo largo de la sección. Uno en la porción suroccidental, y el otro en la parte nororiental.

En la primera parte, en la zona comprendida entre los Pozos 1 al 5, hacia las primeras localidades de ésta, la serie está constituida predominantemente por "mudstone" a "packstone" de pellets y bioclastos, dolomitizados, de color crema, en los que se llegan a observar estructuras de marcas de oleaje y canales de erosión (PEMEX, 1985), y dolomías finas, que, hacia las últimas localidades de la zona, se intercalan con "grainstone", "floatstone" y "rudstone" con bioclastos de fragmentos de algas, corales, foraminíferos bentónicos, gasterópodos y rudistas, así como algunos cuerpos orgánicos formados por corales y rudistas (Varela S., M., 1995). La presencia de foraminíferos bentónicos (miliólidos y orbitolinidos entre otros), es un rasgo común en las rocas de toda esta porción.

En la parte nororiental de la sección, del Pozo 6 hasta la finalización de ésta, en la zona de los primeros pozos se tiene la ocurrencia de dolomías cristalinas y dolomías ligeramente arcillosas de color café oscuro, con exoclastos constituidos por fragmentos de moluscos, corales, foraminíferos bentónicos y briozoarios, incluidos en una matriz con

## ANÁLISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION

---

foraminíferos planctónicos (Varela S., M., *op. cit.*), así como brechas que gradúan de ruditas a arenas gruesas con bioclastos. Hacia la porción más norte de esta parte, se reporta la presencia de calizas microcristalinas y calizas arcillosas gris oscuro con, característicamente, fauna planctónica, así como dolomías arcillosas.

Los espesores de esta serie a lo largo de la sección, de una manera general, también pueden ser definidos bajo dos tendencias de comportamiento, los cuales a su vez guardan una estrecha relación con los dos sectores litológicos anteriormente descritos. En la porción suroccidental, los pozos que la delimitan, 1 y 5, que llegaron a cortar de manera completa a la serie con 1 225 y 769 m respectivamente, la caracterizan como una zona con espesores relativamente gruesos; la porción nororiental, se tipifica como una zona con espesores relativamente delgados, en donde el espesor máximo de 350 m se encontró en el Pozo 8 y el mínimo de 54 m en el Pozo 7 (Fig. 9).

En la denominación Cretácico Medio de esta serie, se encuentra implícita su edad, esta es Albiana-Cenomaniana, la cual ha sido establecida con base en el contenido microfósil determinístico en ella presente, constituido predominantemente por foraminíferos bentónicos y planctónicos.

El depósito de los sedimentos que dieron origen a las rocas de esta serie, dadas sus características litológicas y su contenido faunístico, se ha considerado que se llevó a

cabo bajo condiciones ambientales muy similares a las que prevalecieron durante el Cretácico Temprano, esto es, dentro de dos ambientes sedimentarios mayores, uno de plataforma y el otro de cuenca, que se continuaron manifestando durante el Cretácico Medio prácticamente sin cambios, marcándose sólo un mejor desarrollo areal de la plataforma (Fig. 14b) y produciéndose su aislamiento.

Esta plataforma dentro de la sección de estudio, se delimita coincidentemente con la extensión del conjunto litológico y la zona de espesores relativamente gruesos de la serie Cretácico Medio del sector suroccidental, esto es, hasta el Pozo 5 (Fig. 14b), un área en la que en detalle en dirección SW a NE, se ha diferenciado la ocurrencia de ambientes de plataforma interna y de borde de plataforma (Varela S., M., 1995).

Por su parte, la cuenca queda referenciada por el conjunto litológico y la zona de espesores relativamente delgados de Cretácico Medio del sector nororiental de la sección, esto es, desde el Pozo 6 hasta el final de ella (Fig. 14b). En detalle, dentro de ésta, hacia la zona de este Pozo 6, se ha caracterizado una zona de talud proximal, la cual pasa hacia el norte a talud distal y después a la región de cuenca propiamente dicha (PEMEX, 1985; Varela, *op.cit.*).

En función de lo anteriormente mencionado, en la realización del modelado de la subsidencia y la termicidad de la sección, las rocas de la serie Cretácico Medio se describen bajo las siguientes consideraciones:

## ANÁLISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION

---

1.- Desde el punto de vista de la litología presente, de una manera general, la composición porcentual de la serie se define constituida por 82 % de caliza, 10 % de dolomía y 8 % de lutita.

2.- En cuanto a la variabilidad y comportamiento de los espesores de la serie, a través de la sección, en el sector suroccidental, la zona de espesores relativamente gruesos que corresponde con el área del ambiente de plataforma, la correlación de los dos valores extremos de 1 225 y 769 m de los pozos que lo delimitan, sugiere la interpretación de la manifestación de un adelgazamiento de la serie en dirección NE. Si éste se considera desarrollado de una manera paulatina, los espesores en los pozos intermedios que no alcanzaron o no perforaron totalmente dicha serie (Fig. 9), pueden encontrarse entre los valores ya mencionados, consideración con base en la que en los pozos 2, 3 y 4, se estima la probable ocurrencia de espesores de 1 100, 1 000 y 900 m respectivamente de rocas del Cretácico Medio (Figs. 12 y 13).

En el sector nororiental de la sección, la zona de espesores relativamente delgados de la serie, y la que corresponde con el ambiente de cuenca, entre los pozos 6 y 8 se define un marcado acúñamiento, desde ambos pozos hacia el Pozo 7, mientras que en la porción restante, tomando en cuenta los 63 m cortados por el Pozo 12, éstos se relacionan a los 350 m del Pozo 8, considerando un nuevo adelgazamiento en dirección NE de la serie. Si este adelgazamiento se visualiza desarrollado de manera paulatina, permite estimar espesores

probables de 250, 200 y 150 m en los pozos 9, 10 y 11 respectivamente (Figs. 12 y 13).

En el Pozo 13, en donde también se carece de información al respecto, se toma en consideración como marco de referencia mínimo, el espesor perforado en el Pozo 12.

3.- El intervalo de tiempo que implica el depósito de esta serie durante el Albense-Cenomanense, se marca comprendido de los 113 a los 91 Ma (Fig. 12), por lo cual se le toma en consideración un período de 22 Ma.

4.- En cuanto a la caracterización de las condiciones paleobatimétricas prevalecientes durante el depósito de la serie, los parámetros considerados en este estudio, según las condiciones ambientales ya mencionadas, para los depósitos de plataforma son profundidades promedio de 20 m, esto es para la zona de los pozos 1 al 5 (Fig. 14b), y para los depósitos de cuenca, primero se marca una zona de transición que corresponde con una zona de talud proximal con profundidades de 50 m, en el área de los pozos 6 y 7, para, posteriormente, hacia la zona de la cuenca propiamente dicha, cambiar a batimetrías de 300 m, esto en el resto de la sección, ya del Pozo 8 al 13.

### II.4.6. Serie Cretácico Superior (KS)

Las rocas de esta serie se consideran ampliamente distribuidas en la región de la

## ANALISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION

---

sección de estudio, ya que han podido ser detectadas en varios de los pozos que se han perforado hacia la zona de la planicie. A lo largo de la sección, su ocurrencia se encuentra bien definida; de los trece pozos de control aquí considerados, en ocho de ellos fueron alcanzadas, en cuatro no se tuvo la profundización necesaria para alcanzarlas (pozos 3, 10, 11 y 13) y, en el Pozo 5, aunque se alcanzaron a perforar rocas todavía más antiguas, no se encontraron presentes (Fig. 9).

De los ocho pozos que perforaron estas rocas, en siete de ellos fueron atravesadas totalmente, y seis de éstos se ubican en el sector comprendido entre los pozos 1 al 9 (Figs. 9 y 10).

En este sector, destaca también el hecho de que en el Pozo 5 no se encontraran rocas de esta serie, pero sí más antiguas, lo cual se ha interpretado como la ocurrencia de una zona de exposición y erosión en la región de la sección de estudio durante el depósito del Cretácico Superior (Fig. 14c), la cual se extiende específicamente de manera perpendicular a la sección, hacia las inmediaciones del área en que se encuentra dicho pozo (PEMEX, 1985; Varela S., M., 1995).

Hacia ambos lados de esta zona de erosión, la serie está conformada por distintas litofacies. En la porción suroccidental, hacia los pozos 1 y 2, de una manera general se tienen calizas y brechas calcáreas sinsedimentarias, ambas en partes dolomitizadas. Las primeras están constituidas predominantemente por

"wackestone" a "packstone" de bioclastos (fragmentos de moluscos, equinodermos, ostrácodos y algas), e intraclastos con foraminíferos planctónicos y calciesferúlidos. Las segundas por clastos de "packstone" y "floatstone" con fragmentos de rudistas, moluscos y corales, con foraminíferos planctónicos en la matriz (Varela S., M., *op. cit.*).

En la porción nororiental, a partir del Pozo 6, la serie se encuentra constituida hacia la base por "mudstone" arcilloso con pedernal negro y algunas intercalaciones de brechas calcáreas, las cuales tienden a desaparecer hacia el noreste, ambas parcialmente dolomitizadas y con algo de bentonita. Hacia arriba, estratigráficamente, pasan a "mudstone"- "wackestone" arcilloso con algunas capas de bentonita, y después a margas y lutitas ligeramente bentoníticas con algunas brechas calcáreas, las cuales tampoco se extienden hacia la porción más noreste de este sector (PEMEX, 1985).

En algunas partes de la sección, predominantemente en esta última porción nororiental, las rocas de esta serie se han subdividido en tres unidades litoestratigráficas, las cuales, por correlación con las formaciones del Cretácico Superior del nororiente y oriente de México, son referidas como Agua Nueva, San Felipe y Méndez, como en los pozos 6, 7, 8 y 12 de la sección, aunque en este último no se identificó la Fm. Méndez (Fig. 9). Asimismo, también en otras partes, esta subdivisión no ha sido factible de realizarse, como en los pozos 1, 2, 4 y 9 (Fig. 9), en

## ANÁLISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION

---

donde estas rocas se denominan de manera integral como Cretácico Superior.

En el presente trabajo se considera esta última manera para referirse a las rocas de esta serie.

Los espesores encontrados de estas rocas por los pozos a lo largo de la sección son bastante variables. En lo que corresponde a la porción suroccidental, en los dos pozos extremos 1 y 2, es de 242 y 240 m respectivamente, mientras que en el Pozo 4 es tan sólo de 3 m (Fig. 9). En la porción nororiental, se llegan a definir dos zonas, una de espesores relativamente más potentes en el sector ocupado por los pozos 6, 7 y 8, en donde se tienen 330, 442 y 398 m respectivamente, y la otra, a partir del Pozo 9 hasta el final de la sección, de espesores relativamente más delgados, como se puede ver en los pozos 9 y 12 en los que se tienen 165 y 155 m respectivamente (Fig.9).

Al igual que las series mesozoicas anteriores, en su nombre la serie indica la edad de las rocas que la conforman, la cual ha sido determinada con base en su contenido microfaunístico índice, conformado predominantemente por foraminíferos planctónicos, de entre los que principalmente se reportan varias especies de globotruncánidos y algunas de globigerínidos.

La acumulación de los sedimentos que dieron origen a estas rocas, dadas las peculiaridades litológicas y microfaunísticas que presentan, implica tener en cuenta condiciones de

depósito con una profundidad un poco mayor que las de la serie mesozoica anterior, un ambiente que de manera genérica se ha interpretado como de cuenca en el área de la sección.

Este ambiente se marca desarrollado, sobre una paleotopografía heredada de los rasgos morfológicos plataforma-cuenca que prevalecieron durante el Cretácico Medio, parte de la cual, aparentemente la zona del antiguo borde de plataforma, constituyó un área levantada (Fig. 14c).

A lo largo de la sección, hacia ambos lados de esta área levantada, tanto sobre la antigua plataforma como en la cuenca (Figs. 14b y 14c), se ha definido que se presentaron predominantemente condiciones de talud, el cual en el sector nororiental, varían de talud proximal a distal y hasta la cuenca propiamente dicha en un sentido SW-NE (PEMEX, 1985; Varela S., M., 1995).

Para la realización del modelado de la subsidencia y la tectonicidad de la sección, y tomando en cuenta las características anteriormente descritas para las rocas del Cretácico Superior, éstas son manejadas con las consideraciones siguientes:

- 1.- Su composición litológica porcentual, de una manera general, se define constituida por 50 % de calizas, 30 % de margas y 20 % de lutitas.

## ANÁLISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION

---

2.- Los espesores de la serie a lo largo de la sección, como ya se mencionó, se tienen bien definidos en siete de los trece pozos de control aquí utilizados en los que dicha serie fue atravesada totalmente, quedando dos zonas en las que se hizo necesario realizar algunas consideraciones al respecto dado que las rocas del Cretácico Superior no fueron alcanzadas, o no se encontraron presentes debido a erosión o a no depósito (?).

Una de estas zonas es la de los pozos 3 al 5, en donde, en el primero, no se llegó a alcanzar esta serie (Fig. 9), pero ya que se encuentra ubicado dentro de un área que regionalmente se ha marcado con la ocurrencia de estas rocas (Fig. 14e), por correlación con los datos aportados por los pozos 1 y 2, se les infiere aquí presentes con un espesor mínimo de 200 m (Figs. 12 y 13). En el Pozo 5 la serie no se presenta, razón por la cual se considera ubicado en una zona de exposición subaérea, con erosión durante el Cretácico Tardío (Fig. 14e).

Pero si además se considera que, en el Pozo 4 se llegaron a encontrar sólo 3 m de estas rocas, una interpretación conjunta que se puede plantear en la zona de estos dos pozos, y la cual se sigue en el presente trabajo, es la de que allí pudo haberse tenido algo de depósito de sedimentos durante los inicios del Cretácico Tardío, antes de que se constituyera en un área de erosión que los removiera, en el área del Pozo 4 no del todo y en la del Pozo 5 de manera total, la que inclusive llegó a afectar hasta las rocas del Cretácico Medio.

Con base en esta interpretación, en los pozos 4 y 5 se infiere un espesor depositado de rocas del Cretácico Superior de cuando menos 50 m, el cual posteriormente, de manera respectiva, fue parcial y totalmente erosionado, quedando en el primero sólo los 3 m allí encontrados (Fig. 12).

En la otra zona, que se tiene en el área de los pozos 10 al 13, el sector nororiental de la sección, en donde con excepción del Pozo 12, los demás no alcanzaron a perforar el Cretácico Superior, pero dado que se ubican dentro de una zona considerada con el depósito de éste, se les infiere un espesor estrechamente relacionado a los encontrados en los pozos 9 y 12 (Fig. 9), esto es, de 160 m para los pozos 10 y 11, y de 155 m para el Pozo 13 (Figs. 12 y 13).

3.- El intervalo de tiempo involucrado en el depósito de la serie Cretácico Superior se encuentra comprendido entre los 91 y 66.4 Ma (Fig. 12), lo cual implica un período de 24.6 Ma. Este período de depositación en los pozos 4 y 5, dado que después se tiene que considerar una etapa erosiva, se estima empíricamente con una duración de sólo 6 Ma, esto es de los 91 a los 85 Ma.

4.- Los parámetros paleobatimétricos estimados que se manejan para caracterizar las condiciones de depósito de esta serie, consideran que en el piso de depósito de ésta prevaleció una paleotopografía tipo plataforma-cuenca heredada de la etapa anterior. Así, para la zona desarrollada sobre la de la antigua plataforma del Cretácico

## ANÁLISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION

---

Medio, esto es, de los pozos 1 al 3, dado el basculamiento que experimentó provocó un desnivel que se considera con una profundidad mínima de 50 m, mientras que para el otro extremo, que se extiende de los pozos 6 al 13, la zona de cuenca, se le asigna un valor mínimo de 300 m. A la zona de erosión de los pozos 4 y 5 no se le considera paleobatimetría, por lo que se caracteriza con 0 m.

### II.4.7. Serie Paleoceno (PAL)

Las rocas de esta serie se encuentran extensamente distribuidas en el subsuelo de la región de la sección de estudio, como lo indica el hecho de haber sido atravesadas por numerosos pozos que se han perforado en la zona de la planicie.

A lo largo de la sección se les encuentra presentes en ocho de los trece pozos de control que se toman en cuenta, en los que fueron atravesadas totalmente y, si no se reportan en los pozos restantes, es debido a que éstos no tuvieron la profundización necesaria para alcanzarlas. Una excepción la constituye el Pozo 5, en el cual realmente no fueron encontradas aún cuando se llegó a rocas más antiguas (Fig. 9).

La litología que caracteriza la serie a lo largo de toda la sección, es de lutitas predominantemente. De hecho, el área de la sección en el plano regional de distribución de litofacies del Paleoceno, se encuentra ubicada íntegramente dentro de la zona de este tipo de

rocas (Fig. 15a). En detalle, estas lutitas tienen un comportamiento homogéneo, con porciones calcáreas, ligeramente bentoníticas y con algunas intercalaciones de bentonita. Característicamente, hacia la base llegan a presentar algunas intercalaciones de cuerpos de brechas calcáreas en la que se tiene una matriz arcillosa bentonítica.

Esta predominancia de lutitas ha permitido a algunos autores referir la serie como la parte inferior de la Fm. Lutitas Nanchital (Galloway, W. E. *et al.*, 1991; García, M. G., 1994).

Los espesores que estas rocas presentan dentro de la sección son bastante variables, pero éstos, de una manera general, tienden a definir dos sectores con distinto comportamiento. Uno en el área de los pozos 1 al 4, en donde los espesores son relativamente más reducidos, no se exceden los 200 m, y el otro en la zona de los pozos 6 al 12, que se caracteriza por presentar espesores relativamente más gruesos ya que, con excepción del Pozo 8 que perforó sólo 184 m de la serie, en todos los demás se llegan a superar los 300 m, teniéndose un máximo de hasta 412 m en el Pozo 7 (Fig. 9).

La edad de la serie se encuentra implícita en su nombre, Paleoceno, la cual ha sido establecida con base en el contenido faunístico índice que presenta, constituido principalmente por foraminíferos planctónicos y algunos bentónicos.

Las rocas de esta serie se han referido típicamente como de facies de aguas profundas



## ANALISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION

---

(Fig. 15a), desarrolladas dentro de un ambiente de depósito propiamente de cuenca, el cual, se ha asociado con profundidades batiales (Vinięra O., F., 1981).

Dadas las anteriores características generales de la serie, los parámetros con que se le describe para la realización del modelado de la subsidencia y la termicidad de la sección de estudio, se dan bajo las siguientes consideraciones:

1.- De una manera general la composición litológica porcentual se define constituida por 77 % de lutitas, 15 % de margas, 3 % de caliza y 5 % de toba para hacer referencia al contenido de bentonita que se presenta.

2.- Los espesores de la serie que se toman en cuenta, son los reportados por los ocho pozos de control de la sección en los que fue perforada totalmente, a partir de los cuales, por correlación entre ellos, se estiman los de aquéllos que no alcanzaron la serie por haberse quedado cortos en la perforación.

Así, en el Pozo 3 se considera presente un espesor de 100 m dado el engrosamiento que se define entre los pozos 2 y 4 (Figs. 9 y 12); por otro lado, extrapolando valores entre los espesores de 340 y 310 m que se tienen en los pozos 9 y 12 respectivamente, dado el acuífamiento que se bosqueja entre ellos, a los pozos 10 y 11 se les estiman espesores de 330 y 320 m también respectivamente; por último, en el Pozo 13, siguiendo este mismo comportamiento, se le infiere un espesor de 300 m (Figs. 12 y 13).

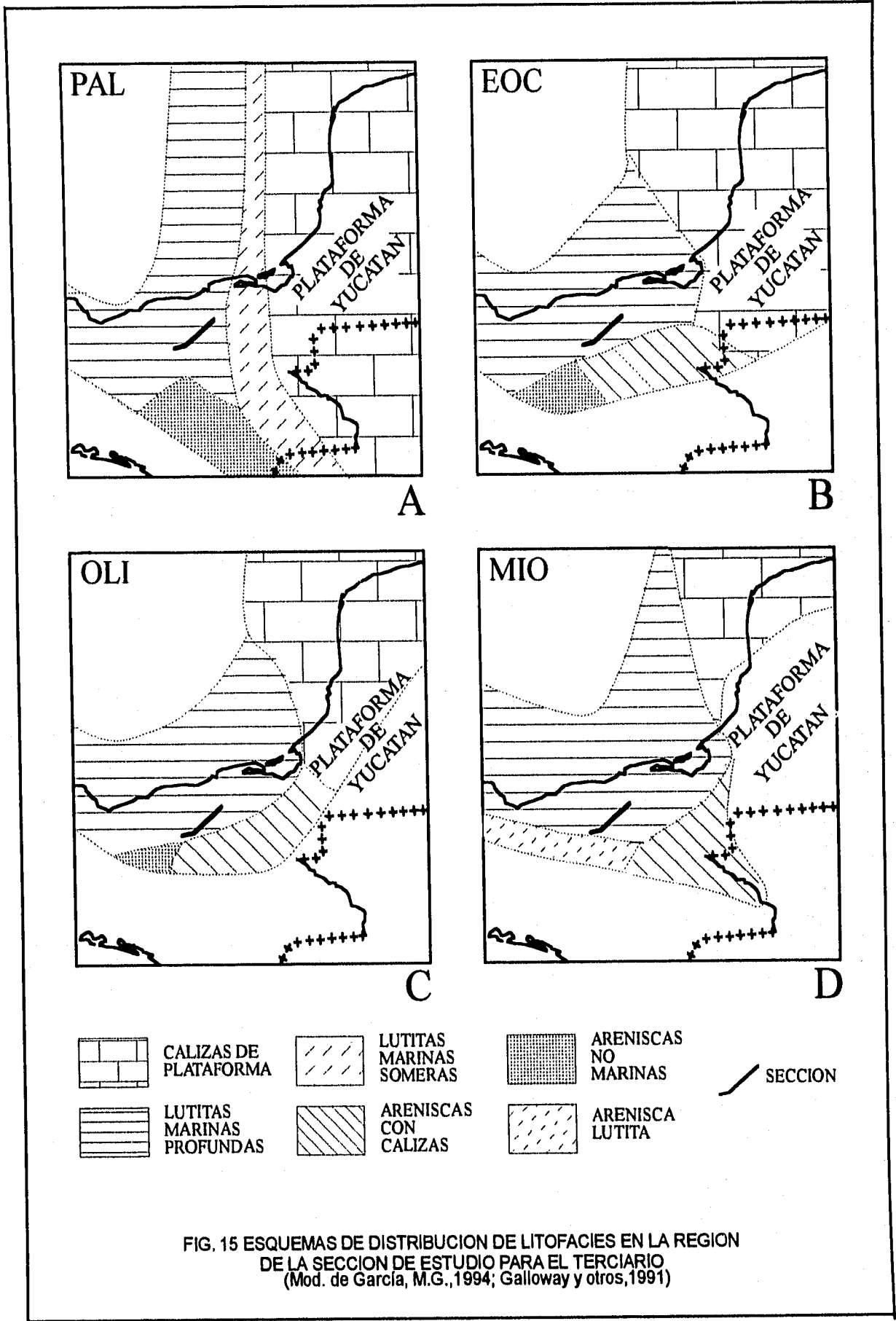
Para el Pozo 5, en donde no se encontraron rocas de esta serie, lo cual se ha descrito debido a erosión o no depósito (Fig. 9), dado que para el Paleoceno se caracteriza regionalmente el desarrollo de un hundimiento regional, se considera más conveniente manejar dicha ausencia como un no depósito y no como erosión, ya que implicaría tener en cuenta un levantamiento.

3.- El intervalo de tiempo considerado para la acumulación de los sedimentos que originaron las rocas de esta serie, se encuentra comprendido de los 66.4 a los 57.8 Ma (Fig. 12), lo cual significa un período de 8.6 Ma.

4.- Tomando en cuenta que las condiciones de depósito para este tiempo se refieren que, de manera generalizada, se homogenizaron como de aguas profundas (Fig. 15a) y batiales, pero sin que se precise específicamente un parámetro paleobatimétrico dentro del amplio rango que se implica (200-2000 m), para el caso del presente trabajo, este parámetro se considera con un valor mínimo dentro de dichas condiciones, esto es, 300 m.

### II.4.8. Serie Eoceno (EOC)

Al igual que la serie anterior, las rocas del Eoceno se encuentran ampliamente distribuidas en el subsuelo de la región de la sección de estudio, en donde han sido cortadas por gran parte de los numerosos pozos que se han perforado en el área de la planicie.



## ANALISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION

---

Dentro de la sección, su ocurrencia se detectó en nueve de los trece pozos de control aquí considerados, en todos los que se llegó a atravesar completamente la serie (Fig. 9). En los restantes cuatro no se tuvo el profundizamiento necesario para alcanzarla, pero su presencia en las zonas que ellos representan, se infiere por la distribución regional que guarda en el área.

Litológicamente la serie se describe a todo lo largo de la sección, con un comportamiento bastante homogéneo, constituida por una predominancia de paquetes de lutitas de color gris verdoso a negras, ligeramente calcáreas y en partes bentoníticas, a veces con algunas intercalaciones de cuerpos de bentonita, llegando a presentar también algunos cuerpos de areniscas.

El área de la sección, en el plano regional de litofacies del Eoceno se ubica predominantemente dentro de la zona de lutitas, y en una porción de la de areniscas (Fig. 15b). Por su litología, ocasionalmente se le llega a referir como la parte superior de la Formación Lutitas Nanchital.

Los espesores perforados de las rocas del Eoceno dentro de la sección, acusan un comportamiento bastante irregular, aunque de manera general, en la zona de los pozos 1 al 6, en sentido NE, se puede observar una clara tendencia de un continuo engrosamiento de la serie, ya que en el primero se encontraron 160 m, mientras que en el último se llegaron a cortar hasta 714 m. A partir del Pozo 7 y hasta el final de la sección, la irregularidad de los

espesores encontrados es mucho más evidente, no pudiéndose definir ninguna tendencia clara de comportamiento, el espesor mínimo se tiene en el Pozo 9 con 85 m, mientras que el máximo se reporta en el Pozo 12 con 1 723 m (Fig. 9).

Es una serie bastante fosilífera que tiene un alto contenido de foraminíferos planctónicos. La correspondiente edad cocénica de la serie, ha sido definida precisamente con base en este contenido microfaunístico, primordialmente foraminíferos planctónicos, y de manera particular, varias especies índice de globorotalias (Galloway, W. E. *et al.*, 1991).

Dada la asociación litológica y microfaunística presente en la serie, las condiciones de depósito en las que se originaron se consideran como de mar abierto, relacionándose específicamente con aguas profundas (Fig. 15b), propias de un ambiente de cuenca (PEMEX, 1985, Galloway, W. E. *et al.*, 1991).

En función de las características anteriormente definidas, la serie Eoceno dentro del modelado de la subsidencia y la termicidad de la sección, es descrita con los siguientes parámetros:

1.- Desde el punto de vista de la composición litológica que de manera porcentual se considera se tiene en esta serie, se estima presente 70 % de lutitas, 15 % de margas, 10 % de areniscas y 5 % de toba, ésto último para hacer referencia al contenido de bentonita que en ella se presenta.

## ANALISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION

---

2.- Los espesores totales proporcionados por los diferentes pozos de control, en los que se perforó la serie, son los valores que se toman en consideración para definir su variabilidad de comportamiento a través de la sección, ya que con la correlación entre ellos, se estiman los espesores que cabría esperar en los pozos que no fueron lo suficientemente profundos y que no la alcanzaron.

De esta manera, en el Pozo 3 se considera un espesor con un valor intermedio a los 235 m y 340 m encontrados en los pozos 2 y 4 respectivamente, el cual es de 290 m (Figs. 12 y 13). En los pozos 10 y 11, se estiman espesores de 600 m y 1 100 m respectivamente, tomando en cuenta los datos de los pozos 9 y 12 que de manera respectiva son de 85 m y 1723 m. Para el Pozo 13, se considera el mismo dato del Pozo 12, dado que es la fuente de información más cercana que se tiene.

Conviene mencionar aquí, que mucho llama la atención el espesor de 1723 m de Eoceno reportado por el Pozo 12, debido a que este valor es el doble del espesor más grueso reportado en la sección, el cual es de 714 m en el Pozo 6, lo que podría significar un dato estructuralmente afectado, pero debido a que no se contó con información que aclare este problema, en el presente trabajo se maneja como un espesor estratigráfico normal.

3.- El intervalo de tiempo que implica el depósito de los sedimentos eocénicos, se encuentra comprendido entre los 57.8 Ma y los

36.6 Ma (Fig. 12), lo cual significa un período de 21.2 Ma.

4.- Dado que el Eoceno se caracteriza como un depósito de aguas profundas (Fig. 15b), ambientalmente bajo condiciones de mayor profundidad que las de la serie anterior Paleoceno, pero también sin una especificación cuantitativa de dicha profundidad, en el presente modelado la paleobatimetría para esta serie se sugiere comprendida alrededor de un mínimo de 500 m a lo largo de toda la sección.

### II.4.9. Serie Oligoceno (OLI)

Las rocas de esta serie guardan una distribución bastante amplia en el subsuelo de la región de la sección de estudio, ya que se les ha encontrado presentes en la mayoría de los numerosos pozos perforados en la zona de la planicie.

A lo largo de la sección se les encontró en ocho de los trece pozos de referencia, de los cuales, en siete de ellos se cortaron de manera total, y en uno, en el Pozo 11, de manera parcial (Fig. 9). En otros tres pozos, el 2, 10 y 13, no se tuvo el profundizamiento necesario para alcanzar la serie, mientras que en otros dos pozos, en el 7 y el 8, no se le encontró presente, aún cuando se perforaron rocas más antiguas.

La secuencia litológica presente en esta serie, que no varía de manera importante a lo largo de la sección, se caracteriza constituida por

## ANALISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION

---

lutitas de color gris oscuro, lutitas ligeramente arenosas y lutitas bentónicas, algo calcáreas, con intervalos de areniscas de grano fino y bentonitas (Fig. 15c), con un abundante contenido de foraminíferos bentónicos y planctónicos.

Esta serie en ocasiones es referida como la Formación La Laja, sobre todo hacia el noroeste de la sección (Galloway, W. E. *et al.*, 1991; García M., G., 1994).

Los espesores de la serie detectados en los pozos de control, de una manera general, acusan un comportamiento irregular a lo largo de la sección.

En los pozos 1, 2 y 4 esta variación no es de mucha importancia pues oscilan alrededor de los 370 m, pero hacia el Pozo 5 se tiene un engrosamiento notable hasta alcanzar los 492 m. Esto es seguido por un adelgazamiento hacia el Pozo 6, en donde se presentaron 158 m, que culminan con la ausencia de la serie en los pozos 7 y 8, hecho que es caracterizado por la ocurrencia de una discordancia producto de la erosión de estas rocas en esta zona (Fig. 9). Un nuevo engrosamiento se define hacia los pozos 9 y 11, en los que nuevamente se vuelve a encontrar la serie, ahora con espesores de 588 m y 643 m respectivamente, y en donde éste último no constituye el espesor total.

En el Pozo 12, dado que se tiene un problema de fallamiento inverso, se detectaron dos espesores de las rocas de esta serie, uno en la porción inferior de la columna del pozo de

286 m, el cual forma parte de la columna autóctona, y el otro en la porción superior de 412 m, que constituye la parte de la columna cabalgante (Fig. 9).

La edad oligocénica de esta serie, se ha determinado con base en el contenido microfaunístico diagnóstico que llega a presentar, el cual está constituido principalmente por foraminíferos planctónicos y algunos bentónicos.

El origen de estos depósitos se enmarca desarrollado dentro de condiciones de mares abiertos y profundos (Fig. 15c), propias de un ambiente de cuenca, el cual se ha caracterizado predominantemente como de índole batial (Galloway, W. E. *et al.*, 1991; García M., G., 1994).

Con base en las características anteriormente mencionadas de estas rocas del Oligoceno, los parámetros con los que es considerada dentro del modelado de la subsidencia y la termicidad de la sección son los siguientes:

- 1.- La composición litológica porcentual, de una manera general, se estima en un contenido de 60 % de lutitas, 20 % de areniscas, 15 % de margas y 5 % de toba, esto último haciendo referencia a la presencia de bentonita en la serie.

- 2.- Los espesores de las rocas del Oligoceno que se toman aquí en cuenta, se definen a partir de los espesores totales cortados por los pozos de control de la sección, los cuales son también utilizados para estimar el de otros

## ANÁLISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION

---

pozos en los que estas rocas no fueron alcanzadas.

En el Pozo 11, en donde se perforaron 643 m de la serie, sin llegar a su base, se estima la ocurrencia de un espesor mínimo de 700 m. Para el pozo 3, dada la poca variabilidad de los espesores que se manifiestan en el sector en que se encuentra, se infiere la presencia de 170 m, un valor promedio entre los de los pozos 2 y 4. Por su parte, para el Pozo 10, tomando en consideración los espesores de los pozos 9 y 11, se le definen 650 m (Figs. 12 y 13).

Por lo que respecta a los pozos 7 y 8, en los que no se llegaron a encontrar estas rocas, lo cual se marca debido a erosión (Fig. 9), dada la continuidad y homogeneidad de la sedimentación que se reporta para el Oligoceno en la región de la sección, en función de los espesores que se tienen en los pozos 6 y 9, se estima una depositación de la serie de 300 m y 400 m para las localidades de los pozos 7 y 8 respectivamente, los cuales, son posteriormente removidos hacia el final de este período.

Para la estimación del espesor de estas rocas en el Pozo 13, se recurre a la información del Pozo 12, el cual cuenta con dos datos de espesor del Oligoceno, el de la columna cabalgante de 412 m, constituye en sí un espesor completo de la serie, mientras que el espesor de 286 m de la columna autóctona, es un espesor incompleto dado que su contacto superior es por falla. Esto último implica que,

en esa localidad, podría faltar alguna parte de la porción superior de la serie y, por lo tanto, representaría un espesor mínimo, arriba de cuyo valor cabría esperar se tendría el espesor presente hacia estas porciones, por lo que el espesor del Oligoceno que se considera en el Pozo 13, se relaciona más estrechamente con el dato de la columna cabalgante y se estima en 450 m (Figs. 12 y 13).

La duplicidad del Oligoceno existente en la porción de la columna cabalgante del Pozo 12, de hecho se encuentra acompañado de 142 m de rocas del Eoceno (Fig. 9), los cuales en conjunto constituyen un espesor de 560 m que en el modelado de la sección se manejan como un espesor de columna repetida (Figs. 12 y 13). Su emplazamiento, dado que el resto de la columna superior no se ve afectada en este sentido, se considera acaccido hacia la finalización del depósito afectado.

3.- El espacio de tiempo involucrado en el desarrollo de los depósitos del Oligoceno, se encuentra comprendido entre 36.6 y 23.7 Ma, lo que le significa un período de 12.9 Ma.

4.- Los depósitos del Oligoceno, dado que han sido caracterizados ambientalmente de manera muy similar a los del Eoceno, como de cuenca (Fig. 15b y c), mencionándose incluso, hasta condiciones batimétricas de índole batial (Galloway, W. E. *et al.*, 1991), se califican paleobatimétricamente con el mismo parámetro mínimo de 500 m de profundidad a lo largo de toda la sección.

#### II.4.10. Serie Mioceno (MIO)

Hasta antes de la década de los años 90's, la mayor parte de las rocas post-paleógenas presentes en la región de la sección de estudio, las cuales se encuentran agrupadas y referidas dentro varias series formacionales, se consideraban casi todas pertenecientes al Mioceno (Fig. 9). Trabajos de índole bioestratigráfico desarrollados a principios de esta década (Salmerón U., P. *et al.*, 1991; Galloway, W. E. *et al.*, 1991; entre otros), han venido a proporcionar un marco cronoeestratigráfico de referencia más detallado y más amplio para estas diferentes series litoestratigráficas, dentro del intervalo Mioceno-Pleistoceno (Fig. 11).

Tomando en cuenta lo anterior, en el presente trabajo las rocas que se consideran conforman la serie Mioceno en la sección, son todas aquéllas que se han incluido tanto bajo la denominación de Mioceno Inferior, como con los nombres formacionales de Depósito, Encanto, Amate Inferior y Paraje Solo. Aunque de esta última formación, sólo su parte inferior, y únicamente bajo la circunstancia de cuando está descrita como la serie formacional que incluye a toda la secuencia de rocas post-paleógenas, como en el caso de los pozos 6 al 9, y no como la serie formacional con que culmina dicha secuencia, como se puede ver en los reportes de los pozos 1 al 4 y 10 al 12 (Fig. 9).

En el caso específico de los pozos 6 al 9, se cree conveniente considerar que la Formación

Paraje Solo, que es la única serie post-Paleógena que se reporta, representa un depósito del Mioceno-Pleistoceno, más que exclusivamente del Pleistoceno (Fig. 11), ya que esto último implicaría tener que considerar que no se encuentran representados los materiales del Mioceno-Plioceno, debido a un episodio de levantamiento y erosión, un evento del cual, en lo general, no se tiene ninguna referencia en la región de la sección para este tiempo (PEMEX, 1985, Galloway, W. E. *et al.*, 1991; Salvador, A., 1991, García M., G., 1994; entre otros). Además de que, los espesores allí referidos para la Formación Paraje Solo exclusivamente, guardan una estrecha relación con el espesor conjunto de las unidades formacionales post-paleógenas de las localidades adyacentes.

Esta consideración de la Formación Paraje Solo como un depósito mioceno-pleistocénico en localidades de los pozos 6 al 9, permite subdividir el espesor allí reportado, en tres partes proporcionalmente equivalentes al tiempo de las tres épocas involucradas. Así, la determinación de la parte de la Formación Paraje Solo que se relaciona a la serie Mioceno, se realizó en función de lo que el intervalo de tiempo del Mioceno (18.4 Ma) representa dentro de la proporcionalidad que se tiene entre el espesor total reportado de la formación en cada pozo y el intervalo de tiempo Mioceno-Pleistoceno (23.69 Ma).

Estudios de más detalle al respecto, decidirán si es necesaria una reevaluación de esta consideración.

## ANÁLISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION

---

Ricoy, J. M. (en Galloway, W. E. *et al.*, 1991) refiere la conjunción de las formaciones Depósito y Encanto, como la Secuencia Deposicional II del Mioceno, una de las cuatro secuencias sedimentarias, cada una con una génesis particular, en que reagrupa la columna cenozoica de la región de las Cuencas del Sureste.

La distribución que guardan las rocas del Mioceno en el subsuelo de la planicie de la región de la sección de estudio, es bastante amplia. Se les ha encontrado en casi todos los pozos de la zona y, de hecho en la sección, fueron atravesadas por la totalidad de los pozos de control, en diez de los trece que son, de manera total, y en los otros tres, el 3, 10 y 13, de forma parcial, ya que no fue alcanzada su base (Fig. 9).

Litológicamente el Mioceno se caracteriza, por una alternancia monótona de lutitas fosilíferas de color gris azulado, las cuales son las más predominantes (Fig. 15d), y areniscas. Estas últimas, en partes tienen una matriz arcillo-calcárea, con algunas interstratificaciones de horizontes de bentonita y presentan ocasionalmente algo de "mudstone" arcilloso. Hacia la parte superior se marca una ligera tendencia al predominio de las areniscas.

Los espesores que de la serie se tienen a lo largo de la sección, aunque lateralmente con un comportamiento bastante variable, también se caracterizan por ser primordialmente bastante potentes. Los valores mínimos que se llegan a tener son, de 336, 528 y 840 m en los pozos 12, 5 y 11 respectivamente, hacia los cuales se

constituyen desarrollados marcados adelgazamientos de la serie (Figs. 12 y 13).

El contenido fosilífero es abundante en foraminíferos, principalmente de carácter planctónico, pero también de tipo bentónico de aguas profundas (Galloway, W. E. *et al.*, 1991).

Es precisamente mediante algunas especies diagnósticas del contenido de foraminíferos, que se establece la edad Mioceno de las rocas de esta serie. Asimismo, este conjunto fosilífero y las litofacies que caracterizan la serie (Fig. 15d), han permitido sugerirle un origen relacionado con un ambiente de depósito de cuenca, llevado a cabo bajo condiciones de carácter batial superior (Galloway, W. E. *et al.*, 1991).

Con base en las características antes mencionadas, los parámetros con los que se maneja el Mioceno dentro del modelado de la subsidencia y la termicidad de la sección, son los siguientes:

1.- Porcentualmente su composición litológica se define conformada por 50 % de lutitas, 10 % de margas, 35 % de areniscas y 5 % de toba.

2.- Los espesores de Mioceno considerados a lo largo de la sección, se muestran sintetizados en la Figura 12 y pueden ser visualizados esquemáticamente en la Figura 13. Aquellos de los pozos 1, 2, 4, 5, 11 y 12, se definieron por



## ANALISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION

---

la conjunción de las series Mioceno Inferior, Depósito y/o Encanto presentes en cada uno de estos pozos (Fig. 9).

Los de los pozos 6, 7, 8 y 9, fueron estimados por medio de la proporcionalidad establecida entre el espesor de la Formación Paraje Solo y el intervalo de tiempo Mioceno-Pleistoceno, los cuales se distinguen marcados con un asterisco (Fig 12).

Los espesores en los pozos 3 y 10, fueron estimados asignándole un valor un poco mayor al encontrado por cada uno de los pozos. Así, en el Pozo 3, donde se cortaron 2 205 m, se infiere un espesor de 2 300 m y, en el Pozo 10, en donde se alcanzaron a perforar 1 490 m, se consideran 1 500 m. Por lo que se refiere al Pozo 13, en el que el espesor perforado de la serie es de 979 m sin llegar a su base, dado por la conjunción de las Formaciones Depósito y Amate Inferior (Fig. 9), se estimó la presencia de 1 000 m (Figs. 12 y 13).

3.- El intervalo de tiempo involucrado en el depósito de esta serie, se encuentra comprendido entre los 23.7 Ma y los 5.3 Ma (Fig. 12), lo cual implica el manejo de un período de 18.4 Ma.

4.- Por otro lado, dadas las condiciones de depósito de un ambiente de cuenca que se describen prevaletientes durante el Mioceno para la conformación de esta serie, consideradas como probablemente en la zona batial superior (Galloway, W. E. *et al.*, 1991), el parámetro paleobatimétrico que se considera en el modelado de la sección es de 300 m.

### II.4.11. Serie Plioceno (PLI)

Esta serie se describe conformada a lo largo de la sección de estudio, por todas aquellas rocas que se han agrupado con los nombres formacionales de Concepción Inferior, Concepción Superior y/o Filisola, como en los pozos del 1 al 4 y del 10 al 12 (Fig.9), por las Formaciones Amate Superior y Encajonado (Pozo 13); así como por la porción media de la Formación Paraje Solo, aunque esto exclusivamente cuando, en dicha formación se tienen conjuntadas la totalidad de las rocas post-paleógenas, como sucede en el caso de los pozos 6 al 9.

La porción de la Formación Paraje Solo que se considera conforma a la serie Plioceno en los pozos mencionados, al igual que se hizo para el Mioceno, se determinó en función de lo que representa el intervalo de tiempo Plioceno, dentro de la proporcionalidad entre el espesor total de esta formación en cada pozo y el intervalo de tiempo Mioceno-Pleistoceno (23.69 Ma).

Ricoy, J. M. (en Galloway, W.E. *et al.*, 1991) describió también a las formaciones Concepción Inferior, Concepción Superior y Filisola, como la Secuencia Depositacional III del Plioceno.

En la región de la sección, a las rocas de esta serie se les ha encontrado ampliamente distribuidas en el subsuelo del área, en la zona de la planicie han sido atravesadas por casi todos los pozos que allí se han perforado. Dentro de la sección la serie fue perforada

## ANALISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION

---

íntegramente por la totalidad de los pozos de control aquí considerados, e inclusive en la porción más suroccidental de ésta, en el Pozo 1, se le describe aflorando (Fig. 9).

La litología con que se caracteriza la serie Plioceno, es de lutitas arenosas ligeramente calcáreas, de color gris y fosilíferas, predominantemente con foraminíferos planctónicos y bentónicos, con abundantes intercalaciones de areniscas, las cuales paulatinamente tienden a ser más predominantes hacia la cima, y en partes con algo de material bentonítico.

La edad de esta serie, como ya se ha mencionado, se ha determinado mediante el estudio de carácter bioestratigráfico de los varios grupos de foraminíferos que se presentan en estas rocas.

Este contenido fosilífero y las características litológicas de la serie en conjunto, se relacionan con condiciones de depósito asociadas a un medio ambiente de plataforma externa a media, para la parte inferior de la serie, y de plataforma media para la porción superior de ésta última (Galloway, W. E. *et al.*, 1991). Para la parte más alta de la serie, las condiciones pasan a ser de un ambiente más somero, de tipo litoral costero (PEMEX, 1985).

Los parámetros que se le definen al Plioceno para el modelado de la subsidencia y la tectonicidad de la sección, con base en lo

anteriormente dicho, se describen a continuación.

1.- La composición litológica vista porcentualmente, se establece con un contenido de 45 % de areniscas, 45 % de lutitas, 5 % de margas y 5 % de toba.

2.- Los espesores de la serie aquí considerados, son bastante variables a lo largo de la sección, no tienen un comportamiento homogéneo. El menor de ellos se tiene en el Pozo 1 con 250 m, mientras que los mayores se presentan en los pozos 5 y 10, con 1378 m y 1320 m respectivamente (Figs. 12 y 13).

3.- El intervalo de tiempo que se toma en cuenta para el depósito de la serie Plioceno, se encuentra comprendido entre 5.3 y 1.6 Ma (Fig. 12), lo cual le viene a redituár un período de 3.7 Ma.

4.- Desde el punto de vista de las condiciones paleobatimétricas que pudieron caracterizar estos depósitos pliocénicos, dada su calificada naturaleza de un ambiente de plataforma (Galloway, W. E. *et al.*, 1991), se considera que las que se tenían hacia la base de la serie no debieron sobrepasar los 50 m de profundidad, las cuales hacia la cima, debieron llegar a ser mucho más someras (PEMEX, 1985), probablemente de hasta menos de 10 m. Estos rangos de profundidad se marcan como los parámetros batimétricos con que se describe el depósito de la serie a lo largo de la sección.

#### II.4.12. Serie Pleistoceno (PLE)

Las rocas que se describen constituyendo esta serie Pleistoceno, son aquellas que han sido agrupadas y referidas en los diferentes pozos de control de la sección de estudio, como las Formaciones Paraje Solo y Zargazal. De la Formación Paraje Solo, en los pozos del 6 al 9, se toma en cuenta sólo la porción superior, ya que se considera, como se ha manifestado en párrafos anteriores, que en estos pozos se tiene agrupada una secuencia mioceno-pleistocénica.

La parte superior de la Formación Paraje Solo en los pozos del 6 al 9, al igual que en las dos series anteriores, se determinó en función de lo que el intervalo de tiempo Pleistoceno representa, dentro de la proporcionalidad entre el espesor de la formación en cada uno de estos pozos y el intervalo de tiempo Mioceno-Pleistoceno (23.69 Ma).

Ricoy, J. M. (en Galloway, W. E. *et al.*, 1991) refiere a la Formación Paraje Solo, conjuntamente con las Formaciones Agueguexquite y Cedral, que no se reportan en la sección, como la Secuencia Depositacional IV de la región de las Cuencas del Sureste, del Pleistoceno

En la región de la sección, las rocas de esta serie se encuentran ampliamente distribuidas en el subsuelo de la zona de la planicie ya que han sido encontradas en numerosos pozos allí perforados, e inclusive se llegan a presentar aflorando de manera aislada.

A lo largo de la sección se les encontró presente en casi todos los pozos de control, en algunos de los cuales se comporta como la serie aflorante, y por lo tanto en la que se da inicio a la perforación de esos pozos. La única excepción al respecto la constituye el Pozo 1, en donde la serie se reporta ausente (Figs. 9 y 12).

Litológicamente, la serie Pleistoceno se caracteriza como una secuencia monótona de areniscas, dispuestas conformando cuerpos lenticulares, y de lutitas, con ocasionales cuerpos de conglomerados, gravillas y arenas.

El contenido de foraminíferos que se tiene, es característicamente mucho más escaso en comparación con las series anteriores. Es precisamente mediante el estudio del contenido fosilífero diagnóstico presente en estas rocas, que la edad de la serie ha sido determinada.

Estos depósitos se asocian desarrollados dentro de ambientes transicionales de tipo deltaico y paludal, y aún esporádicamente de carácter continental, bajo condiciones fluviales (PEMEX, 1985; Galloway, W. E. *et al.*, 1991).

Los parámetros con los que se describen estas características de la serie dentro del modelado de la subsidencia y la termicidad de la sección son las siguientes:

- 1.- Porcentualmente la composición litológica se le define, con un contenido de 60 % de areniscas y 40 % de lutitas.

## ANALISIS GEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA SECCION

---

2.- Los espesores que se tienen de la serie a lo largo de la sección son bastante variables, pero de una manera general, tienden a ser más potentes hacia el extremo nororiental, de los pozos 10 al 13 (Fig. 12 y 13). En el Pozo 1, dado que no se tiene presente esta serie, se considera el resultado de no depósito.

3.- El intervalo de tiempo involucrado en el evento de depositación de esta serie, se encuentra comprendido entre 1.6 y 0.01 Ma (Fig. 12), lo que significa un período de 1.59 Ma.

4.- Dados los ambientes depositacionales de transición y de carácter continental a los que asocian los depósitos de esta serie, las condiciones paleobatimétricas prevalencias se consideran que no debieron exceder de una manera general los 10 m de profundidad, por lo que éste es el parámetro paleobatimétrico de depósito con que se caracteriza la serie.

### II.4.13. Serie Reciente

En esta serie se incluyen todos aquellos materiales sin consolidar que se distribuyen extensamente en la superficie de la región de la sección de estudio, constituyendo gran parte del área de la planicie, y en donde se les llega a

referir con la denominación de Reciente, sin hacer uso de algún nombre formacional.

A lo largo de la sección se presentan sólo en algunos de los pozos de control, en seis de los trece (Fig. 9), predominantemente con un espesor delgado, aunque en el Pozo 13 se tienen hasta 102 m.

La litología que caracteriza a esta serie está representada predominantemente por arenas, con algunas gravas y arcillas, acumuladas dentro de los últimos 10 000 años, y cuyo origen se relaciona con procesos principalmente de carácter fluvial.

En el desarrollo del modelado de la subsidencia y la termicidad de la sección, se le considera caracterizada con los siguientes parámetros:

1.- Litológicamente, con una composición porcentual de 80 % de arenas, 10 % de limos y 10 % de arcillas.

2.- Los espesores que se le toman en cuenta son los cortados por los diferentes pozos en los que la serie se encuentra presente.

3.- El período de tiempo de depósito que se considera, es de 10 000 años (0.01 Ma).

4.- Las condiciones paleobatimétricas, puesto que es una acumulación de tipo continental, se caracterizan con un valor de 0 m.

### III. ANALISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

El modelado de la subsidencia de una cuenca sedimentaria consiste básicamente de la evaluación cuantitativa de las proporciones de subsidencia registradas a través del tiempo, las cuales son manifestadas por el progresivo hundimiento que experimenta el sustrato o basamento de esa cuenca durante su evolución, lo que a menudo es referido como la Historia de Sepultamiento o el Análisis Geohistórico de la Cuenca (Van Hinte, J. E., 1978; Allen y Allen, 1990).

En el presente capítulo, en su primera parte se expone de forma breve una síntesis de los aspectos teóricos básicos que se contemplan dentro del modelado de la subsidencia, a fin de entender su relación con la disciplina matemática y poder manejar más coherentemente sus resultados. En la segunda parte del capítulo, se muestran los resultados obtenidos de la realización de este modelado en la sección de estudio, y de esta manera analizar dentro de un marco cuantitativo la evolución geológica de ésta última.

#### III.1. CONCEPTOS TEORICOS DE LA SUBSIDENCIA

La evolución de la subsidencia dentro de una cuenca sedimentaria, no es un proceso simple

de desarrollo, sino que en éste último inciden otros varios aspectos geológicos, los cuales deben ser tomados en consideración para el mejor entendimiento del fenómeno. Asimismo, diferentes tipos de subsidencia son reconocidas, cada una con un significado específico, lo que también es necesario conocer para la realización de un buen análisis. En seguida se presenta una discusión de éstos aspectos.

##### III.1.1. SUBSIDENCIA

La subsidencia se define como un movimiento vertical hacia abajo, o de carácter negativo, de la litósfera (Souquet, P., 1989), el cual se lleva a cabo a través del tiempo, y que da como resultado la formación de una cuenca, un lugar propicio para la acumulación de sedimentos.

En una cuenca sedimentaria, la subsidencia de la litósfera se considera provocada, por un lado, por la carga de sedimentos acumulados y/o del agua allí presentes, la que se ha referido como la **Subsidencia Gravitatoria** (Souquet, P., *op. cit.*), pero la cual por sí sola, no explica de manera satisfactoria la cantidad de subsidencia visualizada en la mayoría de las

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

cuenca sedimentarias, por lo que, se deben considerar, por otro lado, también la acción de otros procesos contemporáneos de tipo geodinámico, los cuales son denominados como "mecanismos motores o fuerzas motrices" (driving mechanisms or forces), o "fuerza motriz tectónica" (tectonic driving force), la que se denomina simplemente como **Subsidencia Tectónica** (Allen y Allen, 1990; Bessis, F., 1986).

En función de lo anteriormente expresado, en una cuenca sedimentaria se puede hacer referencia a la **Subsidencia Total u Observada**, la que representa el hundimiento que ha experimentado el sustrato o la cima de basamento de la cuenca, conformada por la subsidencia debida a la carga de sedimentos o **Subsidencia Gravitatoria**, más la subsidencia provocada por la fuerza motriz tectónica o **Subsidencia Tectónica**, lo que se expresa de la siguiente manera.

$$ST_0 = SG + ST_c$$

en donde:

$ST_0$  = Subsidencia Total u Observada

$SG$  = Subsidencia Gravitatoria

$ST_c$  = Subsidencia Tectónica

El grado de influencia de cada una de los tipos de subsidencia en la subsidencia total, depende de la respuesta isostática de la litósfera.

### III.1.2. HISTORIA DE SEPULTAMIENTO

Cada punto de una determinada cuenca sedimentaria tiene representada en su columna estratigráfica individual, la evolución que ese punto en particular experimentó como parte integral del desarrollo de la cuenca en tiempo y espacio, la cual puede manifestar algunas variantes respecto a la de otros puntos aledaños dentro de la misma.

El análisis de la columna estratigráfica de un punto dado de una cuenca, en relación al tiempo, puede ser realizado mediante una gráfica que, al considerar por un lado el espesor de los materiales acumulados (profundidad) (eje de las ordenadas en Fig.16), y por el otro la edad de estos depósitos (tiempo) (eje de las abscisas), permite definir una serie de curvas a las que se les ha denominado **Curvas de Subsidencia y de Sepultamiento**.

La evaluación cuantitativa del comportamiento de estas curvas, descrita a partir de las variaciones que se manifiestan en las pendientes que se llegan a delinear, las cuales son representativas de las diferentes proporciones de sedimentación y subsidencia, viene a dar una idea de la evolución experimentada por ese punto de la cuenca, esto es, de su **historia de sepultamiento**.

POZO-11

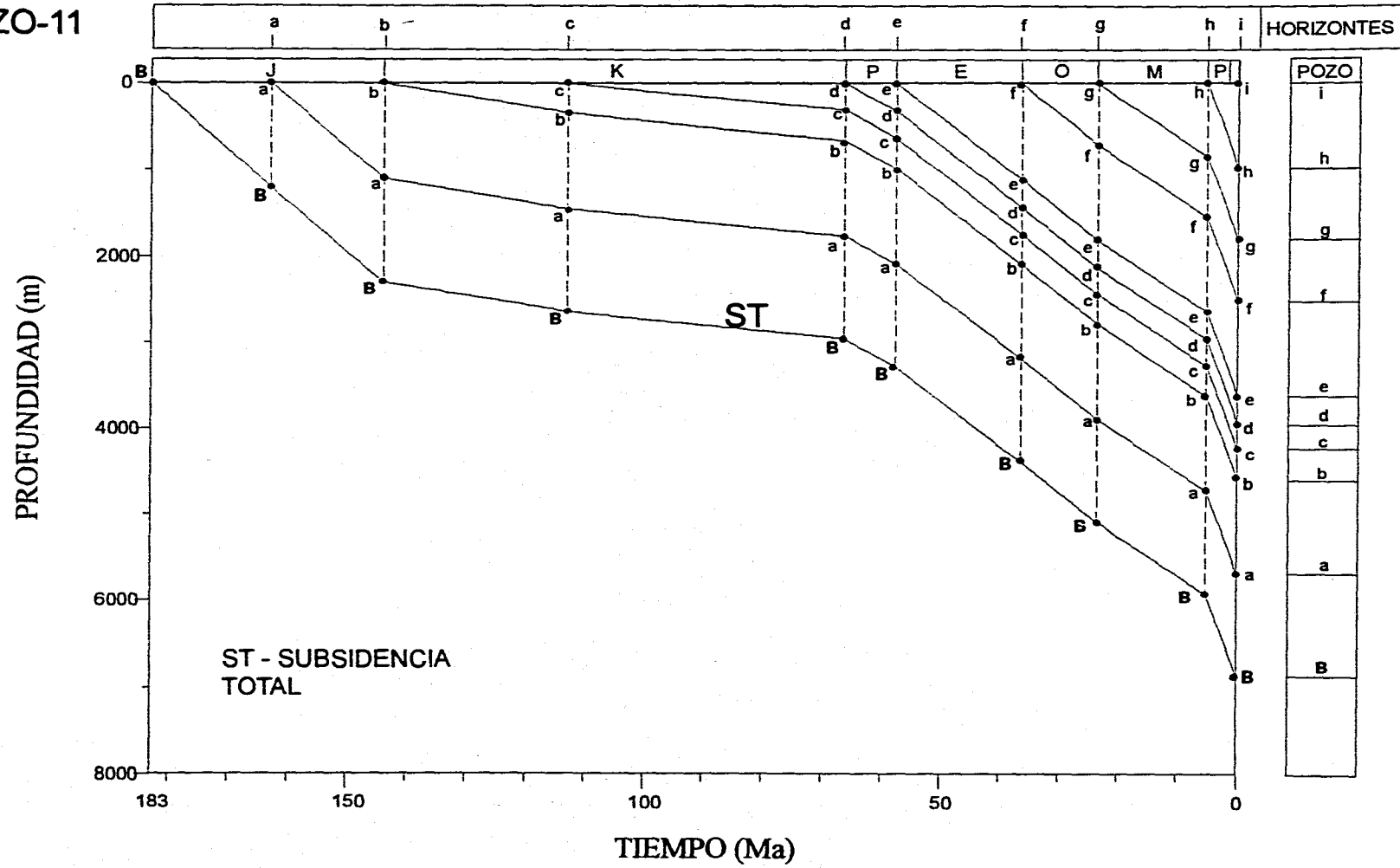


FIG. 16 CURVAS DE SEPULTAMIENTO EN UNA GRAFICA TIEMPO- PROFUNDIDAD.

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

Además, este análisis proporciona información acerca de los mecanismos que intervinieron en la formación y evolución de la cuenca misma, así como del tipo de estructura original de ésta. De hecho, este tipo de gráficas se puede decir que constituyen en sí una representación unidimensional de la historia de sepultamiento, ya que están reproduciendo el comportamiento espacial de sólo un punto de la cuenca a través del tiempo.

Se reconocen varios tipos de curvas en estas gráficas Tiempo-Profundidad, cada una indicativa de algún proceso en particular:

La curva ST (Fig. 16), que se describe producto de la graficación acumulativa a través del tiempo de los espesores sedimentarios que en la actualidad se tienen de cada uno de los niveles más característicos de una columna estratigráfica (a, b, ..., i), viene a constituir lo que se conoce como la **Curva de Subsistencia Total**, la cual está representando el comportamiento experimentado por la cima de basamento de la cuenca.

La curva definida por un mismo nivel estratigráfico, describe el comportamiento espacial dentro de la cuenca sedimentaria de ese nivel específico, el que comúnmente se refiere como la cima o la base de una unidad litoestratigráfica dada.

Es conveniente mencionar que en la construcción de estas curvas, no se ha tomado

en cuenta ningún factor relacionado con la historia de sepultamiento, como lo es el grado de compactación que las diversas unidades estratigráficas han experimentado, la paleobatimetría bajo la cual se llevaron a cabo los depósitos o, el parámetro eustático del nivel del mar prevaleciente durante la acumulación. Estos factores, que influyen de manera importante en la historia de sepultamiento, deben ser considerados en la elaboración de estas gráficas, a fin de que la cuantificación de dicha historia resulte lo más apegada a la realidad.

Una descripción más detallada de estos factores se realiza en los incisos siguientes, y su consideración en la definición de las curvas de subsidencia y sepultamiento en las gráficas Tiempo-Profundidad, constituye en sí la aplicación de una corrección en su construcción. De esta manera, la curva ST de la Figura 16, se refiere ahora como STc en la Figura 17, y se le denomina **Curva de Subsistencia Total Corregida**.

En esta última figura, se puede observar también que las curvas de sepultamiento ya no se bosquejan paralelamente espaciadas, sino con cierta divergencia, lo que es indicativo de la compactación experimentada por las diversas unidades (Ed vs. Ec), por lo que también se refieren como curvas de sepultamiento corregidas. El perfil del comportamiento del tirante de agua que acompaña a estas curvas, es indicativo de que los factores paleobatimétricos y eustáticos también han sido considerados.



La remoción en la Curva de Subsistencia Total de los efectos de la Subsistencia Gravitatoria Corregida en una gráfica tiempo-profundidad, da lugar a la **Curva de Subsistencia Tectónica** (ver inciso anterior), la que es indicativa del grado de contribución de la actividad tectónica dentro de la cuenca (Fig. 18).

### III.1.3. DESCOMPACTACION

La descompactación consiste de un análisis que permite visualizar los probables espesores de depósito original de las diferentes unidades estratigráficas presentes en una cuenca sedimentaria, a partir de tener en cuenta los actuales espesores de dichas unidades y la evolución de la compactación.

La **compactación** es un fenómeno que se lleva a cabo conforme los materiales sedimentarios son progresivamente sepultados ya que, debido al continuo incremento del peso de la carga que éstos llegan a soportar con depósitos posteriores, se ven obligados a expulsar los fluidos de poro en ellos contenidos, disminuyendo con esto el volumen de poro presente en esos materiales, y a su vez el espesor original adquirido durante el depósito.

Este proceso se puede observar representado esquemáticamente en la Figura 19, en donde cada una de las unidades depositadas con un determinado espesor en los tiempos  $t_1$ ,  $t_2$  y  $t_3$ , para el tiempo inmediatamente siguiente este espesor se ha reducido por sepultamiento.

Dado que la relación del volumen de poro respecto al volumen de roca define la porosidad de ésta última, el grado de compactación de una determinada secuencia sedimentaria puede ser descrito en función de la cuantificación de la evolución de esta propiedad con el sepultamiento.

En realidad, esto constituye una aproximación, ya que el grado de compactación de una columna sedimentaria depende también de otros factores como son, el tipo de sedimentos que la constituyen, la velocidad de sedimentación del depósito, las posibilidades de drenaje de los fluidos expulsados, así como de los procesos de transformaciones minerales, cementación y disolución que se llevan a cabo durante la diagénesis.

Por otro lado también, en la realización de esta cuantificación se asume que el estado final de compactación (o de porosidad), alcanzado por una roca a una máxima profundidad de sepultamiento, no llega a manifestar regresiones notables durante etapas posteriores de levantamiento y erosión (Bessis, F., 1986).

Perrier y Quiblier (1974) señalan que, considerando que el volumen de la matriz sólida de la roca se preserva a través de la compactación y que la porosidad depende sólo de la profundidad de sepultamiento, no tomando en cuenta por conveniencia los otros factores que también llegan a influir en el proceso, se pueden describir leyes básicas de compactación para distintas litologías, independientemente del tiempo.

# POZO-11

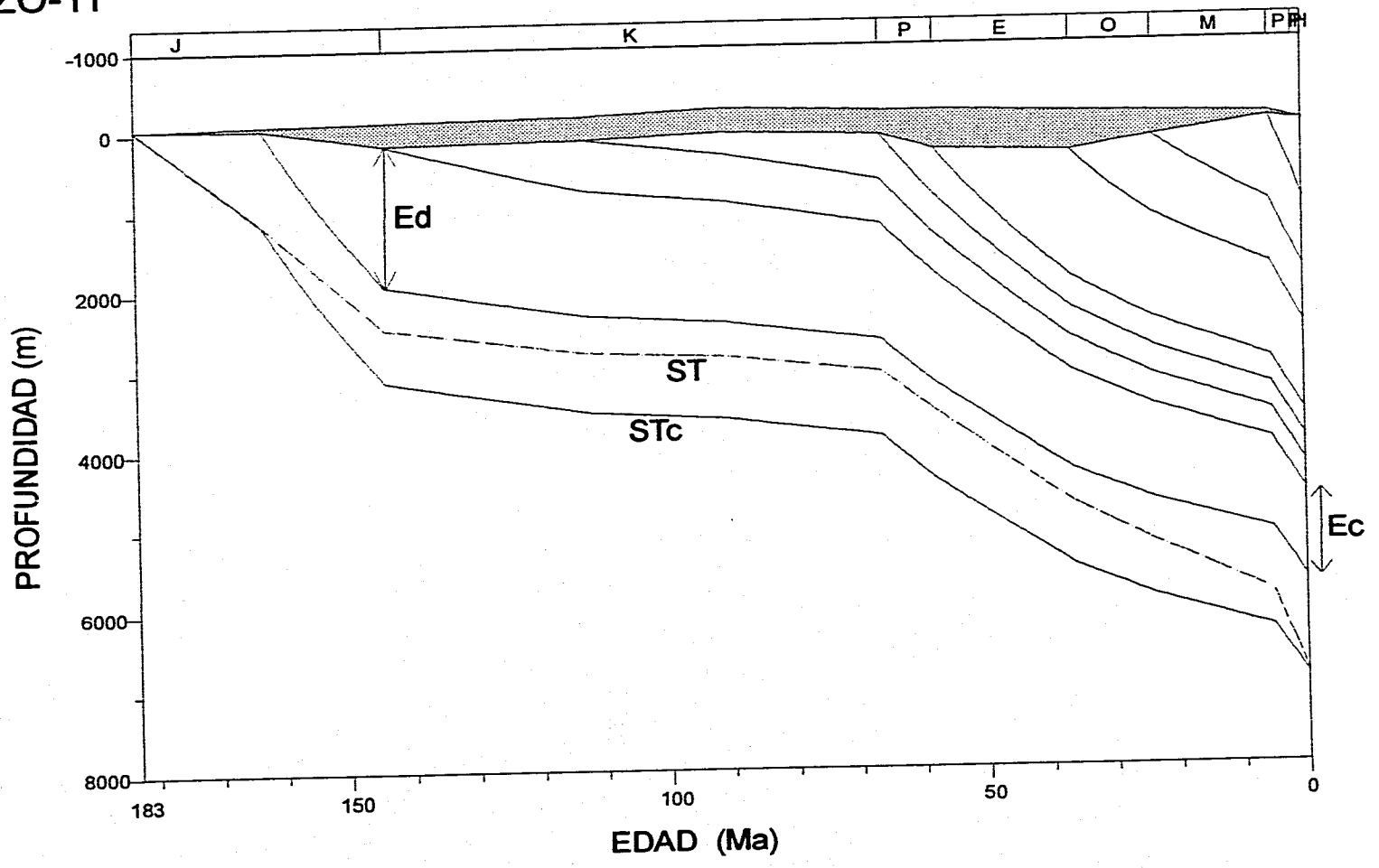


FIG. 17 CURVAS DE SEPULTAMIENTO CORREGIDAS EN UNA GRAFICA TIEMPO-PROFUNDIDAD

POZO 11

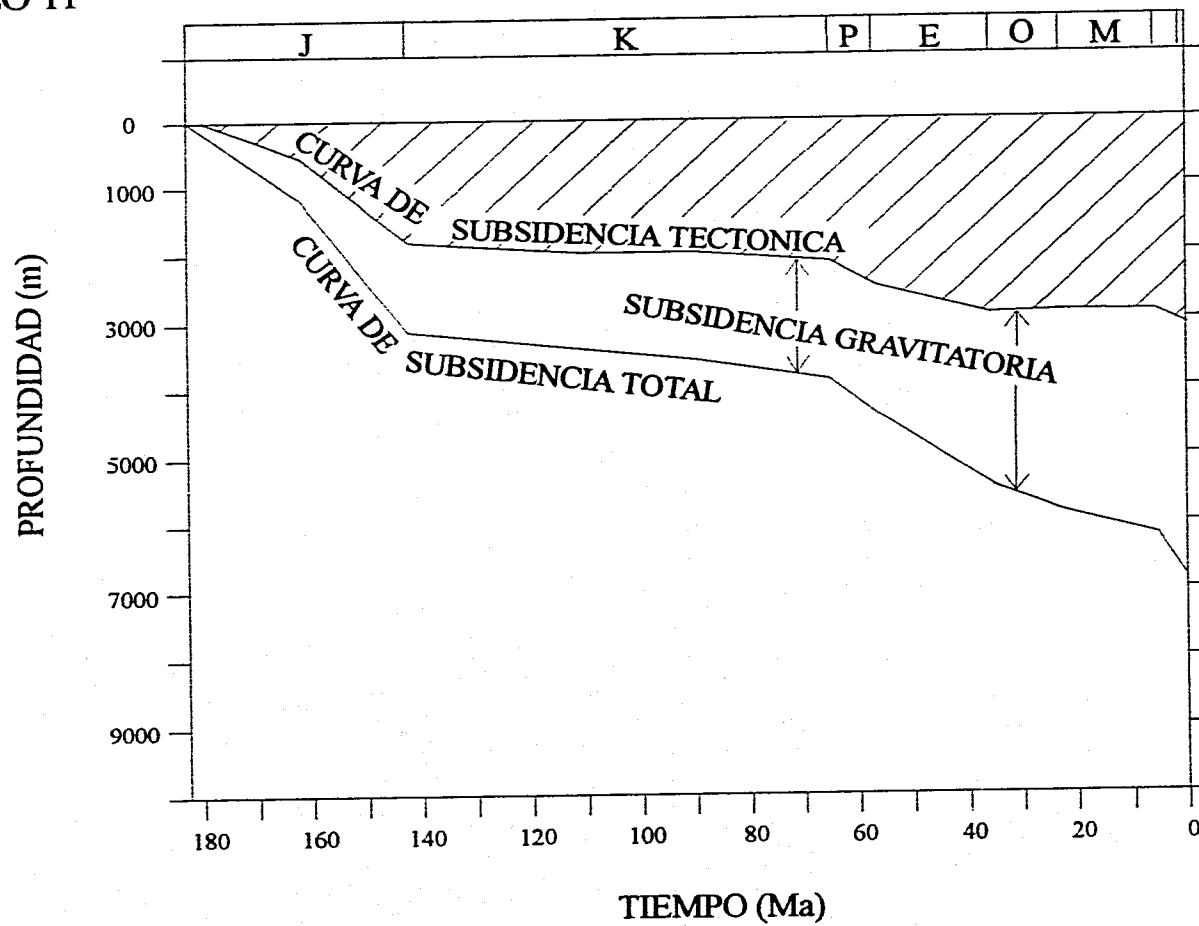


FIG. 18 GRAFICA DE LAS CURVAS DE SUBSIDENCIA.

POZO 11

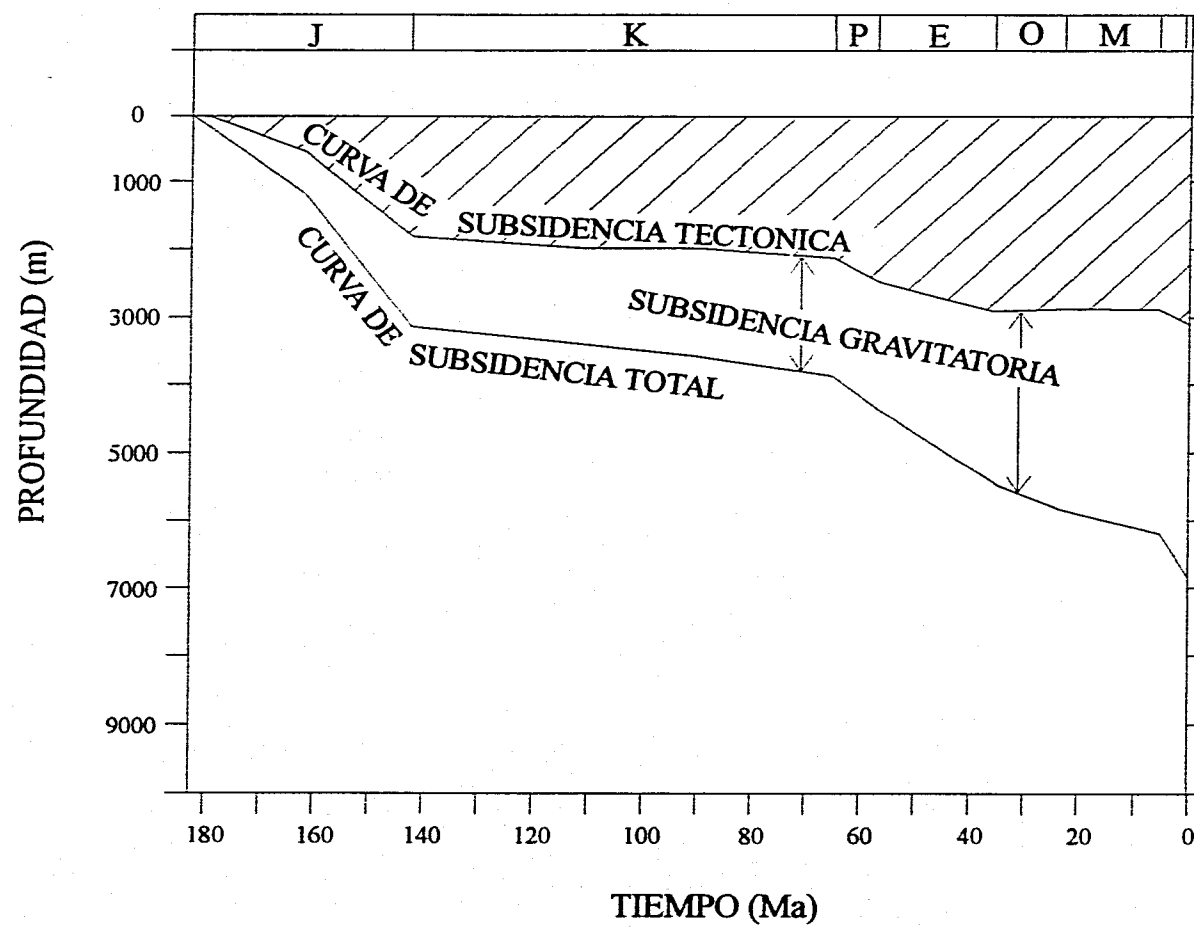


FIG. 18 GRAFICA DE LAS CURVAS DE SUBSIDENCIA.

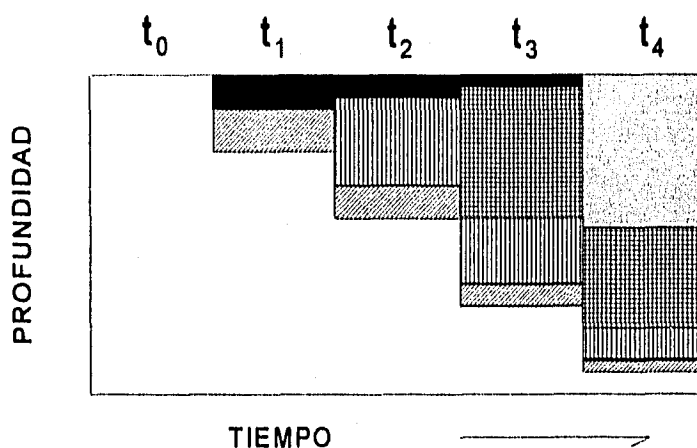


FIG. 19 REPRESENTACION DIAGRAMATICA DE LA COMPACTACION  
(Tomado de Miall, A. D., 1990)

Estas leyes se pueden obtener con base en la definición de una curva promedio, que relacione una serie de medidas puntuales de porosidad-profundidad realizadas en varios pozos de una región determinada, como la que se muestra en la Figura 20, a la que se le denomina **Curva de Compactación**, y la cual se caracteriza predominantemente como una curva con un comportamiento exponencialmente decreciente con la profundidad.

De esta manera, la corrección por compactación de una secuencia sedimentaria, referida como descompactación, se realiza dentro de la gráfica profundidad-porosidad de la curva de compactación, precisamente en el área que se demarca entre dicha curva, el eje vertical correspondiente al valor de 100% de porosidad y las líneas de la cima y la base de

la gráfica. De hecho esta porción de la gráfica, ubicada en el lado opuesto del área de la porosidad, representa a la fracción de sólidos presente en la secuencia (Fig. 21).

En esta Figura 21 se puede observar que, una unidad sedimentaria ubicada a cierta profundidad ( $Y_2-Y_1$ ), con un espesor dado (HB), se describe constituida por una determinada área de contenido de sólidos (HS) que es función de la porosidad de ese espesor. Cuando esta unidad es deslizada a lo largo de la curva de compactación a una posición anterior en una zona de profundidad menor ( $Y'_2-Y'_1$ ), conservando constante el área de contenido de sólidos (HS) de la unidad, el correspondiente espesor descompactado (HA) se obtendrá directamente en el eje vertical de la profundidad.

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

Para el caso de sedimentos normalmente presurizados durante el sepultamiento, los que además presentan una variación de la porosidad con la profundidad de tipo exponencial, Selater y Christie (1980) propusieron que matemáticamente la porosidad ( $\phi$ ) a cualquier profundidad, está dada por la siguiente expresión:

$$\phi = \phi_0 e^{-cy}$$

en donde:

- $\phi$  = Porosidad a una profundidad determinada
- $\phi_0$  = Porosidad en la superficie o inicial
- $e$  = Exponencial
- $y$  = Profundidad determinada
- $c$  = Coeficiente de la pendiente de la curva de compactación

El coeficiente "c", dependiendo del tipo litológico de que se trate, le corresponde un valor característico. La consideración del exponencial "e" en la ecuación representa la forma en que decrece la porosidad con el sepultamiento.

La expresión matemática anterior, que fue derivada de los datos obtenidos en el área del Mar del Norte, una región que se caracteriza como de alta velocidad de sedimentación, define una forma de curva en donde la porosidad se reduce de manera más lenta en los niveles someros de sepultamiento, pero más

rápidamente a niveles medios y profundos (Fig. 22).

Por otra parte, Falvey y Middleton (1981), trabajando con datos de un área de baja velocidad de sedimentación como lo es la Cuenca de Perth, en Australia Occidental, definieron una curva de compactación en donde la porosidad se reduce más rápidamente en niveles someros de sepultamiento, pero de manera más lenta a profundidades mayores (Fig. 22), la que se encuentra representada por la relación:

$$\frac{1}{\phi} = \frac{1}{\phi_0} + ky$$

en donde el parámetro adicional es:

- $k$  = Coeficiente o factor de compactación (un valor específico para cada tipo litológico)

Dado que las diferentes unidades o formaciones de una secuencia sedimentaria generalmente están constituidas por una mezcla en diferentes proporciones de litologías básicas (lutitas, limolitas, areniscas, etc.), su porosidad ( $\phi$ ) se puede establecer, en función de las porosidades de cada uno de los componentes litológicos básicos que la conforman, por medio de la relación (GENEX, 1991):

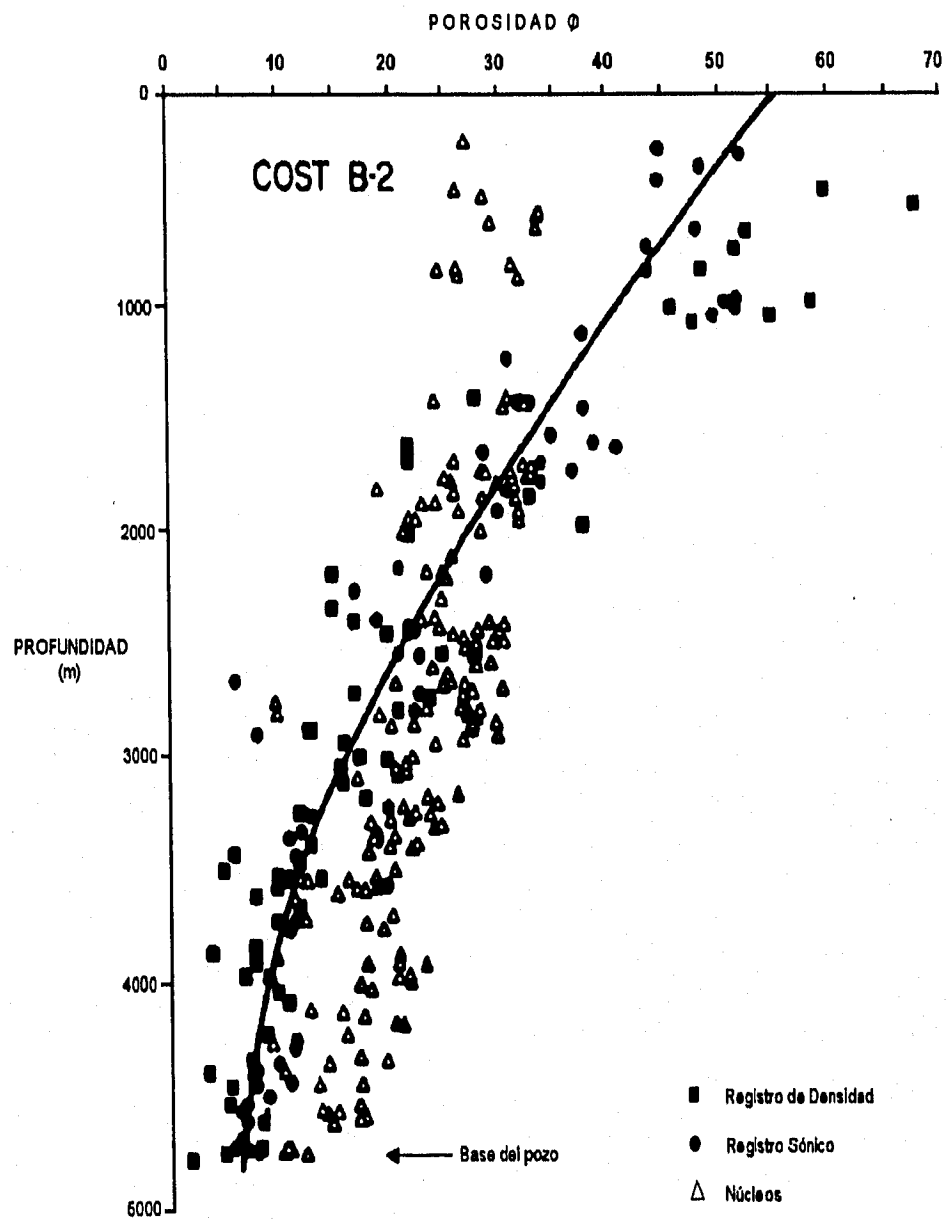


FIG. 20 GRAFICA DE UNA CURVA DE COMPACTACION OBTENIDA A PARTIR DE MEDICIONES DE POROSIDAD (Mod. de Mlall, A.D., 1990)

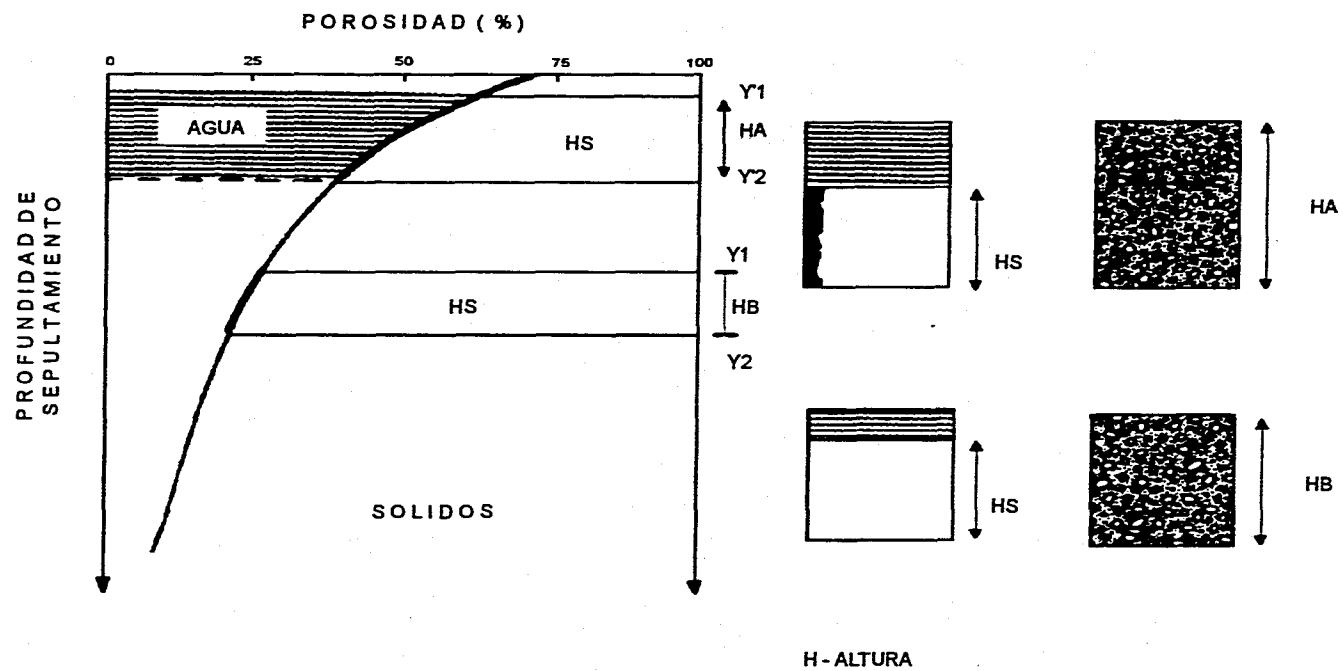
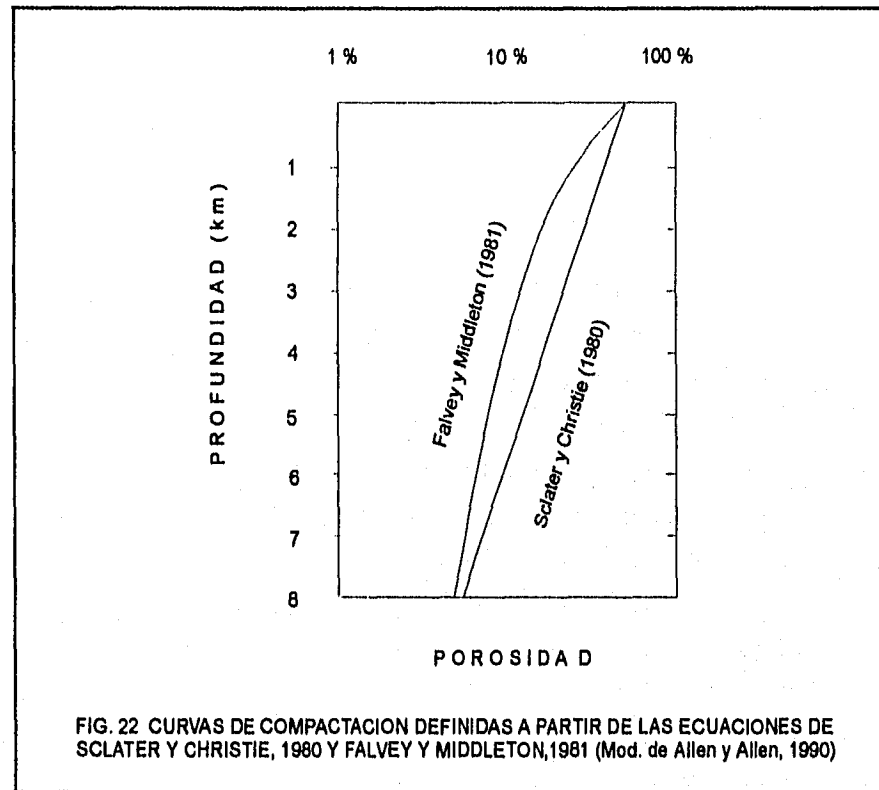


FIG. 21 REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL PRINCIPIO DE DESCOMPACTACION  
(Mod. de Bessis, F., 1986)



## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA



$$\frac{1}{1-\phi(y)} = \sum \frac{C_i}{1-\phi_i(y)}$$

en donde:

$\phi(y)$  = Ley de porosidad promedio de la formación

$C_i$  = Proporción de volumen del componente litológico "i" en la unidad

$\phi_i(y)$  = Porosidad del componente litológico "i" a la profundidad "y"

Tomando en cuenta que el **espesor actual** de una unidad sedimentaria se encuentra delimitado en una gráfica porosidad-profundidad, por un intervalo de profundidad dado entre  $y_1 - y_2$  (HB en la Fig. 21), y que el **espesor descompactado** en algún punto del pasado, estará representado en la misma gráfica en el intervalo dado entre  $y'_1 - y'_2$  (HA en la Fig. 21), éste último está definido matemáticamente por las siguientes expresiones:

## ANALISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

para el caso de Sclater y Christie (Allen y Allen, 1990),

$$y'_2 - y'_1 = (y_2 - y_1) - \frac{\phi_0}{c} (e^{-cy_1} - e^{-cy_2}) + \frac{\phi_0}{c} (e^{-cy'_1} - e^{-cy'_2})$$

en donde:

- $y'_2 - y'_1$  = Espesor descompactado de la unidad
- $y'_1$  = Profundidad determinada de la cima de la unidad
- $y'_2$  = Profundidad determinada de la base de la unidad
- $y_2 - y_1$  = Espesor compactado actual de la unidad
- $y_1$  = Profundidad actual de la cima de la unidad
- $y_2$  = Profundidad actual de la base de la unidad
- $\phi_0$  = Porosidad en la superficie o inicial
- $c$  = Coeficiente de la pendiente de la curva de compactación
- $e$  = Exponencial

y en el caso de Falvey y Middleton (Allen y Allen, 1990).

$$y'_2 - y'_1 = (y_2 - y_1) - \frac{1}{k} \ln \frac{\frac{1}{\phi_0} + ky_2}{\frac{1}{\phi_0} + ky_1} + \frac{1}{k} \ln \frac{\frac{1}{\phi_0} + ky'_2}{\frac{1}{\phi_0} + ky'_1}$$

en donde los parámetros adicionales son:

- $k$  = Coeficiente o factor de compactación
- $\ln$  = Logaritmo natural

### 11.1.4. PALEOBATIMETRIA

La estimación de la profundidad del agua prevaeciente durante el depósito de las diversas unidades sedimentarias de una

cuenca, es uno de los aspectos importantes que se debe tener en consideración en el seguimiento y reconstrucción del profundizamiento que ésta última experimenta durante su evolución, a fin de analizar más adecuadamente la historia de sepultamiento ya

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

que, las variaciones espaciales en paleobatimetría reflejan la evolución de la morfología de la cuenca.

Así, la paleobatimetría influye, por un lado, en la posición espacial absoluta que, a través del tiempo guardan el piso marino, la cima y la base de las unidades sedimentarias y la cima del basamento, y por otro, de cierta manera, en la magnitud de los espesores estratigráficos que de las unidades sedimentarias se pueden desarrollar, ya que constituye el espacio disponible para la acumulación.

La estimación de la paleobatimetría se lleva a cabo la mayor parte de las veces de manera indirecta, ya que la disponibilidad de indicadores directos de profundidad es limitada, y básicamente se realiza en función de tres tipos de datos, considerados ya sea individual o colectivamente, siendo esto último lo más recomendable, los cuales son de carácter:

- bioestratigráfico
- de facies sedimentarias y/o,
- de rasgos geoquímicos distintivos

Los estudios bioestratigráficos, esto es, los análisis de los organismos fósiles presentes en las diferentes unidades de una secuencia sedimentaria, se consideran como los de mayor confiabilidad, ya que la distribución de algunas especies está directamente relacionada a un

ambiente deposicional característico, y éste, a una cierta profundidad del tirante de agua.

Estos estudios se realizan ya sea de manera cualitativa, mediante la comparación o analogías de las tendencias de las condiciones de vida que se realizan de las ocurrencias fósiles con ocurrencias modernas de ciertas especies o conjuntos de organismos filogenéticamente relacionados, principalmente de tipo bentónico, o de manera cuantitativa, por medio de la obtención de las frecuencias relativas que se guardan entre organismos planetónicos/bentónicos o foraminíferos arenáceos/calcareos, por porcentajes de radiolarios, por número y diversidad de especies y especies dominantes, entre otros parámetros.

Por otra parte, las facies sedimentarias, que son definidas a partir de un conjunto de litofacies, las cuales se describen a partir de ciertos atributos como son los rasgos litológicos distintivos, la composición, el tamaño de grano, estructuras sedimentarias, entre otras cosas, que son interpretadas en términos de haberse formado bajo condiciones similares, se pueden referir a procesos o eventos deposicionales, o ambientes deposicionales particulares, y éstos a su vez, relacionarse con condiciones paleobatimétricas específicas.

Las estimaciones paleobatimétricas pueden ser consideradas con una relativamente mayor precisión en áreas de aguas someras, mientras que, las de aguas profundas, tienden a ser a menudo algo menos precisas.

### III. 1. 5. EUSTATISMO

Las fluctuaciones absolutas que el nivel del mar ha tenido a escala global en el pasado geológico, definidas por las variaciones de distancia que éste tuvo en relación al centro de la tierra (Allen y Allen, 1990), pero que comúnmente son referidas con respecto a la posición que el nivel del mar actualmente guarda, conocidas también como las variaciones eustáticas del nivel del mar, resultan de cambios en la cantidad de agua presente o disponible dentro de las cuencas oceánicas, o de cambios en el volumen de estas cuencas oceánicas.

Cuatro fenómenos geológicos de carácter global o regional se han referido como las posibles causas para que estos cambios de volumen puedan llevarse a cabo (Allen y Allen, *op. cit.*):

-1) Diferenciación continua del material litosférico como un resultado de procesos de la tectónica de placas. Un volumen considerable de agua puede ser adicionado a partir del vulcanismo de las dorsales y los arcos de islas, o por el contrario, removida por alteración hidrotermal de corteza nueva y en zonas de subducción.

-2) Cambios en la capacidad volumétrica de las cuencas oceánicas causados por los cambios de volumen en el sistema de cordilleras centro-oceánicas. Una mayor cantidad o proporción de generación de piso o coteza oceánica en las dorsales, repercute en una disminución del tamaño de las cuencas oceánicas y, con el mismo volumen de agua, el nivel eustático se incrementa.

-3) Cambios en la capacidad volumétrica de las cuencas oceánicas debidos al influjo o la sustracción de sedimentos. Un aporte importante de sedimentos tiende a provocar la disminución del volumen o espacio de la cuenca, y con esto, un ascenso del nivel eustático.

-4) Reducción de agua disponible por concentración de ésta en los casquetes polares y glaciares. Aquí, conservándose sin cambio el volumen de la cuenca, el nivel eustático tiende a mostrar un decremento.

Actualmente se cuenta con varias estimaciones cuantitativas de estas fluctuaciones del nivel del mar a través del tiempo, algunas de las más difundidas son las presentadas, por medio de curvas, por Vail, P. R. *et al.* (1977) y Haq, B. U. *et al.* (1987) (Fig. 23), las cuales están basadas en correlaciones mundiales de rasgos estratigráficos de varias márgenes.

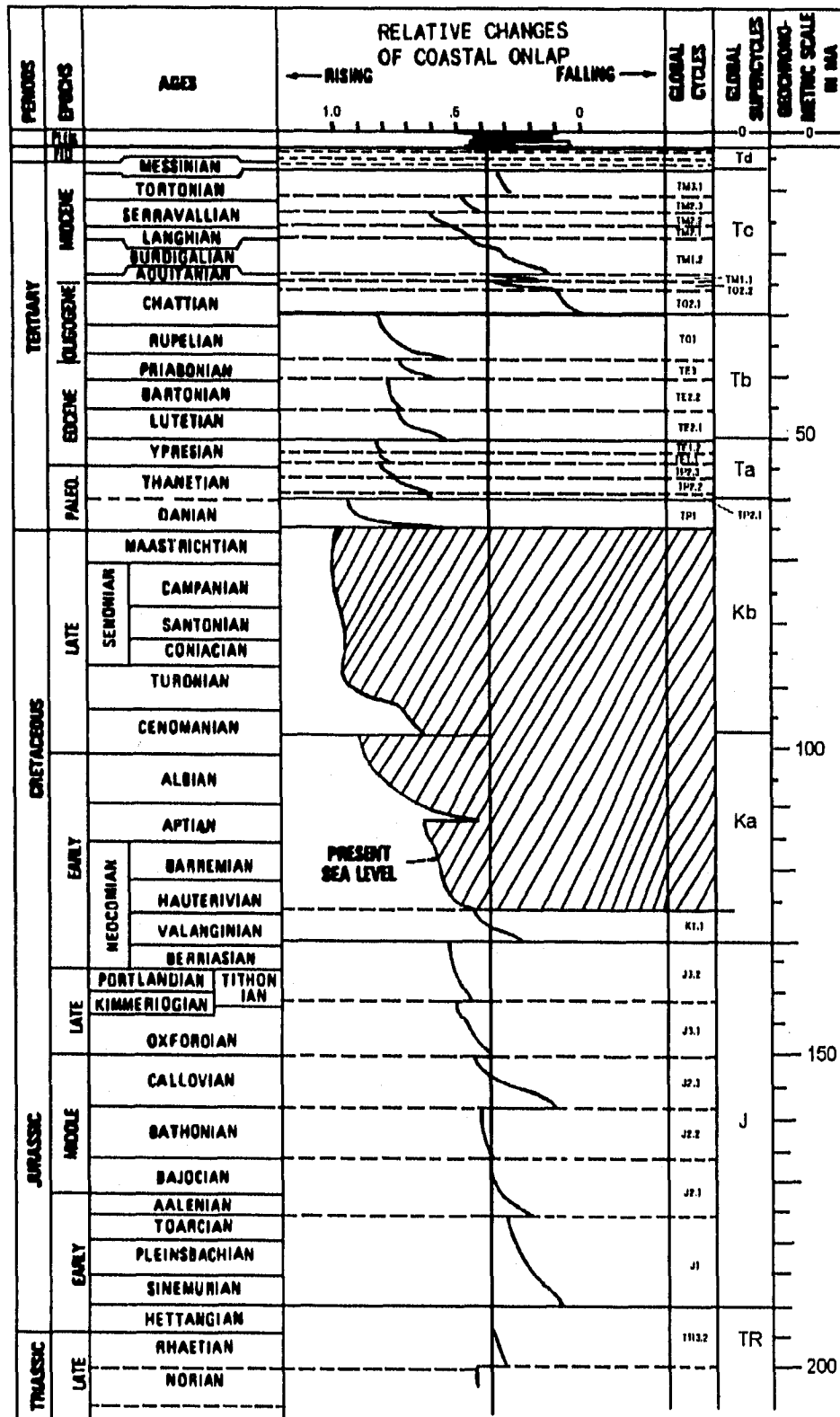


FIG. 23 CURVA DE EUSTATISMO DE VAIL Y OTROS (1977)  
 (Tomada de Soquet, P., 1989)

Sin embargo, aunque aún existe controversia en cuanto a la exactitud de estas curvas, ya que algunos otros autores señalan que en esas estimaciones no se han tomado en cuenta únicamente los efectos eustáticos, sino también, efectos de procesos tectónicos (Bessis, F., 1986; Souquet, P., 1989; Allen y Allen, 1990), con lo que los valores obtenidos parecen estar sobrestimados, por otro lado, existen otros muchos autores también, que se manifiestan en completo acuerdo con las tendencias generales de las fluctuaciones del nivel del mar a través del tiempo allí bosquejadas, esto es, con un incremento global del Jurásico al Cretácico Tardío, y un descenso generalizado durante el Terciario (Fig. 23).

Como se puede ver, la paleobatimetría y las variaciones eustáticas del nivel del mar son datos difíciles de estimar con exactitud; por lo que, siendo parámetros importantes dentro de la definición de la historia de subsidencia de una cuenca determinada, si no son bien considerados, pueden introducir un rango de error significativo.

### III.1.6. "BACKSTRIPPING"

El método "backstripping", es la técnica de análisis que permite obtener directamente la subsidencia tectónica de una determinada cuenca sedimentaria, mediante la sustracción de los efectos provocados por la carga sedimentaria en la subsidencia total, en la que

se toman en cuenta correcciones por descompactación, paleobatimetría y eustatismo. Se puede realizar considerando que la respuesta isostática de la litósfera a una carga sedimentaria, se lleva a cabo bajo alguno de los dos modelos siguientes:

- Isostasia Tipo Airy; o
- Modelo Flexural.

En el primer modelo se considera que la litósfera no presenta resistencia lateral, por lo que cualquier columna vertical de carga colocada sobre ella, viene a ser compensada de forma local, esto es, a manera de una litósfera cortada por varias fallas, en donde cada bloque da una respuesta particular.

Por otro lado, en el segundo modelo se considera que los efectos de la carga se distribuyen más allá del punto o área de la litósfera que la soporta directamente, por lo que los esfuerzos y deformaciones resultantes son transmitidos lateralmente a través de la litósfera por medio de una flexura regional.

El método "backstripping" bajo un modelo de Isostasia Tipo Airy, proceso que se encuentra mostrado diagramáticamente en la Figura 24, corresponde con un balanceo simple de las masas presentes en una columna determinada, en el cual se remueve la carga sedimentos ( $S^*$ ), y también, la carga de agua debida a los cambios en el nivel del mar con respecto al nivel actual ( $\Delta SL$ ), tomando en cuenta la paleobatimetría ( $Wd$ ) del depósito de éstos

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

sedimentos (Steckler y Watts, 1978), obteniéndose la profundidad del basamento (Y) con sólo el peso del agua como factor de carga (Bond y Kominz, 1984; Miall, A. D., 1990).

Este proceso de remoción de cargas superficiales del basamento, implica la consideración de las densidades de los sedimentos, agua y manto, lo que desde un punto de vista matemático, se encuentra descrito por la siguiente ecuación (Steckler y Watts, 1978):

$$Y = \left[ S^* \frac{(\rho_m - \rho_s)}{(\rho_m - \rho_w)} \right] + Wd - \left[ \Delta SL \frac{\rho_m}{(\rho_m - \rho_w)} \right]$$

en donde:

Y = Profundidad del basamento en ausencia de cargas superficiales (Km)

S\* = Espesor de sedimentos descompactados (Km)

$\rho_m$  = Densidad media del manto (Kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_s$  = Densidad media de los sedimentos saturados de agua (Kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_w$  = Densidad media del agua (Kg/m<sup>3</sup>)

Wd = Espesor de la capa de agua (Batimetría) (Km)

$\Delta SL$  = Nivel eustático del mar (Km)

El efecto de subsidencia isostática de la carga de sedimentos se estima mediante la aplicación del factor obtenido de la sustracción de la densidad de los sedimentos y del agua de la

densidad del manto, el cual resulta de carácter adimensional, al espesor de sedimentos descompactados (corregidos por compactación). De esta manera, la profundidad del basamento Y que se obtiene, representa la subsidencia tectónica.

Se debe tener en consideración que el espesor de la columna sedimentaria (S\*), puede estar constituido por una o varias unidades y estar dividido en varios intervalos, usualmente formaciones o miembros, y por lo tanto con una variación de la densidad y porosidad de los sedimentos, dependiendo del grado de sepultamiento de cada unidad. Así, la densidad media de los sedimentos saturados, un parámetro requerido por la ecuación anterior, se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\rho_s = \frac{\{\sum_i [\phi_i \rho_w + (1 - \phi_i) \rho_g] T_i\}}{S^*}$$

en donde los parámetros adicionales que aquí se tienen son:

i = Número de intervalos o unidades de la columna

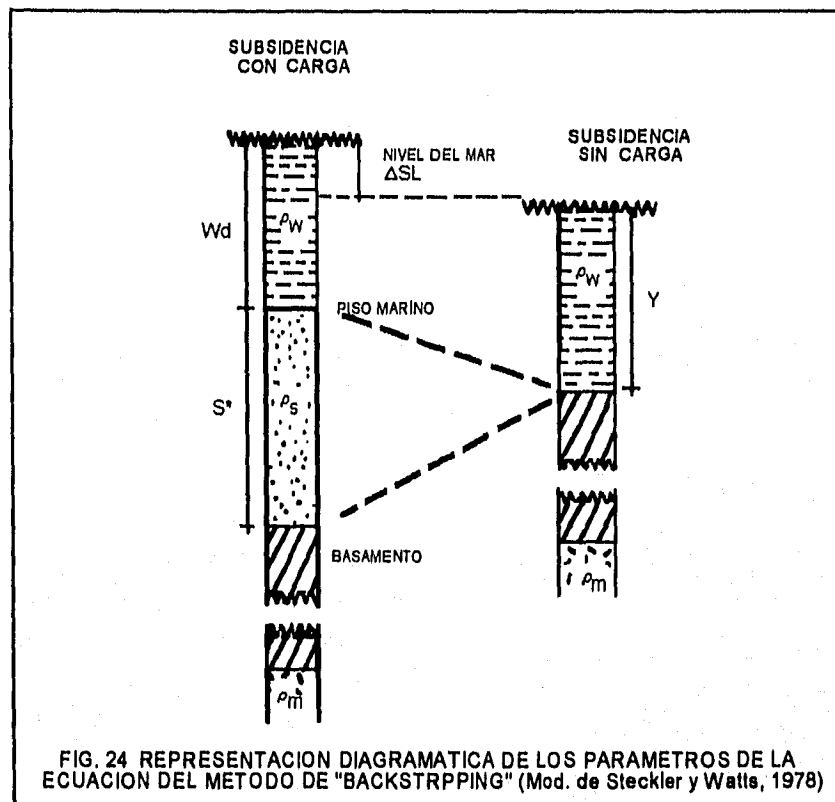
T<sub>i</sub> = Espesor del intervalo i

$\phi_i$  = Porosidad del intervalo i

$\rho_g$  = Densidad del grano del sedimento

Por otro lado, para la realización del "backstripping" bajo un modelo flexural, dado que la deflexión del basamento se relaciona con una geometría definida por la parte que

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA



constituye la depresión de una onda de carácter periódico o sinusoidal de longitud de onda ( $\lambda$ ), y por lo tanto una depresión de magnitud  $\lambda/2$ , la cual es producto de tener en cuenta un espesor de carga sedimentaria distribuida lateralmente hacia ambos lados del punto de análisis, esto es, un área de carga rectangular, en la remoción de los efectos de ésta última en el primer término de la ecuación de Steckler y Watts (1978) se toma en cuenta un factor exponencial, ya que el perfil de deflexión del basamento se caracteriza con un comportamiento lateral de este tipo, definido con la magnitud de esta longitud de onda ( $\lambda$ ) y

con la de la mitad del ancho horizontal de dicha área de carga ( $a$ ), factor que se describe como (Watts y Ryan, 1976):

$$(1 - e^{-(\lambda a)} \cos \lambda a)$$

en donde:

- c = Exponencial
- $\lambda$  = Longitud de onda (Km)
- a = Mitad del ancho de carga sedimentaria rectangular (Km)



## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

y en donde  $\lambda$  se obtiene de:

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{(\rho_m - \rho_w)g}{4D}}$$

donde:

D = Rigidez flexural (Nm)  
g = Gravedad (m/s<sup>2</sup>)

$\rho_m$  = Densidad media del manto (Kg/m<sup>3</sup>)  
 $\rho_s$  = Densidad media de los sedimentos (Kg/m<sup>3</sup>)  
D = Rigidez flexural (Nm)  
g = Gravedad (m/s<sup>2</sup>)  
 $\lambda$  = Longitud de onda (Km)

### III.1.7. SUBSIDENCIA TECTÓNICA

Con esta consideración, Watts y Ryan (1976) señalan que por medio del método de "prueba y error", a partir de una determinada configuración de la carga de sedimentos, lo que proporciona valores de S\* y a, se busca los valores que describan las profundidades de la curva de subsidencia total (flexión regional) y la configuración que mejor explique ésta última, se toma para representar la subsidencia tectónica.

Por su parte Allen y Allen (1990), bajo los mismos argumentos anteriores, señalan también que la subsidencia tectónica se puede obtener multiplicando la ecuación de Steckler y Watts (1978) por un factor al que denominan grado de compensación de la carga (C) dado por:

$$C = \frac{(\rho_m - \rho_s)}{\rho_m - \rho_s + \frac{D}{g} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4}$$

en donde:

La Subsidencia Tectónica indica el hundimiento que experimentó el basamento de la cuenca en ausencia de carga de sedimentos; su comportamiento en el tiempo, revela los mecanismos tectónicos de la cuenca y su relación a cambios de las propiedades corticales y desarrollo térmico.

Tres procesos geológicos principales son los que se han referido como los responsables de que se dé lugar al desarrollo de la subsidencia tectónica dentro de las cuencas sedimentarias (Watts y Ryan, 1976; Steckler y Watts, 1978):

- **Estiramiento Cortical.** Ocasionado por extensión regional, y al cual se relaciona la ocurrencia de levantamiento, erosión subaérea y adelgazamiento cortical;

- **Enfriamiento Térmico de la Litósfera.** Un evento desarrollado posteriormente al estiramiento cortical; y

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

- **Metamorfismo Cortical Profundo.** Un proceso que provoca un incremento en la densidad de la corteza.

McKenzie, D. (1978) por su parte, tomando en cuenta también la acción de estos procesos, describió el desarrollo en el tiempo de la subsidencia tectónica de una cuenca, conformado por dos etapas o fases principales consecutivas. A la primera de ellas la refirió bajo el nombre de **Subsidencia Inicial**, mientras que a la segunda la denominó como la **Subsidencia Térmica o Termotectónica**.

La etapa de la **Subsidencia Inicial** se relaciona con un evento de estiramiento cortical de la litósfera, y se asocia estrechamente con un aumento de la termicidad, ya que, debido al estiramiento que experimenta la litósfera, se provoca un marcado adelgazamiento de la misma, lo cual repercute en el ascenso y acercamiento de la astenósfera hacia la superficie y esto, a su vez, ocasiona que se incremente notablemente el gradiente geotérmico allí presente (Fig. 25 a y b).

Souquet, P. (1989) se refiere a esta primera etapa de subsidencia tectónica como **Subsidencia Mecánica** y la define como producto esencialmente del estiramiento horizontal de la corteza que se adelgaza por el basculamiento y rotación de bloques corticales dentro de un régimen distensivo.

La segunda fase, la de la **Subsidencia Térmica o Termotectónica**, se relaciona con el posterior enfriamiento que sufre el material astenosférico ascendido durante la primera

etapa, lo que hace que éste se transforme en litósfera, incrementándose nuevamente el espesor de ésta última (Figs. 25 b y c).

Este reajuste térmico viene a estar caracterizado por una importante disminución en el gradiente geotérmico, ya que se tiene la tendencia de alcanzar el equilibrio que existió antes del estiramiento, ocasionando un aumento en la densidad y la consecuente subsidencia (Fig. 25).

Desde el punto de vista tectónico, la primera de estas etapas se relaciona con la fase "rift" o de apertura de una cuenca extensional, esto es, con la etapa de fracturamiento y fallamiento, mientras que, la segunda de éstas, se asocia a la fase post-"rift", que se caracteriza como una etapa flexural (McKenzie, D., 1978; Dewey, J. F., 1982; Miall, A. D., 1990).

La subsidencia tectónica de una cuenca sedimentaria se encuentra estrechamente relacionada al grado de estiramiento y adelgazamiento que llega a experimentar la litósfera, el cual es referido como el **Factor de Estiramiento  $\beta$**  (Fig. 25). Cuando este es igual a la unidad (1), significa que no hubo estiramiento y que el ancho de la cuenca no se modificó. Cuando es igual a 2, indica que esta dimensión se duplicó.

En función de este factor de estiramiento y de las relaciones de los espesores iniciales de corteza y litósfera, la subsidencia tectónica teórica para cada una de sus dos etapas, puede ser estimada matemáticamente a partir de las ecuaciones siguientes:

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

en el caso de la Subsistencia Inicial, referida como  $S_i$ , por:

$$S_i = \frac{H_L \left[ (\rho_m - \rho_c) \frac{H_c}{H_L} \left( 1 - \alpha_v \frac{T_m H_c}{2 H_L} \right) - \frac{\alpha_v T_m \rho_m}{\rho_m (1 - \alpha_v T_m)} \right] \left[ 1 - \frac{1}{\beta} \right]}{\rho_m (1 - \alpha_v T_m) \rho_s}$$

en donde:

$\beta$ = Factor de estiramiento	$T_m$ = Temperatura de la astenósfera (°C)
$H_L$ = Espesor inicial de la litósfera (Km)	$\rho_m$ = Densidad del manto (Kg/m <sup>3</sup> )
$H_c$ = Espesor inicial de la corteza (Km)	$\rho_c$ = Densidad de la corteza (Kg/m <sup>3</sup> )
$\alpha_v$ = Coeficiente volumétrico de expansión térmica (1/°C)	$\rho_s$ = Densidad media de los sedimentos (Kg/m <sup>3</sup> )

El coeficiente volumétrico de expansión térmica se refiere al cambio fraccional de volumen de los materiales rocosos que se registra por variación de la temperatura.

Para el caso de la Subsistencia Termotectónica, denominada simplemente como  $S_t$ , la ecuación es:

$$S_t = \left( \frac{4 H_L \alpha_v \rho_m T_m}{\pi^2 (\rho_m - \rho_s)} \right) \frac{\beta}{\pi} \operatorname{sen} \frac{\pi}{\beta} \left( 1 - e^{-t/\tau} \right)$$

en donde los parámetros adicionales son:

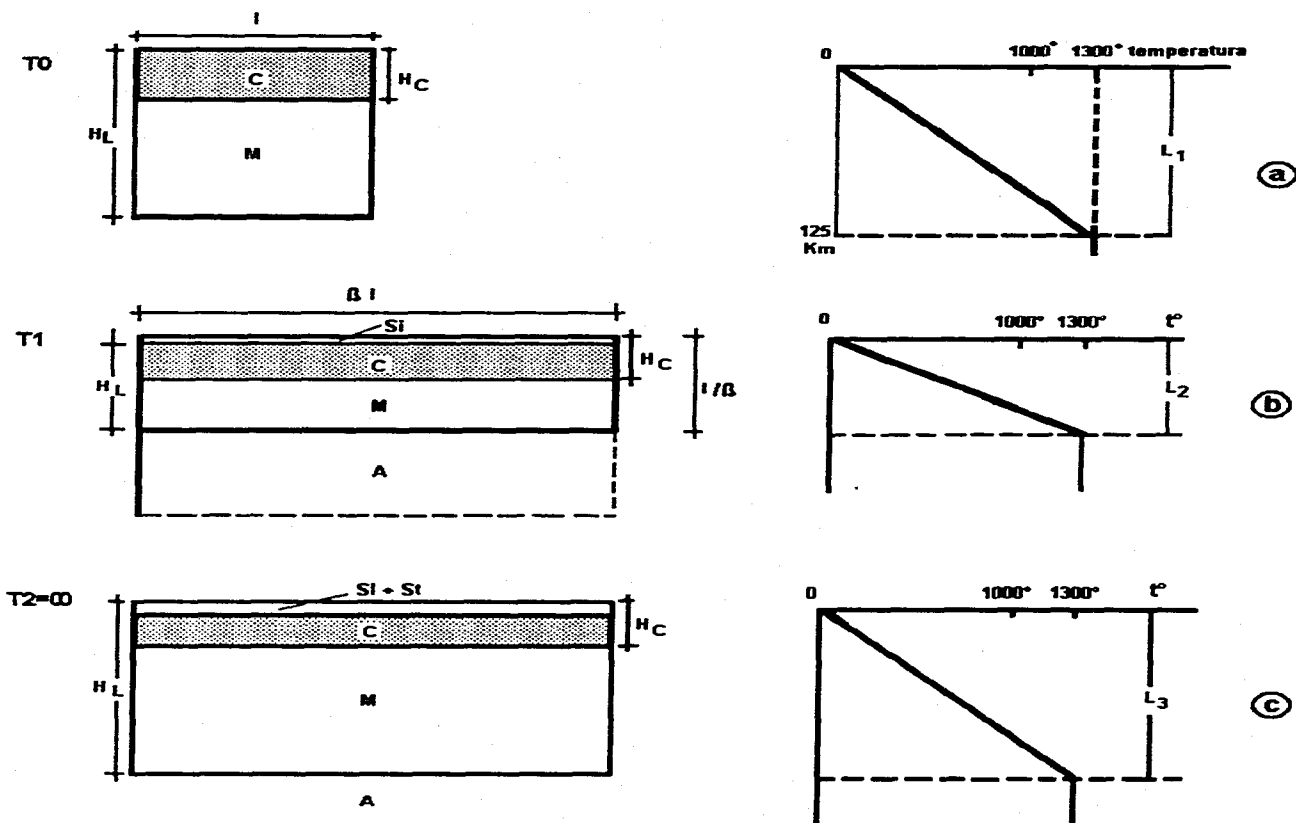
- $t$  = Tiempo desde la finalización de la etapa "rift" (Ma)
- $\tau$  = Constante de tiempo térmico

La constante de tiempo térmico se refiere al tiempo de difusión de un incremento de calor a través de la litósfera.

En la Figura 26, se presentan las curvas de subsidencia tectónica teóricas, tanto de la inicial ( $S_i$ ) como de la termotectónica ( $S_t$ ), que han sido definidas para valores específicos del factor de estiramiento  $\beta$ , considerando espesores promedio de corteza de 31.2 Km y de litósfera de 125 Km (Dewey, J. F., 1982).

La cantidad de subsidencia tectónica, en Km, puede ser obtenida en el eje de las Y (eje de las ordenadas), en donde la primera se comienza a medir desde el origen, y la segunda a partir de la finalización de esta inicial.

Característicamente, la pendiente de la subsidencia inicial se marca con una pendiente bastante pronunciada, mientras que, la subsidencia termotectónica lo hace con una pendiente suave o poco pronunciada.



- |           |               |                              |            |                          |
|-----------|---------------|------------------------------|------------|--------------------------|
| Ⓒ CORTEZA | Ⓕ LITOSFERA   | Ⓔ SUBSIDENCIA INICIAL        | Ⓗ ESPESOR  | Ⓔ FACTOR DE ESTIRAMIENTO |
| Ⓓ MANTO   | Ⓖ ASTENOSFERA | Ⓕ SUBSIDENCIA TERMOTECTONICA | Ⓛ LONGITUD | Ⓣ TIEMPO                 |

**FIG. 25 ESQUEMA DE EVOLUCION DE LA LITOSFERA BAJO EL MODELO DE MCKENZIE.**  
 (Mod. de McKenzie, D., 1978; Souquet, P., 1989)

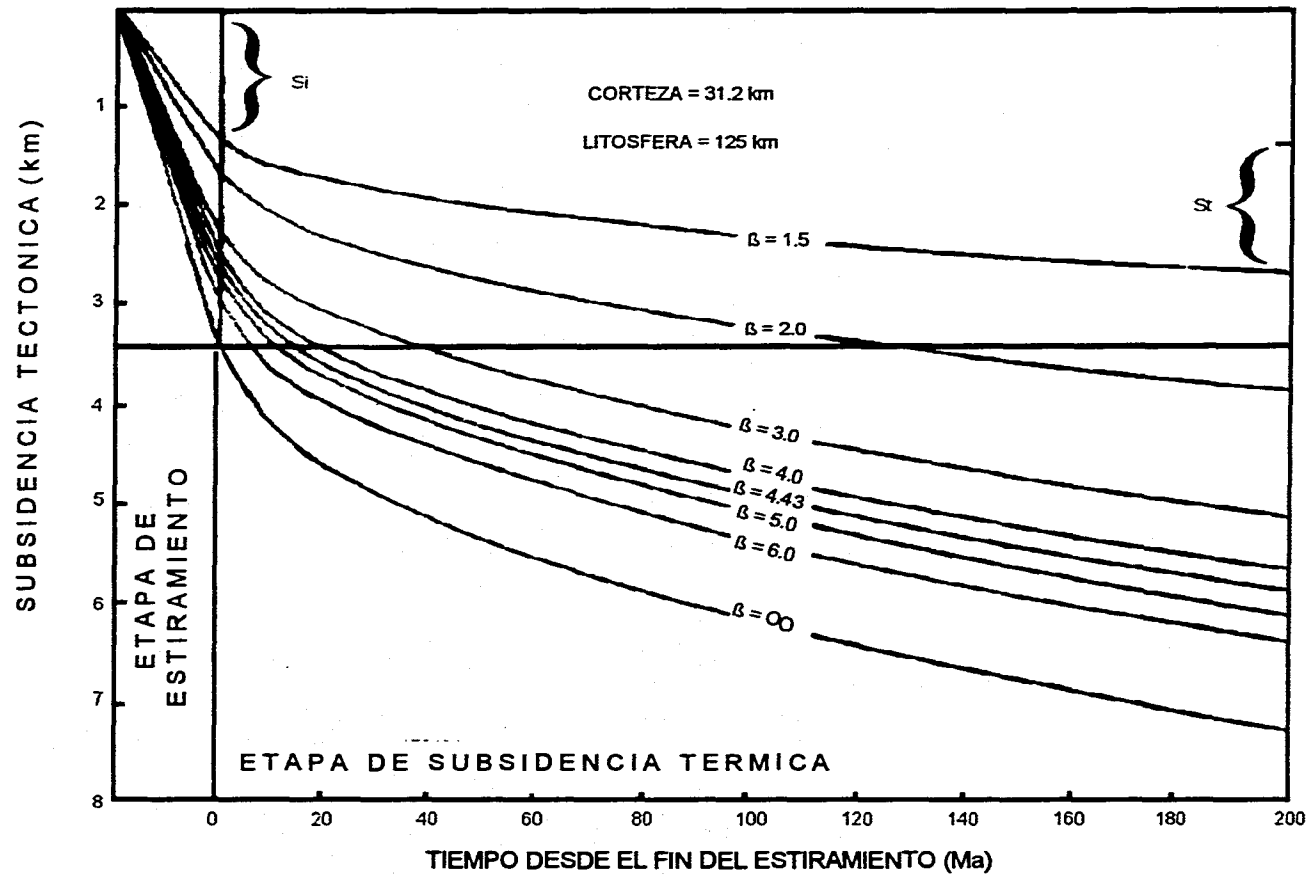


FIG. 26 CURVAS DE SUBSIDENCIA TECTONICA TEORICAS PARA DIFERENTES VALORES DE  $\beta$   
 (Mod. de Dewey, J.F., 1982)

### III.2. ANALISIS DE SUBSIDENCIA DE LA SECCION

El modelado de la subsidencia de la sección de estudio, además de la información que a este respecto proporciona, permite visualizar, al mismo tiempo, algunas características específicas, también modeladas numéricamente, de las diferentes series estratigráficas presentes. Estas características están relacionadas a la época del depósito de dichas series (como son los espesores descompactados de depositación, porosidad inicial, tasas de sedimentación), a su evolución (como la variación de los espesores o de la porosidad) y aún a su comportamiento durante el sepultamiento (como el hecho de que sean más fácil o más difícilmente compactables).

A continuación se realizará primero el análisis y descripción de lo referente a éste último aspecto, mediante la caracterización de las curvas de compactación de cada una de las series estratigráficas; después se abordará lo relativo a las cuestiones del depósito y la evolución en tiempo y espacio, también de cada serie, en lo que se denomina la historia de sepultamiento para, por último, tratar la subsidencia total y tectónica y sus implicaciones geodinámicas.

#### III.2.1. CURVAS DE COMPACTACION

Cada una de las series estratigráficas que conforman la cubierta sedimentaria de la

sección de estudio, dado que son composicionalmente diferentes, guardan también diferencias en:

- el valor de la porosidad inicial de depósito,
- la manera en la cual, y el grado en el que, esta propiedad intrínseca de los materiales sedimentarios disminuye cuantitativamente con el sepultamiento, un comportamiento que de manera general se sintetiza esquemáticamente por medio de las curvas de compactación.

De hecho, el análisis de las curvas de compactación de las diferentes series estratigráficas de la cubierta sedimentaria de la sección, proporciona información acerca de la respuesta de cada una de esas series al proceso de la compactación por sepultamiento.

La porosidad inicial con que se caracteriza a cada una de dichas series estratigráficas, debido a que la composición litológica de éstas últimas se describe como una mezcla en diferentes proporciones de varias litologías puras como son la arenisca, lutita, caliza, etc., se estima mediante la interpolación proporcional de los valores medios de porosidad inicial de las litologías puras involucradas, los cuales han sido reportados a partir de determinaciones experimentales. En las tablas de las Figuras 27 y 28 se muestran, respectivamente, valores medios de porosidad inicial de algunas litologías puras, y los valores obtenidos en el presente trabajo para cada una de las series de la cubierta sedimentaria de la sección.

ANALISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

LITOLOGIA	$\Phi$ (%)
ARENISCA	45
LIMOLITA	55
LUTITA	60
CALIZA	60
DOLOMIA	60
EVAPORITA	0
CARBON	90
IGNEO	0

FIG. 27 TABLA DE VALORES DE POROSIDAD INICIAL DE ALGUNAS LITOLOGIAS PURAS (de BasinMod, 1992)

SERIE ESTRATIGRAFICA	$\Phi$ (%)
PLEISTOCENO	51
PLIOCENO	52
MIOCENO	54
OLIGOCENO	54
EOCENO	55
PALEOCENO	57
CRETACICO SUPERIOR	60
CRETACICO MEDIO	60
CRETACICO INFERIOR	60
JURASICO SUPERIOR	58
SAL	3

FIG. 28 TABLA DE VALORES DE POROSIDAD INICIAL DE LAS SERIES DE LA CUBIERTA SEDIMENTARIA DE LA SECCION

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

De aquí se puede ver que las lutitas, calizas y dolomías, que son de las rocas de ocurrencia más común en una cuenca sedimentaria, son las que presentan una alta porosidad inicial, mientras que, las evaporitas y el material ígneo, son de las que característicamente carecen de esta propiedad ya que, no contienen espacios porosos iniciales (Perricr y Quiblier, 1974, BasinMod, 1992).

Así, la presencia de evaporitas o material ígneo en una determinada serie estratigráfica litológicamente heterogénea, repercute en la disminución de los valores estimados de porosidad inicial. Por el contrario, mientras mayor sea el porcentaje de materiales arcillosos o carbonatados que se manifieste en una serie, ésta se caracterizará con un valor más alto de porosidad inicial.

De las series estratigráficas de la cubierta sedimentaria de la sección, a la de la Sal, su valor de porosidad inicial calculado de 3 % (Fig. 28) la define como una serie prácticamente carente de porosidad. De hecho, este valor se obtiene debido al pequeño porcentaje de impurezas arcillosas considerado en su composición, ya que comúnmente la sal se describe con una porosidad nula (BasinMod, 1992).

Por su parte, a la serie Jurásico Superior, de características carbonatadas y terrígeno-arcillosas, se le calcula un valor de porosidad inicial relativamente alto, de 58 % (Fig. 28)

En las series carbonatadas del Cretácico por otro lado, el valor calculado de porosidad

inicial de 60 %, las caracteriza como las series más porosas al momento de su depositación

En las series del Cenozoico, las cuales son de carácter predominantemente terrígeno, se caracterizan valores de porosidad inicial paulatinamente menores en sentido estratigráfico normal, esto es, se pasa de un valor de 57 % para el Paleoceno, hasta un valor de 51 % para el Pleistoceno. Esto último se debe a la cada vez menor proporción de material arcilloso, y mayor de material arenoso, conforme se asciende estratigráficamente en las diferentes series.

En cuanto a la estimación de la disminución que de estos valores de porosidad inicial se lleva a cabo en cada una de las series de la cubierta sedimentaria de la sección, dado el sepultamiento al que éstas se han visto sometidas, el modelado que de ellas se realiza en el presente trabajo, toma en cuenta el método de Selater y Christie (1980), con el que se obtiene como resultado el valor de la porosidad que se presenta a una profundidad determinada, el cual es función de la litología de la serie estratigráfica y de la profundidad de su sepultamiento.

Se debe tener en cuenta que, dado que en este método de análisis de la variación de la porosidad se consideran solamente los efectos de la sobrecarga de sedimentos, lo que se denomina también compactación mecánica, y no los de la presurización de fluidos, la cementación o la diagénesis, que entre otros procesos geológicos también llegan a influir de



## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

manera importante en la evolución de la porosidad, los resultados obtenidos proporcionan un panorama bastante aproximado de dicha evolución.

Asimismo también, se debe tener en cuenta que en el presente modelado no se ha considerado el hecho de que la sal y las arcillas bajo presión de sepultamiento, son litologías que pueden fluir y desplazarse de manera lateral a zonas de menor presión e, incluso, intrusión dentro de los materiales sobreyacentes, con lo cual sus espesores podrían sufrir modificaciones.

De esta manera, los valores de porosidad que para cada una de las series se estiman a las distintas profundidades que fueron alcanzando con el sepultamiento, caracterizan en esas series una evolución muy particular de esta propiedad con respecto a la profundidad y, análogamente, la de la compactación por ellas experimentada.

Esta evolución se encuentra manifestada esquemáticamente, en las diferentes curvas de compactación de cada una de las series estratigráficas de la cubierta sedimentaria de la sección (Figs. 29 y 30), específicamente, en el comportamiento por ellas definido, el cual varía según el tipo de litología que caracteriza a las diferentes series.

Dicha variabilidad de comportamiento, se hace más evidente cuando se comparan las formas de las pendientes que definen las distintas

curvas de compactación, en gráficas de la misma escala, sobre todo tomando en cuenta la parte superior de la curva. Esto permite, también, caracterizar de manera relativa, la facilidad o dificultad de compactación que poseen las diferentes series estratigráficas, en función de la rapidez con que se desarrolla la disminución de la porosidad con el sepultamiento.

Una pendiente de forma relativamente más suave o poco pronunciada, es indicativa de una más rápida disminución de la porosidad con la profundidad, lo que implica una serie más fácilmente compactable. Por el contrario, una forma de pendiente más inclinada o más pronunciada, sugiere una disminución de la porosidad de manera más lenta, esto es, una serie más difícil de compactar.

La curva de compactación de la serie Sal (Fig. 29), cuya forma se define como una línea sensiblemente recta, es indicativa de que esta serie no experimentó modificaciones apreciables de porosidad con el sepultamiento, de hecho, las variaciones que se manifiestan en esta serie con el modelado, sólo son perceptibles matemáticamente. Del valor de porosidad inicial de 3 % que se le estima para el momento de su depósito, éste disminuye a 2.6 % alrededor de los 6000 m de profundidad y pasa a 2.5 % después de los 8000 m. Geológicamente estos valores, como ya se mencionó, califican a la serie desde un punto de vista práctico como carente de porosidad, lo cual se relaciona a su composición litológica que se caracteriza con un predominio de sal.

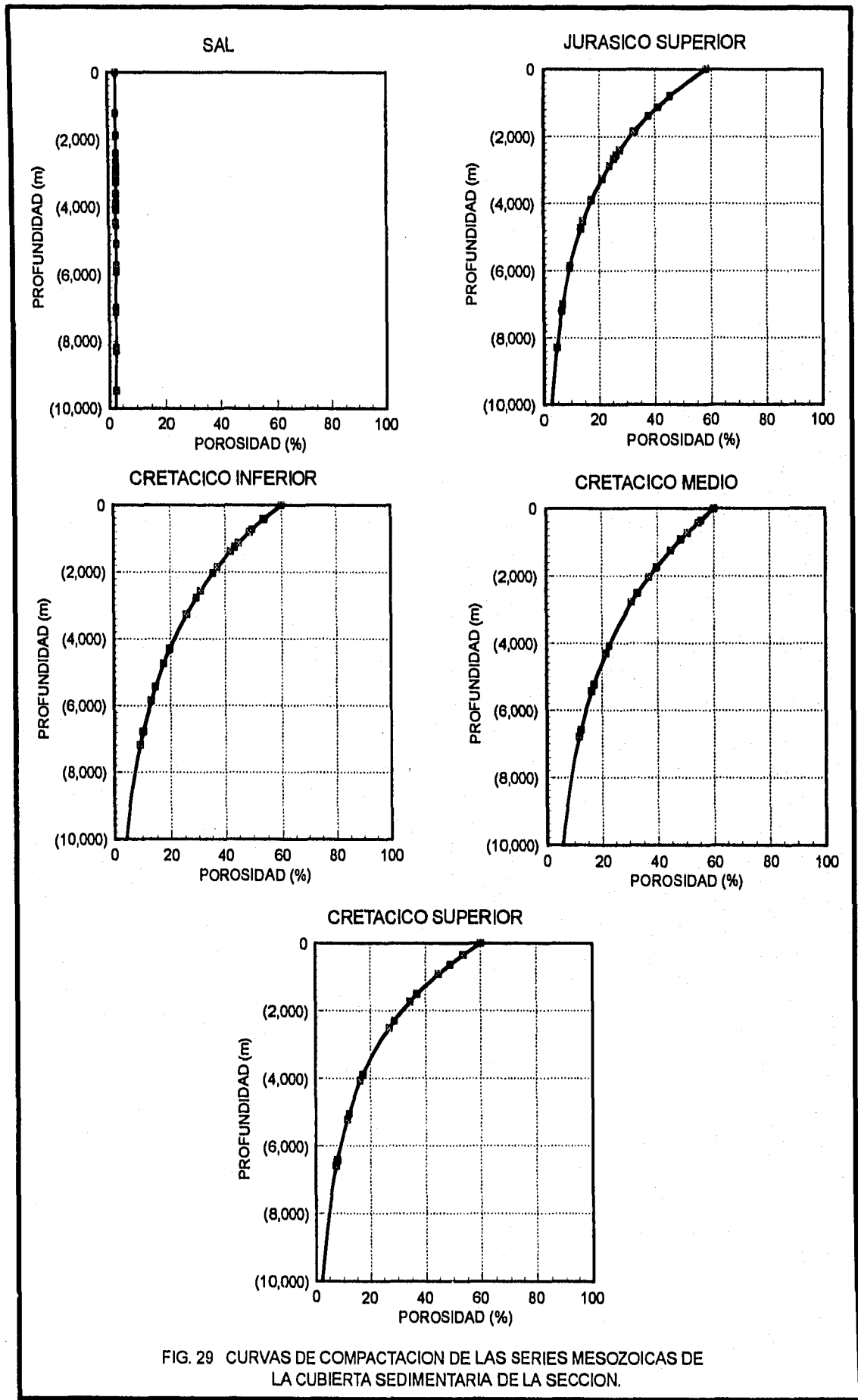


FIG. 29 CURVAS DE COMPACTACION DE LAS SERIES MESOZOICAS DE LA CUBIERTA SEDIMENTARIA DE LA SECCION.

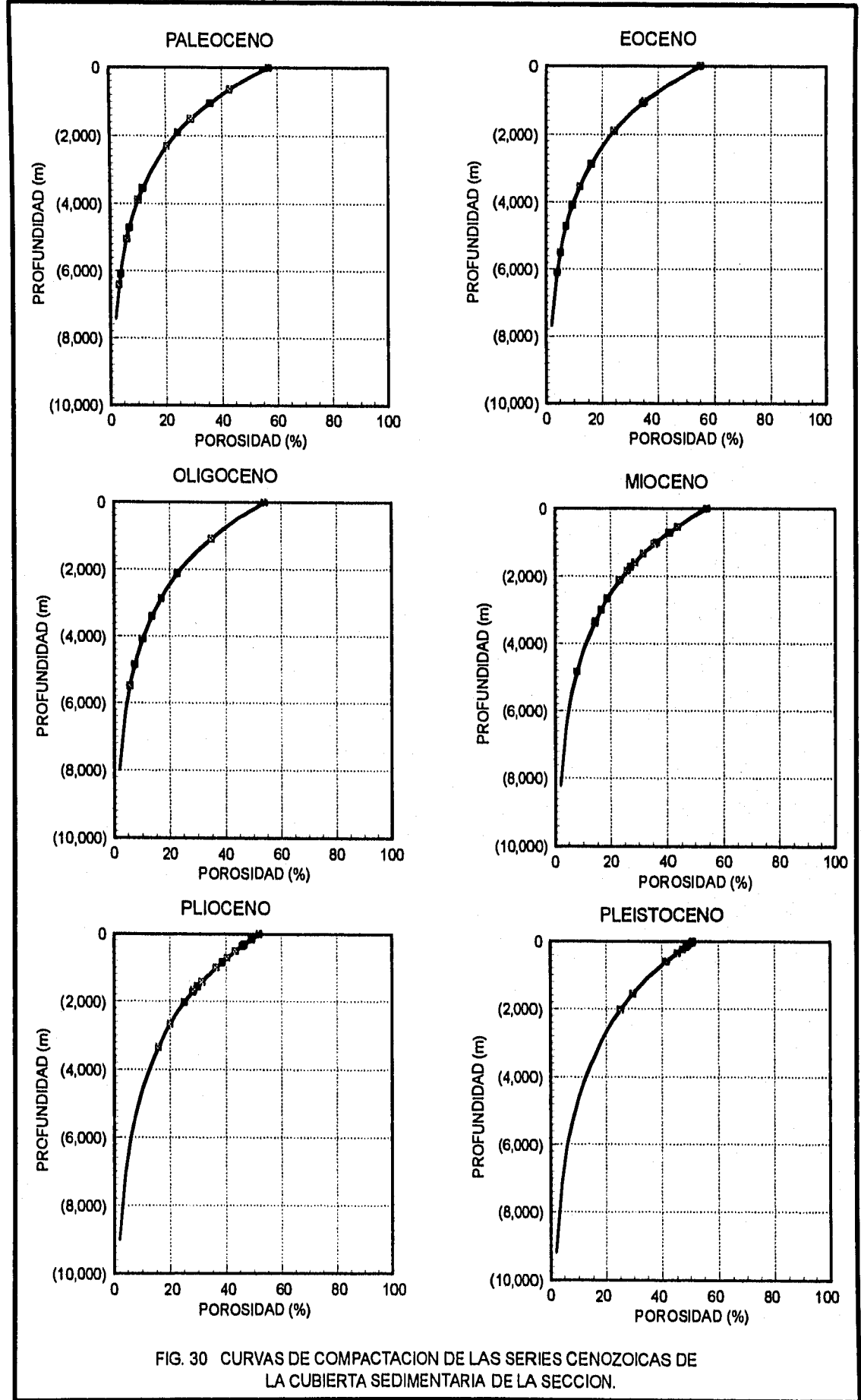


FIG. 30 CURVAS DE COMPACTACION DE LAS SERIES CENOZOICAS DE LA CUBIERTA SEDIMENTARIA DE LA SECCION.

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

La curva de compactación de la serie Jurásico Superior (Fig. 29), describe un comportamiento que indica que la porosidad de la serie disminuye de una manera relativamente rápida con el sepultamiento, teniéndose valores de porosidad de 40 % a alrededor de los 1200 m de profundidad, de 20 % antes de los 4000 m y de 10 % un poco antes de los 6000 m.

Lo anterior conlleva a considerar a esta serie como una de tipo fácilmente compactable, lo cual es una respuesta que se puede relacionar en gran parte a la alta proporción de materiales arcillosos contenidos en su composición litológica, los cuales, característicamente, no presentan mucha resistencia a la compactación.

Por lo que se refiere a las curvas de compactación de la serie Cretácico Inferior y Cretácico Medio (Fig. 29), éstas muestran un comportamiento bastante similar entre sí, aunque con una pendiente sensiblemente más pronunciada en la segunda. Este comportamiento manifiesta que la reducción de la porosidad por sepultamiento que se registra en ambas series, se lleva a cabo de manera relativamente más lenta que en la serie anterior.

En estas series, la variación de la porosidad alcanza un valor de 40 % a alrededor de los 1 800 m de profundidad, de 20 % después de los 4 000 m y de 10 % hasta después de los 7 000 m. Dicho comportamiento responde a que en la composición litológica de estas

series, se tiene la ocurrencia de una alta proporción de calizas, las cuales son materiales de carácter rígido, que dificultan la compactación.

La curva de compactación de la serie Cretácico Superior, se define con un comportamiento que es indicativo de una pérdida relativamente rápida de la porosidad con el sepultamiento (Fig. 29). De hecho, este comportamiento de la curva es muy similar al definido por la del Jurásico Superior, lo que también califica a la serie, como una serie del tipo fácilmente compactable. Esto es debido, a la alta proporción de materiales arcillosos, margas y lutitas, contenidos dentro de ella.

La curva de compactación de la serie Paleoceno (Fig. 30), de todas las curvas de las series de la cubierta sedimentaria de la sección, es la que manifiesta un comportamiento que caracteriza la proporción relativamente más rápida de pérdida de porosidad con el sepultamiento. Aquí los valores de porosidad de 40 % se alcanzan ya a una profundidad de alrededor de 800 m, mientras que 20 % se tiene un poco después de los 2000 m y 10 % a aproximadamente los 4000 m. Esta particularidad de la serie Paleoceno de manifestar una rápida compactación, se debe básicamente a la alta proporción de materiales arcillosos en ella contenidos.

La curva de compactación de la serie Eoceno (Fig. 30), muestra un comportamiento sensiblemente diferente a la del Paleoceno, ya que la pendiente que define se hace ligeramente

más pronunciada, indicando por tanto, una reducción de la porosidad con el sepultamiento de manera relativamente más lenta. Esta característica, es respuesta al hecho de que la proporción de materiales arcillosos presentes en esta serie, es menor que en la serie Paleoceno, además de que se tiene un mayor contenido de areniscas que son materiales que vienen a oponer más resistencia a la compactación.

En las curvas de compactación de las series Oligoceno, Mioceno, Plioceno y Pleistoceno respectivamente (Fig. 30), este incremento en la inclinación de la pendiente se manifiesta cada vez ligeramente más marcado, lo que significa que la reducción de la porosidad debido al sepultamiento en cada una de ellas, se realiza también de manera cada vez más lenta.

Este comportamiento es resultado de la paulatinamente menor proporción de materiales arcillosos que se tiene presente en esas series y del aumento a su vez, en ese mismo sentido, de la proporción de materiales arenosos.

Dados los comportamientos definidos por las curvas de compactación de todas las series estratigráficas de la cubierta sedimentaria de la sección, de una manera general, éstas últimas se pueden conjuntar en cuatro grupos principales, cada uno de los cuales manifiesta una diferente respuesta a la compactación con el sepultamiento:

- Series de compactación rápida: Las seis series cenozoicas.
- Series de compactación intermedia: Jurásico Superior y Cretácico Superior.
- Series de compactación lenta: Cretácico Inferior y Cretácico Medio
- Series no compactables: Sal.

### II.2.2. Historia de Sepultamiento

Los resultados obtenidos en el modelado de la evolución de la porosidad por sepultamiento, de cada una de las series estratigráficas de la cubierta sedimentaria de la sección (inciso anterior), permiten realizar estimaciones cuantitativas tanto de los espesores descompactados u originales de dichas series (ver Descompactación), como de las tasas o proporciones de sedimentación relacionadas a esos depósitos. Asimismo, cuando la variación de porosidad se analiza a través del tiempo, tomando como marco de referencia las respectivas edades de las diferentes series estratigráficas, permite visualizar cuantitativamente la evolución de dichos espesores descompactados desde el tiempo de su depósito hasta el tiempo actual, es decir, el diferente grado de compactación que fueron experimentando cada una de las series a lo largo de la sección, durante la evolución de la cuenca en la que ésta última se encuentra, esto es, la historia de sepultamiento.

### Sal

En el caso de la primera unidad sedimentaria de la sección, que es la Sal, el hecho de que manifieste una disminución de la porosidad por sepultamiento cuantitativamente pobre, característica que se marca de igual manera en la evolución a través del tiempo, ya que se define también una línea sensiblemente recta (Fig. 31), lo que se debe a que es una unidad que prácticamente carece de esta propiedad desde el momento mismo de su depósito, redundando en el espesor descompactado modelado que se le estima, el cual apenas si difiere del espesor actual que se le considera dentro del modelo geológico conceptual (Fig. 32).

Como se puede observar en la tabla de la Figura 32, de una manera general, el espesor reducido o compactado de la unidad es significativamente bajo, en promedio 4 m, en relación al espesor original de la unidad, lo cual viene a representar una disminución de solamente el 0.33 %. Se manifiesta también, que el espesor descompactado estimado de la unidad, no es lateralmente constante a lo largo de la sección, sino que se presenta con variaciones entre los diferentes puntos de referencia de ésta última, lo cual se debe al distinto grado de sepultamiento que alcanzó la unidad a través del tiempo en cada uno de dichos puntos de referencia y, por lo tanto, a los diferentes valores de porosidad adquiridos.

Estas variaciones laterales de los espesores descompactados a lo largo de la sección, son

perceptibles matemáticamente con el modelado, pero a la escala de la sección (Fig. 33), prácticamente no son apreciables. Incluso, la diferencia entre espesor descompactado y espesor actual, tampoco es distinguible a esta escala. En la Figura 33 se presenta una sección estratigráfica de la sección de estudio para el tiempo de los 163 Ma, a la finalización del Jurásico Medio, cuando se tenía sobre el basamento únicamente el depósito de la unidad Sal.

Los espesores descompactados de este depósito, redundan en que la unidad sea caracterizada con una tasa de sedimentación de 60 m/Ma (0.06 mm/año), una proporción sustancialmente baja cuando se compara con los valores promedio de entre 10 y 50 mm/año (> 10000 m/Ma), reportados para los depósitos de halita por evaporación (Einsels, G., 1992).

Esto conlleva a reconsiderar dos aspectos dentro del modelo geológico conceptual de la sección que fue tomado en cuenta para la realización del modelado; uno, que el intervalo de tiempo de 20 Ma (el Jurásico Medio), establecido para el depósito de esta unidad, resulta ser un período demasiado extenso y, dos, que el espesor de depósito manejado deba ser probablemente mayor. La primera posibilidad es la más viable ya que no se ha definido con detalle el rango de edad de esta unidad y, éste puede ser menor, posiblemente restringido sólo al Calloviense, como algunos otros autores lo han referido.

### Serie Jurásico Superior

En el caso de la serie Jurásico Superior, el análisis con respecto al tiempo de la variación de los valores de porosidad estimados con el modelado en cada uno de los puntos de control de la sección, los cuales se encuentran representados esquemáticamente en las gráficas Porosidad-Tiempo de la Figura 34 tomando como niveles de referencia las líneas de comportamiento definidas por la cima y la base de la serie, pone de manifiesto la distinta manera en que se llevó a cabo la disminución de la porosidad en cada localidad, así como los diferentes valores de porosidad que lateralmente se tienen en la sección para un tiempo determinado. De aquí, los menores valores de porosidad se asocian con un mayor sepultamiento de la serie, mientras que los valores mayores, por el contrario, se relacionan con un menor sepultamiento.

En las localidades de los pozos 10, 9, 2 y 3 (Fig. 34), es en donde respectivamente, se registran los valores más bajos de porosidad de la serie Jurásico Superior, lo que las caracteriza como los lugares de la sección en donde ésta última alcanzó una mayor profundidad de sepultamiento. Por el contrario, los mayores valores de porosidad, y el menor sepultamiento de la serie, se tienen en la localidades de los pozos 4 al 7.

Los valores numéricos estimados de la porosidad para la cima y la base de esta serie para el tiempo actual (porosidad final), en cada

uno de los puntos de control de la sección, se presentan en la tabla de la Figura 35.

La cima y la base de la serie, también para un tiempo determinado, se caracterizan con distintos valores de porosidad (Figs. 34 y 35), los cuales, tienden a ser mayores en la primera que en la segunda, ya que, cuando se daba la finalización de la acumulación de la serie, la cima apenas adquiría el valor de porosidad inicial (en este caso de 58 %), mientras que, hacia la base, la porosidad ya había sido reducida por sepultamiento.

El grado de reducción de esta diferencia de porosidad, por lo tanto, es función de la cantidad de sepultamiento que experimenta la serie, pero también depende del espesor de ésta última, ya que, la diferencia inicial debe ser de mayor magnitud en los espesores más gruesos que en los más delgados. La magnitud de esta diferencia se traduce directamente en el espesor de la serie.

El espesor descompactado estimado para la serie Jurásico Superior, viene a ser diferente en cada uno de los puntos de control de la sección (Fig. 35), manifestándose una variación de 129 m entre los espesores mínimo y máximo obtenidos por el modelado, los cuales se tienen desarrollados respectivamente, hacia la zona del Pozo 5, en donde se estimaron 1733 m, y del Pozo 10, al que se le refieren 1862 m.

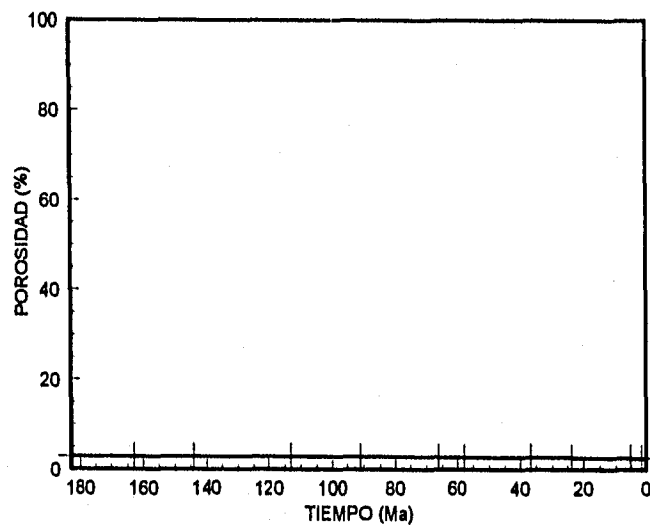
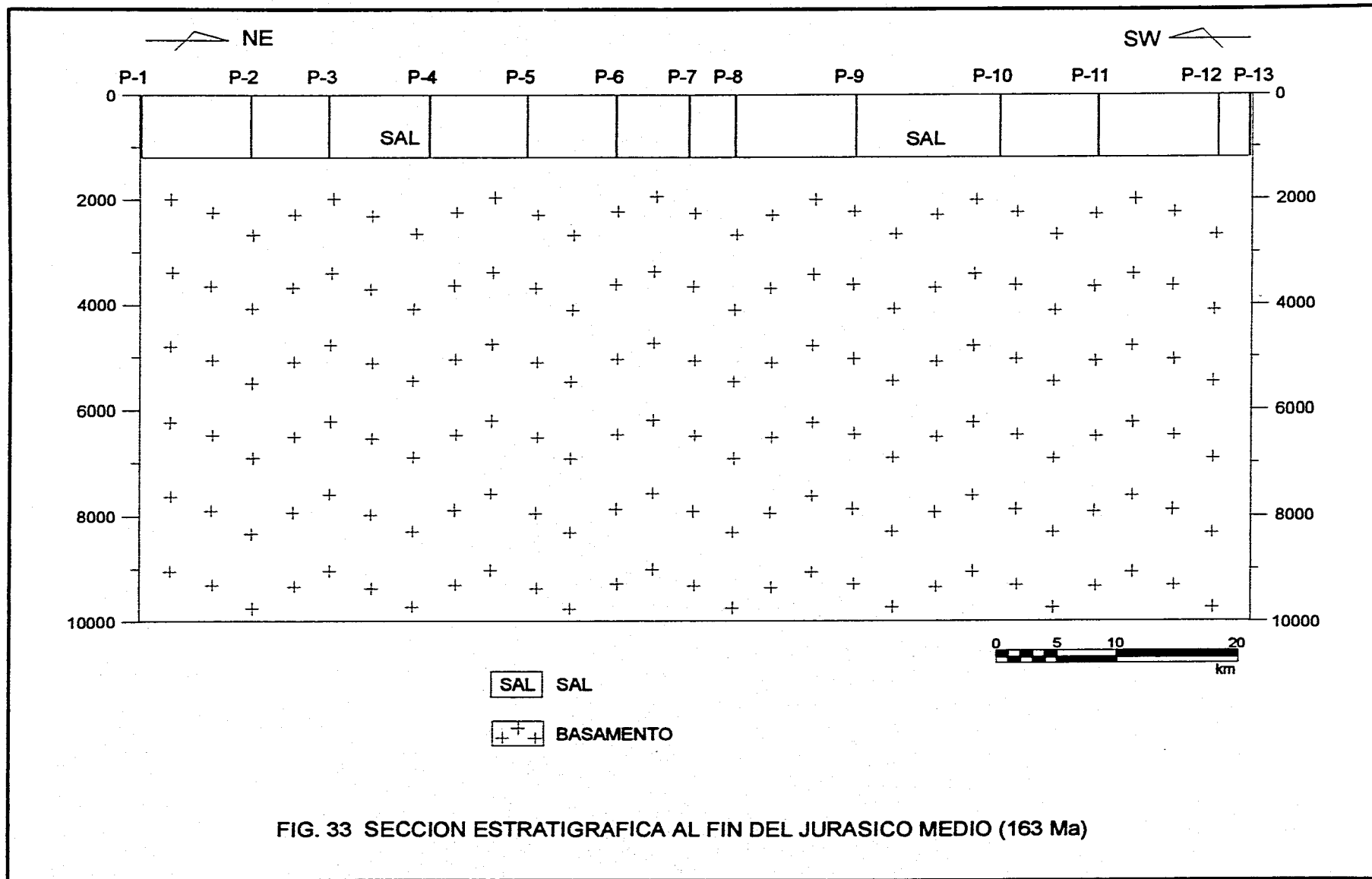


FIG. 31 VARIACION DE LA POROSIDAD DE LA UNIDAD SAL A TRAVES DEL TIEMPO

POZO	ESPESOR (m)	
	ACTUAL	DESCOMPACTADO
1	1200	1204.6
2	1200	1205.1
3	1200	1205.0
4	1200	1204.1
5	1200	1204.0
6	1200	1203.9
7	1200	1204.0
8	1200	1204.9
9	1200	1205.2
10	1200	1205.6
11	1200	1204.0
12	1200	1204.9
13	1200	1204.4

FIG. 32 TABLA DE ESPESORES DESCOMPACTADOS DE LA UNIDAD SAL





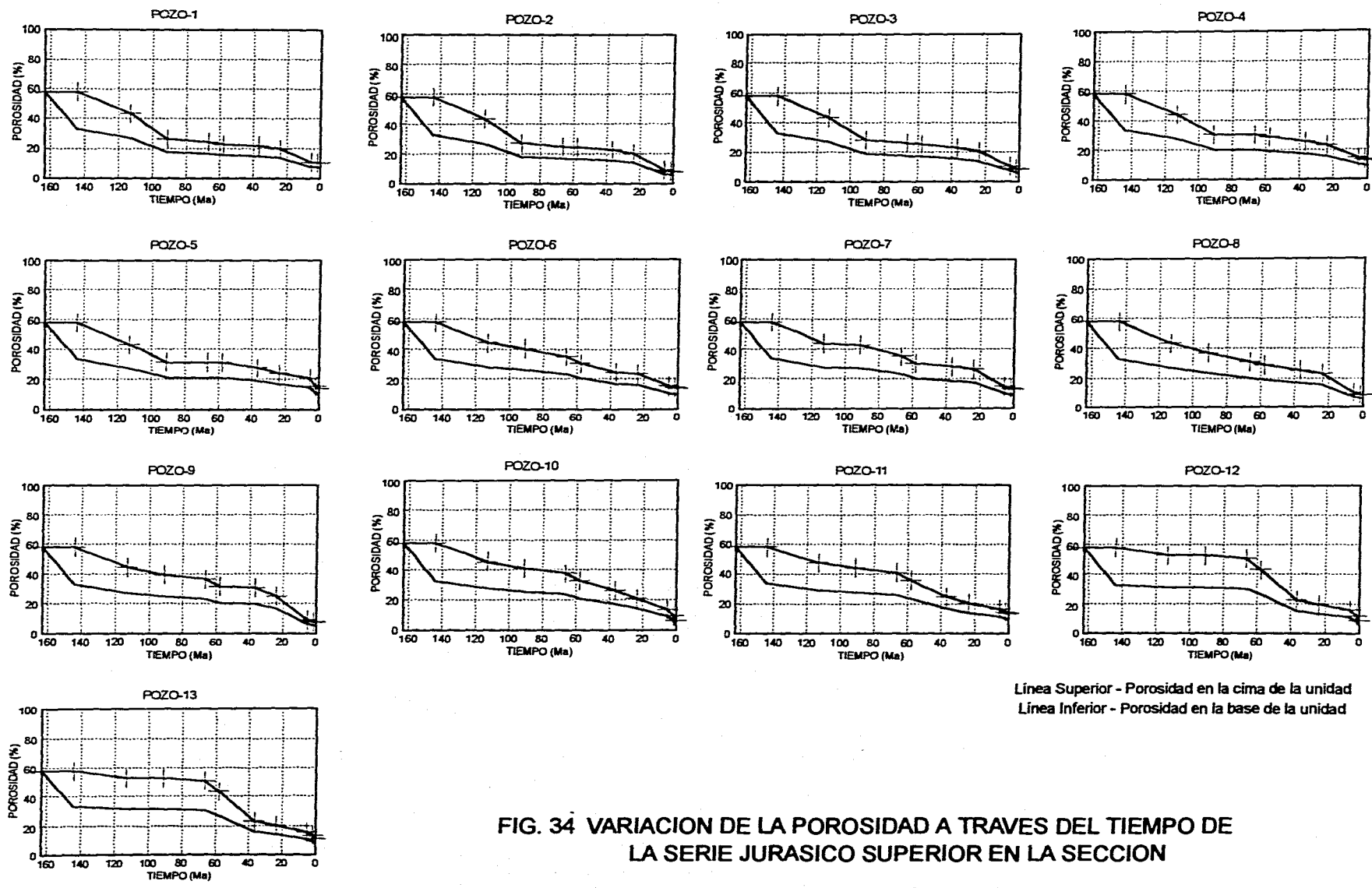


FIG. 34 VARIACION DE LA POROSIDAD A TRAVES DEL TIEMPO DE LA SERIE JURASICO SUPERIOR EN LA SECCION

ANALISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

POZO	POROSIDAD FINAL (%)		ESPESOR (m)		TASA DE SEDIMENTACION (m/Ma - mm/año)
	CIMA	BASE	ACTUAL	DESCOMPACTADO	
1	10.3	7.3	1100	1806.8	95 - 0.095
2	8.1	5.7	1100	1837.4	97 - 0.097
3	8.5	6.0	1100	1831.8	98 - 0.096
4	12.9	9.1	1100	1770.4	93 - 0.093
5	13.6	9.7	1100	1733.3	91 - 0.091
6	14.2	10.1	1100	1751.6	92 - 0.092
7	13.4	9.5	1100	1762.6	93 - 0.093
8	8.9	6.3	1100	1826.0	96 - 0.096
9	7.6	5.4	1100	1844.0	97 - 0.097
10	6.3	4.5	1100	1862.2	98 - 0.098
11	13.9	9.9	1100	1756.2	92 - 0.092
12	8.8	6.2	1100	1827.2	96 - 0.096
13	11.0	7.8	1100	1796.2	95 - 0.095

FIG. 35 TABLA DE POROSIDAD FINAL, ESPESOR Y TASAS DE SEDIMENTACION DE LA SERIE JURASICO SUPERIOR

Es conveniente tener en cuenta, que estos espesores descompactados no constituyen la aproximación más real que descablemente se pudiera considerar de la acumulación de la serie Jurásico Superior, ya que en la realización del modelado se parte de la consideración de un espesor final actual homogéneo de 1100 m. Las variaciones reales que éste último pudiera manifestar en la sección, incidirán directamente en los espesores descompactados calculados.

Teniendo en cuenta esta aclaración, las tasas de sedimentación de la serie relacionadas a estos espesores descompactados, son también sensiblemente diferentes. Estas varían de un valor mínimo de alrededor de 91 m/Ma (0.091 mm/año) hacia la zona del Pozo 5, a

un máximo de aproximadamente 98 m/Ma (0.098 mm/año) en la porción del Pozo 10 (Fig.35).

Dadas estas bajas proporciones de sedimentación obtenidas, es probable que procesos diagenéticos como los de presión-solución hayan influido de manera importante en la reducción del espesor de la serie, removiendo gran parte de los materiales inicialmente acumulados.

Considerando este depósito de la serie Jurásico Superior, se muestra en la Figura 36 mediante una sección estratigráfica, la disposición que presentaba la sección de estudio para el tiempo de los 144 Ma, época de finalización del depósito de dicha serie, y ahora ya con dos

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

series sedimentarias sobre el basamento, en la cual, la cubierta sedimentaria alcanza un espesor promedio de alrededor de 3 000 m.

En esta sección, los mayores espesores descompactados estimados del Jurásico Superior, definen una geometría de depósito caracterizada por el desarrollo de dos zonas o centros de acumulación o subsidencia (lugares con espesores máximos); uno, de dimensiones relativamente menores, localizado en la zona del Pozo 2 y, otro, ubicado hacia la porción de los pozos 9 y 10, de dimensiones relativamente mayores. Cuantitativamente, ambos se marcan como de carácter poco prominente, sobre todo, más el primero que el segundo (Fig. 36), en donde se estima un espesor descompactado de 1837 m y, por lo tanto, una proporción de sedimentación de 97 m/Ma (0.097 mm/año), los cuales son valores muy semejantes a los del Pozo 10.

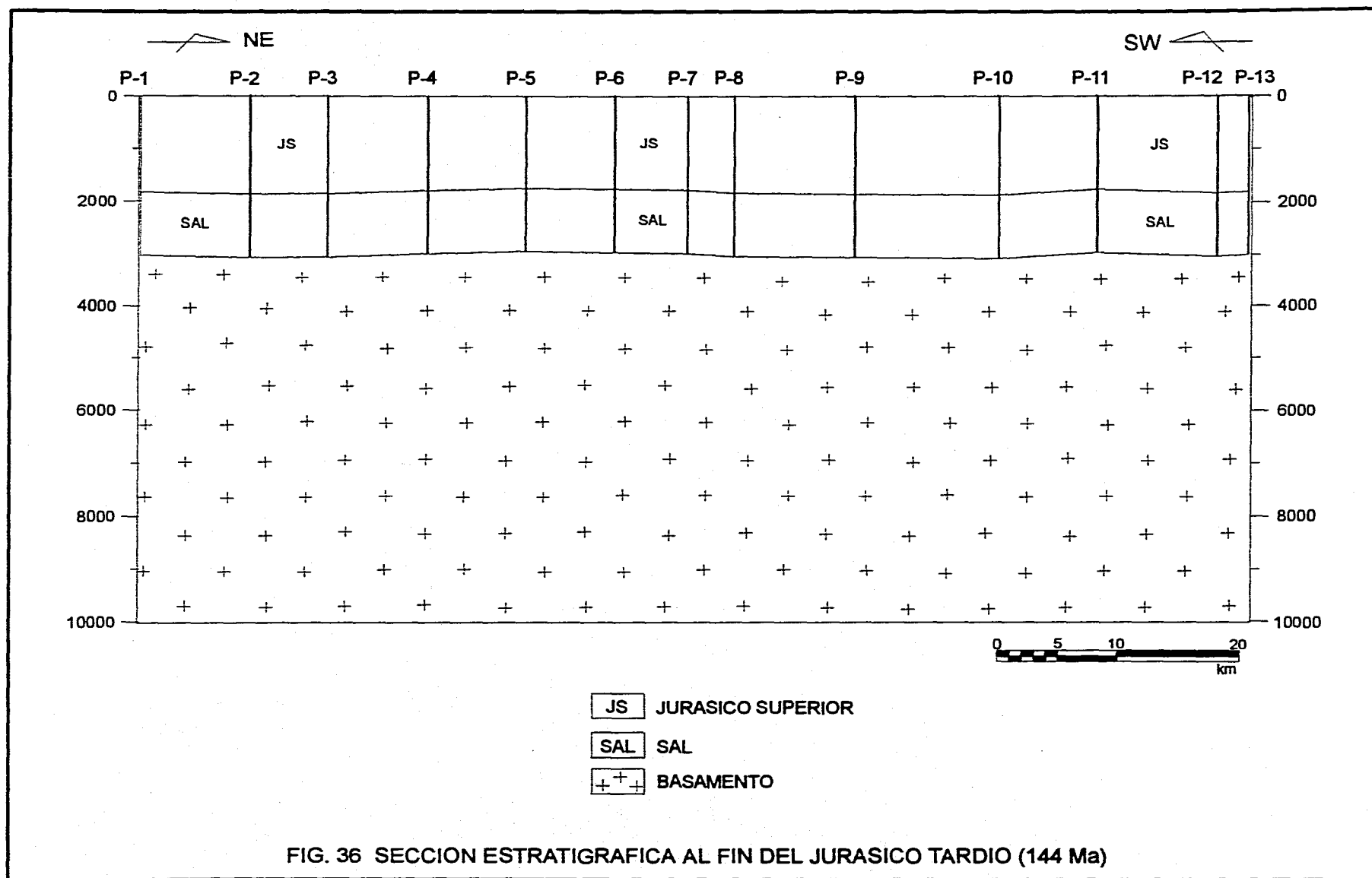
También, tomando en cuenta estos espesores descompactados de la serie Jurásico Superior, así como el espesor uniforme de 1 100 m que se le consideró a lo largo de la sección para el tiempo actual, la reducción de espesor por compactación que se manifiesta en la serie varía de un mínimo de 633 m en el Pozo 5, a un máximo de 762 m en el Pozo 10, valores que representan una proporción de disminución del orden del 37 % y del 41 % con relación al espesor original calculado respectivamente. Esta variabilidad del porcentaje de compactación de la serie, dependió del distinto grado de sepultamiento que a lo largo de la sección experimentó esta última.

Es conveniente aclarar nuevamente que tanto la geometría del depósito y porcentaje de compactación establecidas para la serie Jurásico Superior, se interpreta a partir de considerarle en el modelado un espesor uniforme para el tiempo actual, por lo que, un mejor conocimiento de esta relación a lo largo de la sección, repercutirá en una mejor definición de estas interpretaciones.

### Serie Cretácico Inferior

En la serie Cretácico Inferior, la mancha muy particular en la que se llevó a cabo la disminución de la porosidad por sepultamiento a través del tiempo, en cada uno de los diferentes puntos de control de la sección, se define por las diferentes pendientes que describen las líneas de comportamiento de la cima y la base de la serie en las gráficas Porosidad-Tiempo de la Figura 37, elaboradas a partir de los diferentes valores de porosidad estimados con el modelado.

En estas gráficas se puede ver que, para el tiempo actual los menores valores de porosidad de la serie (porosidad final), se tienen presentes en el Pozo 10, lo cual señala a la zona en la que se ubica, como la porción de la sección en la que el Cretácico Inferior experimentó el mayor sepultamiento. Por el contrario, los mayores valores de porosidad final, se tienen marcados en los pozos 5 y 6, indicando con esto que la porción en la que se encuentran, constituye la zona de menor sepultamiento de la serie.



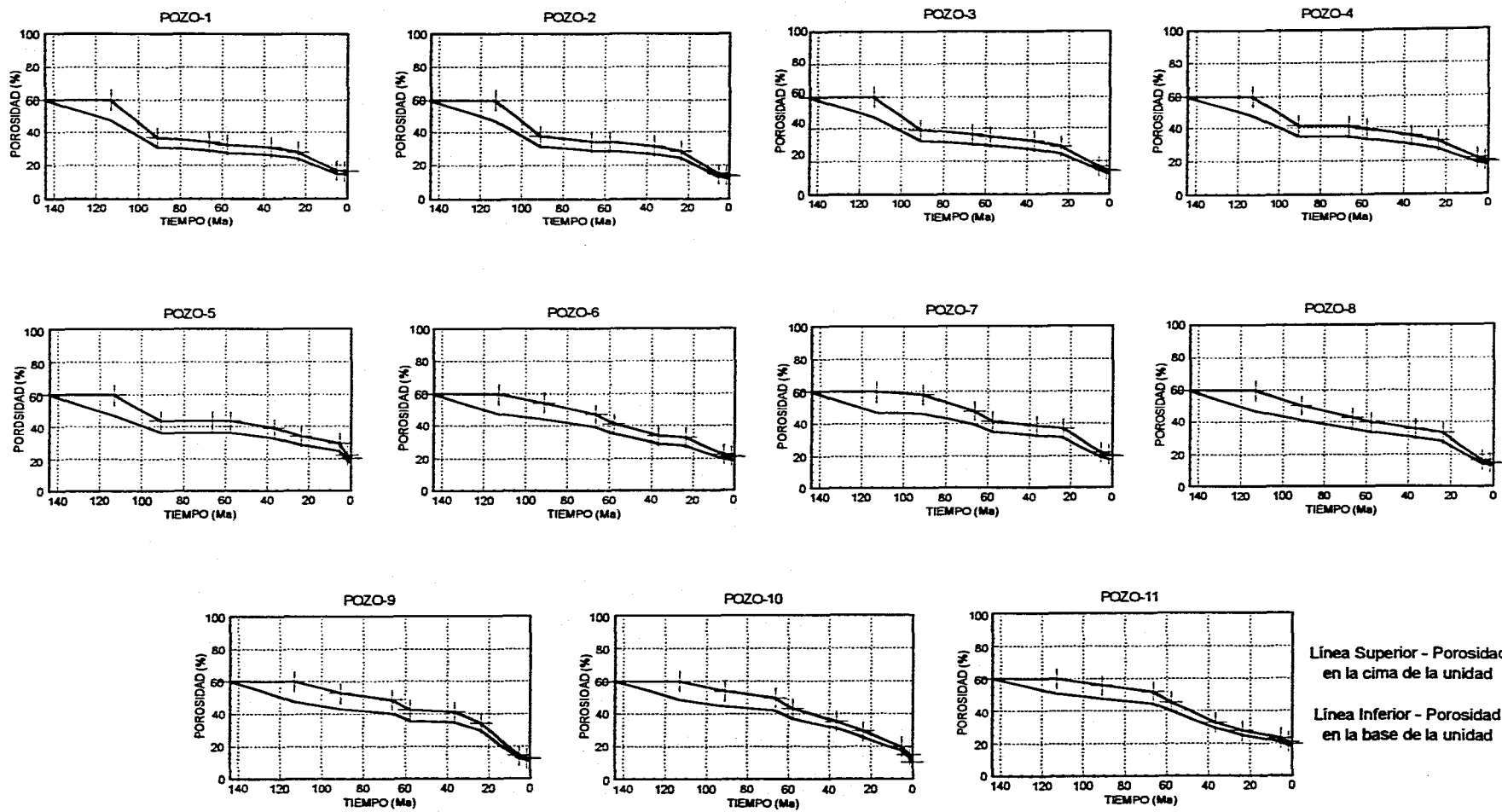


FIG. 37 VARIACION DE LA POROSIDAD A TRAVES DEL TIEMPO DE LA SERIE CRETACICO INFERIOR EN LA SECCION

## ANALISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

Los valores cuantitativos estimados de porosidad final para la cima y la base de esta serie en los diferentes puntos de control de la sección, se presentan resumidos en la tabla de la Figura 38. Para las localidades de los pozos 12 y 13 de la sección, no se elaboraron las respectivas gráficas de la serie Cretácico Inferior, debido a que, en el primero no se encontró presente esta unidad y, el segundo, toma en cuenta básicamente la columna del primero (Fig. 12).

El espesor descompactado estimado para esta serie, varía en cada uno de los puntos de control de la sección (Fig. 38), marcándose un máximo desarrollo de éste en la localidad del Pozo 5 y, un mínimo, en el Pozo 11. De una manera general, entre los pozos 1 al 8, no se manifiesta un contraste muy notable entre estos espesores, pero una disminución se registra de manera continua del Pozo 8 al Pozo 11.

La manifestación de un mayor espesor de la serie Cretácico Inferior hacia la porción suroccidental de la sección, responde al hecho de que, hacia esta parte, se tuvo el desarrollo del ambiente de plataforma para el Cretácico Temprano (Fig. 14).

Las proporciones de sedimentación de la serie Cretácico Inferior a lo largo de la sección, dado que son estimadas en función de los espesores originales de depósito, son también variables (Fig. 38). La mayor tasa de sedimentación se marca en la localidad del

Pozo 5 con 31 m/Ma (0.031 mm/año), mientras que la menor se tiene en el Pozo 11 con 20 m/Ma (0.020 mm/año).

Los mayores valores de proporción de sedimentación, predominan en la porción suroccidental de la sección, en estrecha relación con los depósitos de plataforma y la zona de influencia de ésta, mientras que, los menores valores se restringen a la zona de los pozos 9 al 11, la región relacionada ya propiamente con los depósitos de cuenca.

Las proporciones de sedimentación estimadas para esta serie resultan ser sustancialmente menores comparadas con tasas modernas o actuales reportadas para la precipitación de carbonatos en la región de las Bahamas, en donde se maneja un valor de 0.25 mm/año (250 m/Ma), o con la proporción que se promedia a partir de los depósitos en varios ambientes carbonatados, de varias localidades en el mundo para los últimos 5 000 años, la cual se marca como de 1 mm/año (1 000 m/Ma) (Wilson, J. L., 1975).

La fuerte discrepancia que se define entre las tasas de sedimentación aquí obtenidas y las actuales reportadas, radica en el hecho de que éstas últimas no deben ser valores de carácter lineal con respecto al tiempo, sino de un comportamiento intermitente, que puede disminuir o cesar abruptamente, para después volver a reactivarse. Esto se sugiere debido a que todas las proporciones de sedimentación de rocas carbonatadas obtenidas en secuencias

ANALISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

POZO	POROSIDAD FINAL (%)		ESPESOR (m)		TASA DE SEDIMENTACION (m/Ma - mm/año)
	CIMA	BASE	ACTUAL	DESCOMPACTADO	
1	16.0	14.0	500	912.51	29 - 0.029
2	13.0	11.5	500	938.53	30 - 0.030
3	13.6	11.9	500	933.62	30 - 0.030
4	19.3	17.0	500	882.68	28 - 0.028
5	20.5	17.7	550	950.39	31 - 0.031
6	21.0	18.4	510	882.76	28 - 0.028
7	20.1	17.6	525	914.49	29 - 0.029
8	14.1	12.4	500	928.73	30 - 0.030
9	12.2	10.9	450	860.80	28 - 0.028
10	10.3	9.3	400	788.79	25 - 0.025
11	19.8	18.1	350	634.97	20 - 0.020

FIG. 38 TABLA DE POROSIDAD FINAL, ESPESOR Y TASAS DE SEDIMENTACION DE LA SERIE CRETACICO INFERIOR

antiguas, son siempre de un orden de magnitud menor, comparadas con las tasas actuales o modernas.

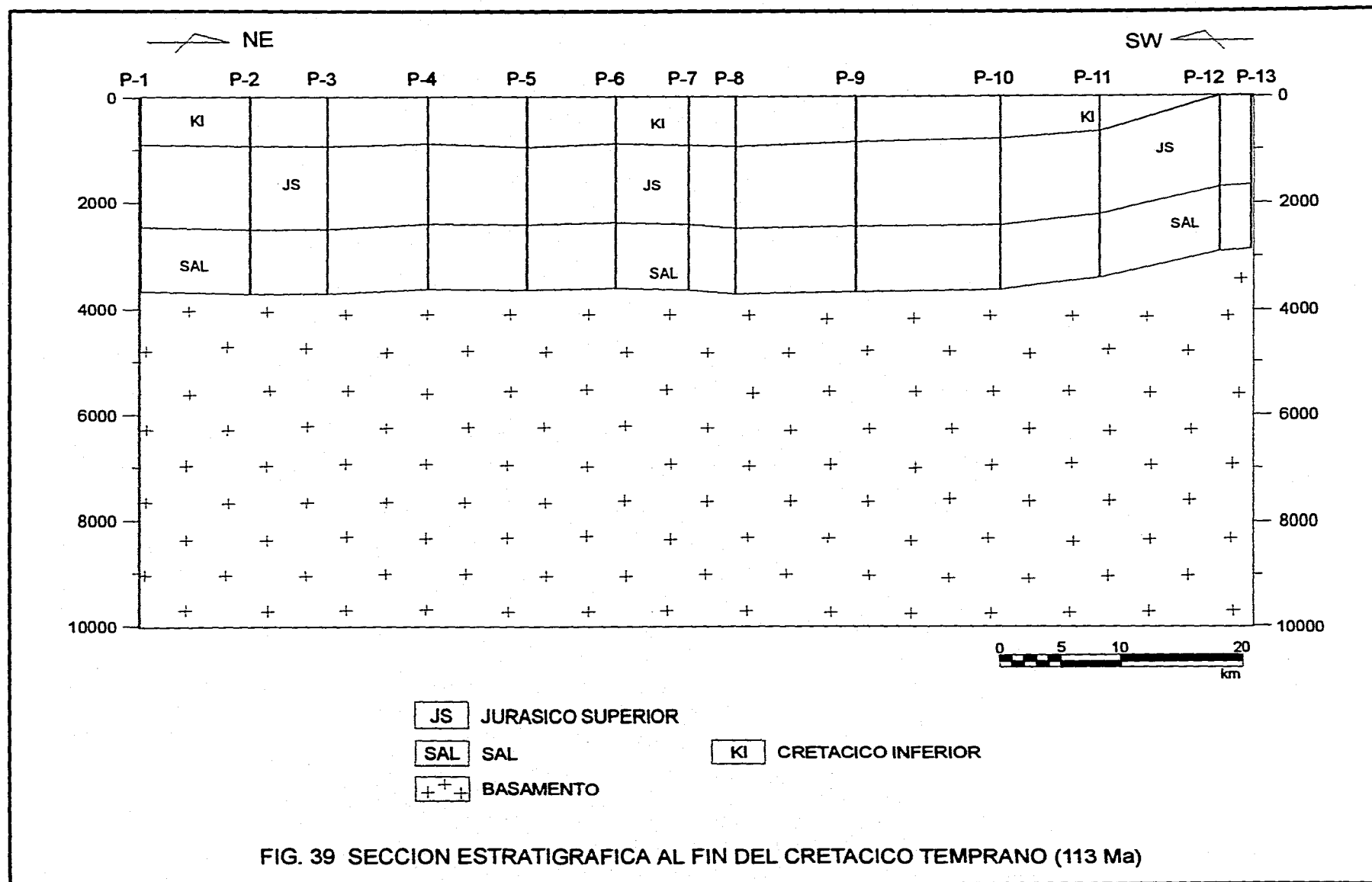
Una proporción de sedimentación promedio para secuencias antiguas de varias localidades en el mundo, es de 0.040 mm/año (40 m/Ma), considerando espesores sin corrección por compactación (Wilson, J. L., 1975).

También hay que tomar en cuenta el hecho de que en este tipo de materiales carbonatados, los procesos de presión-solución deben haber jugado un papel esencial en la ausencia de una cantidad importante de dichos materiales. Friedman y Sanders (1978) mencionan que se preserva sólo alrededor de una cuarta parte de

los sedimentos carbonatados depositados ya que, las otras tres cuartas partes son disueltas e introducidas como cemento en la porción preservada.

Con la acumulación de la serie Cretácico Inferior, el espesor de cubierta sedimentaria en la sección para los 113 Ma pasa a ser, en promedio, de alrededor de 3 600 m en la porción suroccidental, hasta el Pozo 10 aproximadamente, disminuyendo paulatinamente hacia la zona del Pozo 13, en donde es algo menor a los 3 000 m (Fig. 39). Aquí se debe tomar en cuenta que el espesor original o descompactado de la serie Jurásico Superior ya ha sido reducido un cierto grado por compactación.





## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

La relación entre espesor descompactado y espesor actual de la serie Cretácico Inferior, en cada uno de los puntos de control de la sección, proporciona el porcentaje de compactación que experimentó la serie con el sepultamiento. El porcentaje menor se marca cuantitativamente con un 42 % para la zona de los pozos 5 al 6, mientras que el mayor grado de reducción de espesor, con alrededor del 49 %, se tiene hacia la porción del Pozo 10. El resto de las localidades de la sección, presenta valores que se encuentran dentro de estos límites.

La zona de la sección con menor proporción de compactación de la serie, coincide con la porción en la que se tienen los valores actuales de porosidad mayores, esto es, la región en la que dicha serie alcanzó menos sepultamiento. Por el contrario, la zona de la sección con mayor proporción de compactación de la serie, se ubica en la parte de valores actuales de porosidad menores, constituyendo la zona en la que la serie fue más profundamente sepultada.

Aquí cabe mencionar que los porcentajes de compactación definidos para la serie Cretácico Inferior, que es de carácter predominantemente carbonatado, son cuantitativamente mayores que los obtenidos para la serie Jurásico Superior, ésta de carácter arcillo-carbonatado, debido a dos razones:

- a la primera serie se le estima una porosidad inicial mayor que a la segunda,
- la forma de la curva de compactación de la serie Cretácico Inferior se define

con una pendiente sensiblemente más pronunciada que la del Jurásico Superior, por lo que el área bajo la curva utilizada para efectuar la descompactación necesita de considerar mayores valores de altura (HA en Fig. 21), para conservar el mismo volumen de matriz de sólidos.

### Serie Cretácico Medio

Por lo que se refiere a la serie Cretácico Medio, las diferentes pendientes que definen las líneas de comportamiento de reducción de porosidad de la cima y la base de la serie, en las gráficas Porosidad-Tiempo de cada uno de los puntos de control de la sección (Fig. 40), dada la heterogeneidad de valores de porosidad estimados con el modelado para la serie, manifiestan el distinto sepultamiento experimentado por ésta última a lo largo de la sección.

En estas gráficas Porosidad-Tiempo (Fig. 40), se puede observar que para el tiempo actual, los menores valores de porosidad final se estiman presentes en las localidades de los pozos 9 y 10, constituyendo por tanto, la zona en la que mayor sepultamiento experimentó la serie, mientras que, el menor sepultamiento se tiene evidenciado en los pozos 4 y 5, por los mayores valores de porosidad final.

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

Los valores de porosidad final estimados con el modelado, en cada uno de los puntos de control de la sección, se presentan resumidos en la tabla de la Figura 41.

En las primeras cinco localidades de la sección, de los pozos 1 al 5, la diferencia de porosidad entre la cima y la base de la serie es bastante evidente, cosa que no sucede en los puntos de control restantes, de los pozos 6 al 13, en donde la diferencia es mínima (Figs. 40 y 41). Esto es producto de la variación de espesor que presenta la serie a lo largo de la sección, ya que éste es relativamente más potente en esas primeras cinco localidades, la parte suroccidental de la sección, lo que provoca que dicha diferencia de porosidad sea mayor, y es más delgado en las localidades restantes, la porción nororiental de la sección (Figs. 12, 13 y 41), lo que origina una diferencia menor.

Dentro del primer grupo de localidades de la sección, el espesor descompactado más potente se tiene presente en el Pozo 1, y el más delgado aparece en el Pozo 5, mientras que en el segundo grupo, el espesor más grueso se estima en el Pozo 8, y el más delgado en el Pozo 7 (Fig. 41).

La mayor acumulación de la serie Cretácico Medio en el sector suroccidental de la sección, es la respuesta al desarrollo en esta zona de un ambiente carbonatado de plataforma, mientras que, la menor acumulación en la porción nororiental, se da en un ambiente carbonatado de cuenca (Fig. 14).

Las relaciones de la tasa de sedimentación de esta serie a lo largo de la sección, establecidas en función de los espesores descompactados aquí estimados, pueden ser referidas también separadamente como dos diferentes grupos o zonas, cada uno de los cuales presentan variaciones internas (Fig. 41).

El grupo de la porción suroccidental de la sección, la zona de la plataforma, caracteriza las proporciones de sedimentación relativamente más altas, las cuales pasan de 0.086 mm/año (86 m/Ma) en el Pozo 1, que constituye la mayor tasa de la sección, a 0.055 mm/año (55 m/Ma) en el Pozo 5. En el grupo de la porción nororiental de la sección, la zona de la cuenca, se definen proporciones relativamente más bajas, con un valor mínimo de 0.005 mm/año (5 m/Ma) en el Pozo 7 y un valor máximo de 0.030 mm/año (30 m/Ma) en el Pozo 8.

Las proporciones de sedimentación estimadas en la zona de la plataforma son bastante similares a las tasas referidas por otros autores para depósitos similares de la misma edad en otras localidades, como en la región de Tampico, en donde A. H. Coogan y otros reportan una proporción de 0.080 mm/año (80 m/Ma) (*in* Wilson, J. L., 1975), y P. Enos una de 0.060 - 0.090 mm/año (60-90 m/Ma) (*in* Schlager, W., 1991), aunque éstos últimos, no tomaron en cuenta correcciones por compactación.

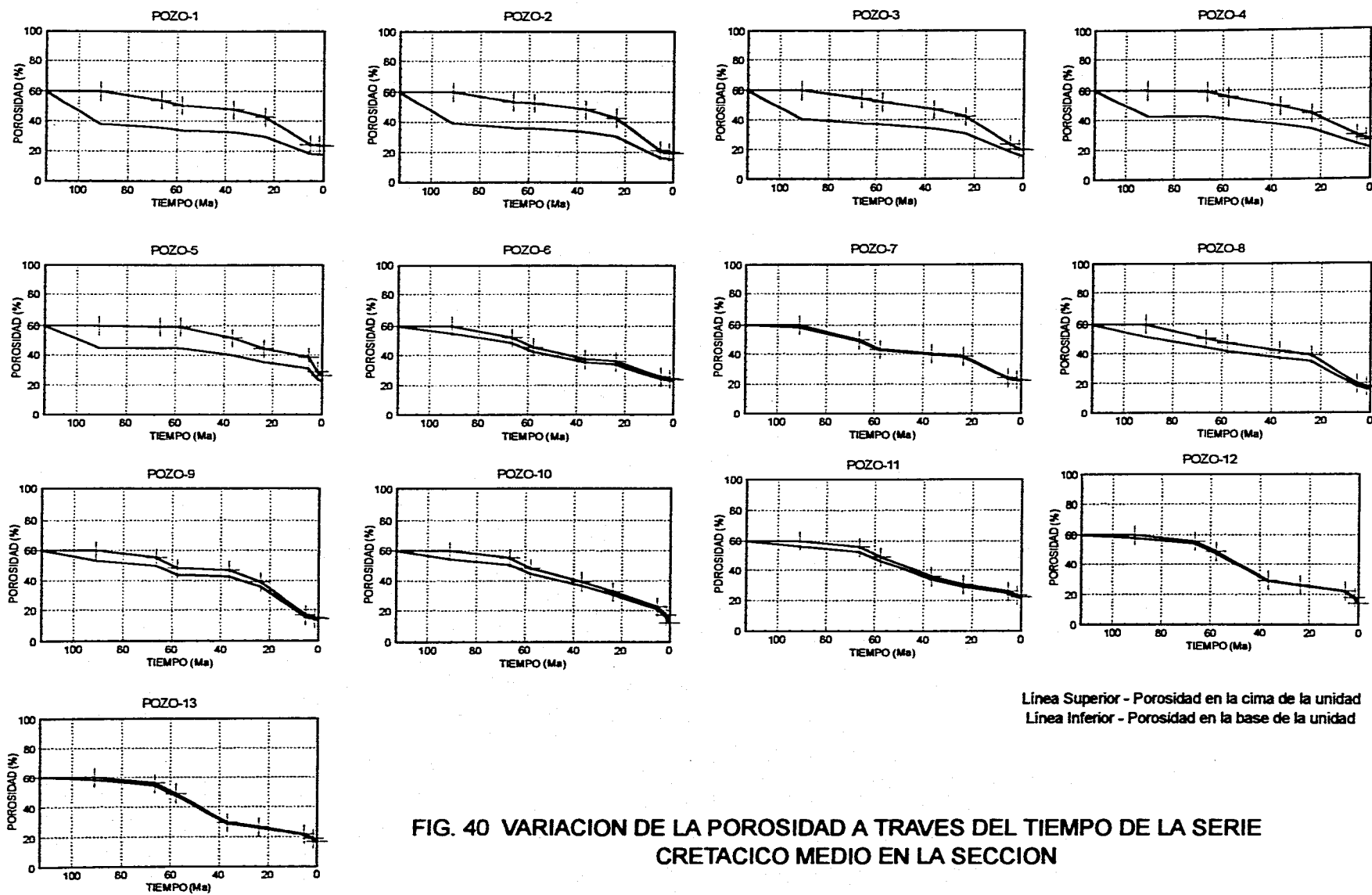


FIG. 40 VARIACION DE LA POROSIDAD A TRAVES DEL TIEMPO DE LA SERIE CRETACICO MEDIO EN LA SECCION

ANALISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

POZO	POROSIDAD FINAL (%)		ESPESOR (m)		TASA DE SEDIMENTACION (m/Ma - mm/año)
	CIMA	BASE	ACTUAL	DESCOMPACTADO	
1	23.7	17.7	1225	1661.6	66 - 0.066
2	19.1	14.7	1100	1767.5	61 - 0.061
3	19.4	15.2	1000	1642.0	75 - 0.075
4	26.2	21.1	900	1403.1	64 - 0.064
5	28.7	22.2	769	1212.5	55 - 0.055
8	23.9	22.6	200	360.45	18 - 0.018
7	22.2	21.9	54	103.33	5 - 0.005
6	17.2	15.8	350	656.93	30 - 0.030
9	14.7	13.8	250	493.73	22 - 0.022
10	12.4	11.8	200	410.29	19 - 0.019
11	22.3	21.8	150	278.96	13 - 0.013
12	14.1	13.9	83	132.29	8 - 0.008
13	18.8	18.8	85	132.24	8 - 0.008

FIG. 41 TABLA DE POROSIDAD FINAL, ESPESOR Y TASAS DE SEDIMENTACION DE LA SERIE CRETACICO MEDIO

Para el tiempo de los 91 Ma, con el depósito de la serie Cretácico Medio, en la porción suroccidental de la sección, la zona de los pozos 1 al 5, la cubierta sedimentaria se engruesa substancialmente respecto a la etapa anterior del Cretácico Temprano y adquiere un espesor máximo de alrededor de 5000 m, constituyéndose con esto, en la zona con mayor acumulación (Fig. 42).

Por su parte, en la porción nororiental, este engrosamiento no es tan marcado, y la cubierta sedimentaria cambia poco su disposición respecto a la de fines del Cretácico Temprano, presentando un espesor entre 3000 y 4000 m.

Con esto, la geometría de la cubierta sedimentaria en la sección, para este tiempo, se

define con un comportamiento lateralmente heterogéneo, el que, de una manera general, se describe con un paulatino adelgazamiento de espesor en dirección SW-NE (Fig. 42), tendencia que es interrumpida localmente en la zona de los pozos 6 al 7, en donde se manifiesta una drástica reducción de espesor y la cubierta sedimentaria pasa a tener más o menos 4 000 m.

Con el depósito del Cretácico Medio, las series infrayacentes Cretácico Inferior y Jurásico Superior, experimentaron un mayor grado de compactación hacia la porción suroccidental de la sección, que en la parte nororiental de la misma, lo cual es más evidente en el espesor que guarda la segunda serie (Fig.42).

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

La proporción de compactación que sufrió la serie Cretácico Medio con el sepultamiento durante la evolución de la cuenca, es variable a lo largo de la sección. En la zona de la plataforma, de los pozos 1 al 5, se cuantifican los menores porcentajes, los cuales varían de un mínimo de 35 % en el Pozo 1, a un máximo de 39 % en el Pozo 3. Por lo que respecta a la porción nororiental, allí se determinan los porcentajes mayores, con un valor mínimo de 45 % en el Pozo 6 y un valor máximo de 52 % en el Pozo 12.

Conviene señalar aquí que, en este caso es más evidente que la proporción de compactación que se manifiesta en la serie, no está en relación directa exclusivamente con la cantidad de sepultamiento que ésta última experimenta, sino que también influye su espesor de manera importante.

En los pozos 1 y 6, la serie experimentó una cantidad de sepultamiento muy similar pues los valores de porosidad estimados para su cima son casi iguales (Figs. 40 y 41), pero las proporciones de compactación son bastante diferentes, 35 % y 45 % respectivamente, en donde el espesor de la serie en el Pozo 1 es muy superior al del Pozo 6 (Fig. 41).

### **Serie Cretácico Superior**

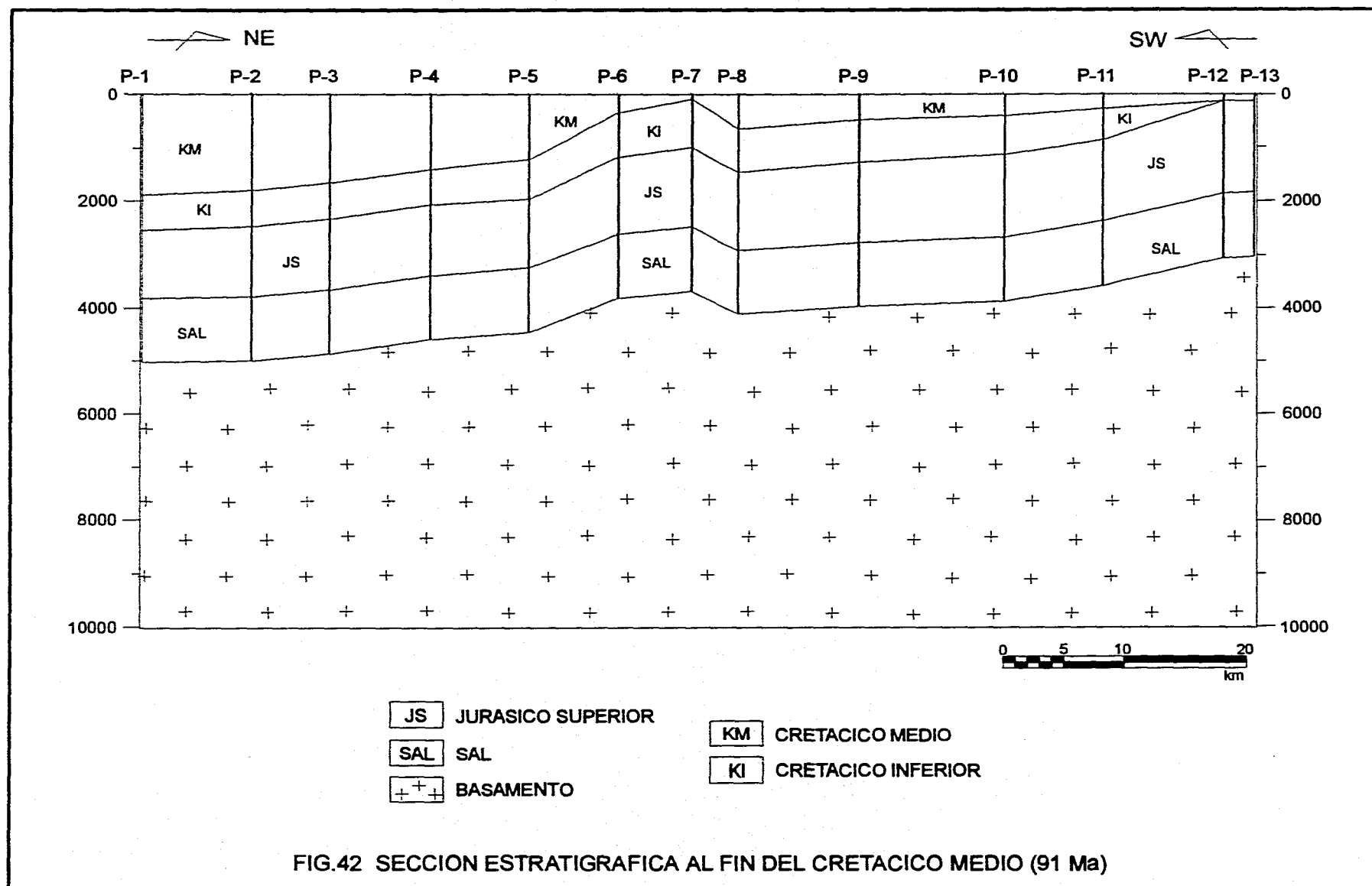
En lo que respecta a la serie Cretácico Superior, la muy particular manera en la cual

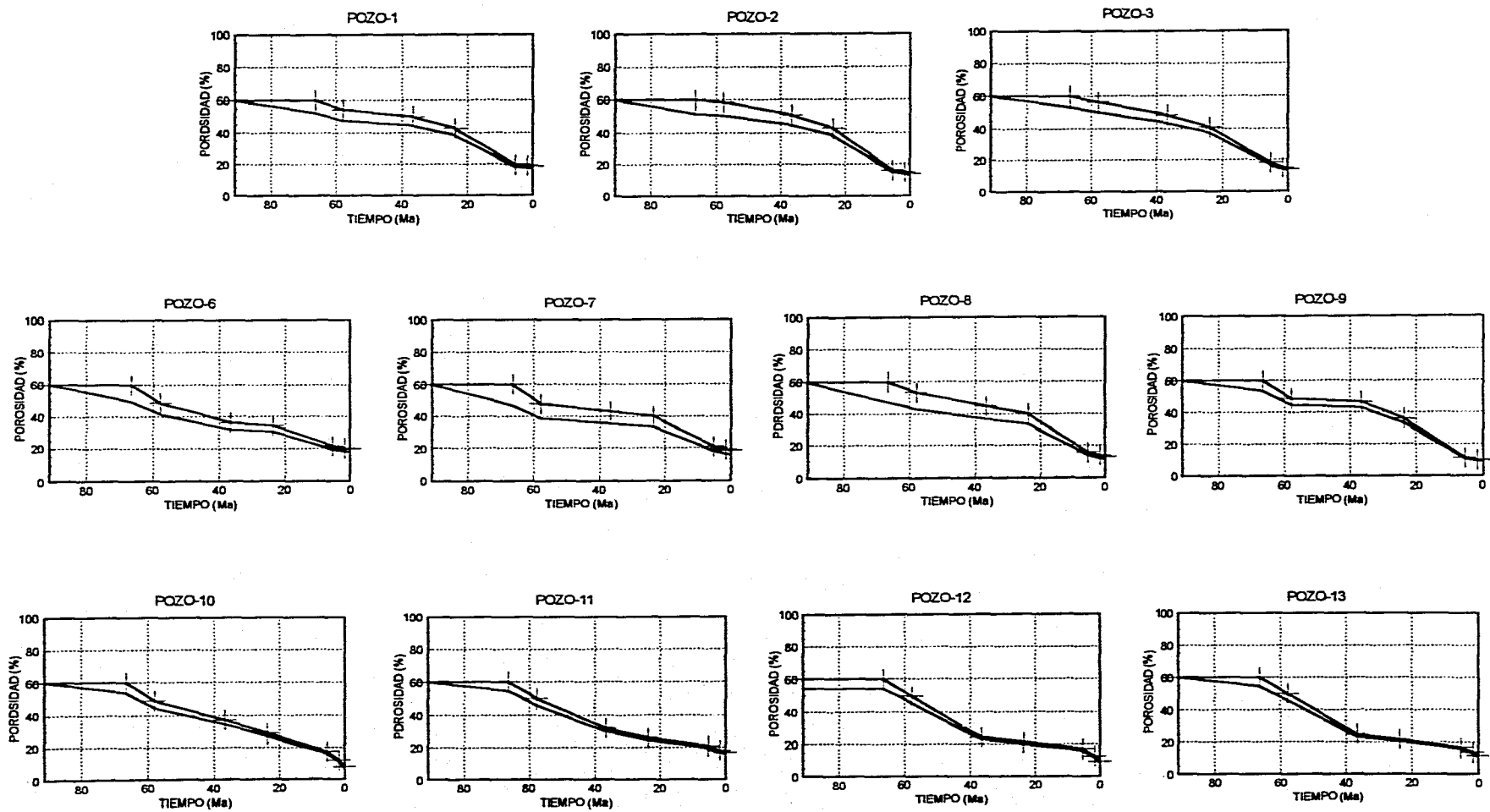
manifiesta su reducción de porosidad por sepultamiento a través del tiempo, en cada uno de los puntos de control de la sección, se marca en función de las distintas pendientes que describen las líneas de comportamiento de la cima y la base de la serie en las gráficas Porosidad-Tiempo, las cuales se elaboraron a partir de los valores de porosidad estimados con el modelado (Fig. 43).

No se presentan las gráficas de las localidades de los pozos 4 y 5 de la sección, ya que en éste último no se reporta la ocurrencia de la serie (Figs. 9 y 12), y en el primero su espesor es de solamente 3 m, el cual comparativamente con la dimensión de la sección, pasa desapercibido.

La diferencia entre los valores de porosidad estimados para la cima y la base de la serie, es relativamente más pronunciada en las primeras seis gráficas, correspondientes a los pozos 1-3 y 6-8 de la porción suroccidental de la sección, que en las cinco gráficas restantes, pertenecientes a los pozos 9-13 de la parte nororiental de la sección, en donde esta diferencia es menos notable (Fig. 43).

El comportamiento de esta diferencia se ajusta bien con los espesores definidos para la serie a lo largo de la sección. Es mayor en la zona en donde se caracterizan los espesores relativamente más gruesos, la porción suroccidental de la sección, donde no son menores a los 200 m, y es menor en la parte nororiental restante, en donde los espesores definidos se encuentran por debajo de éste último valor (Figs. 12 y 44).





Línea Superior - Porosidad en la cima de la unidad      Línea Inferior - Porosidad en la base de la unidad

**FIG. 43 VARIACION DE LA POROSIDAD A TRAVES DEL TIEMPO DE LA SERIE CRETACICO SUPERIOR EN LA SECCION**



POZO	POROSIDAD FINAL (%)		ESPESOR (m)		TASA DE SEDIMENTACION (m/Ma - mm/año)
	CIMA	BASE	ACTUAL	DESCOMPACTADO	
1	18.8	17.4	242	426.93	17 - 0.017
2	14.1	13.0	240	468.53	19 - 0.019
3	14.2	13.3	200	395.38	16 - 0.016
6	19.6	17.6	330	592.54	24 - 0.024
7	18.4	15.9	442	780.99	32 - 0.032
8	12.9	11.3	398	749.91	30 - 0.030
9	9.7	9.2	165	345.91	14 - 0.014
10	7.7	7.3	160	342.81	14 - 0.014
11	16.9	16.1	160	311.48	13 - 0.013
12	9.2	8.7	155	311.32	13 - 0.013
13	11.6	11.0	155	303.76	12 - 0.012

FIG. 44 TABLA DE POROSIDAD FINAL, ESPESOR Y TASAS DE SEDIMENTACION DE LA SERIE CRETACICO SUPERIOR

Para el tiempo actual, los relativamente más bajos valores de porosidad estimados para la serie (porosidad final), se marcan desarrollados en las gráficas de los pozos 9-10 y 12-13 (Fig. 43), lo cual señala a la zona de estos pozos, como la porción de la sección en la que el Cretácico Superior experimentó el mayor grado de sepultamiento. Por otro lado, los mayores valores de porosidad final se tienen marcados en las gráficas de los pozos 6-7 y 1, indicando con esto, las zonas de la sección en donde la serie sufrió la menor cantidad de sepultamiento. Los valores cuantitativos de porosidad final de esta serie, obtenidos con el modelado, se sintetizan en la tabla de la Figura 44 para cada uno de los puntos de control de la sección.

La estimación de los espesores descompactados del Cretácico Superior, pone de manifiesto al Pozo 7 como la localidad de los puntos de control de la sección, con la mayor acumulación de materiales de esta serie con 781 m, mientras que a la del Pozo 13, como la de mínima acumulación (Fig. 44), aunque las localidades de los pozos 11 y 12, no se encuentran muy distantes de ésta última, ya que la diferencia de espesor entre ellas es de apenas 7 m.

En las localidades de la porción suroccidental de la sección, de los pozos 1 al 8, la zona de espesores relativamente más gruesos de la serie Cretácico Superior, se demarcan cuantitativamente dos grupos con espesores descompactados promedio diferentes,

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

separados entre sí por las localidades en las que actualmente faltan materiales de esta serie (pozos 4 y 5; línea doble en Fig. 44). En uno, este espesor descompactado promedio es de alrededor de 430 m (pozos 1 a 3) y, en el otro, visiblemente mayor, de 720 m (pozos 5 a 8).

Un tercer grupo de espesores descompactados se individualiza entonces para las localidades de la restante porción nororiental de la sección, de los pozos 9 al 13 (Fig. 44), el cual se caracteriza por espesores delgados, con un valor promedio de alrededor de 310 m.

Las diferentes tasas de sedimentación que se obtienen al considerar los espesores descompactados de la serie Cretácico Superior, se conjuntan a lo largo de la sección también en tres grupos o zonas, cada uno con valores de relación de sedimentación estrechamente asociados entre sí, los cuales guardan la misma disposición espacial sugerida para los grupos de espesores descompactados que se acaban de mencionar.

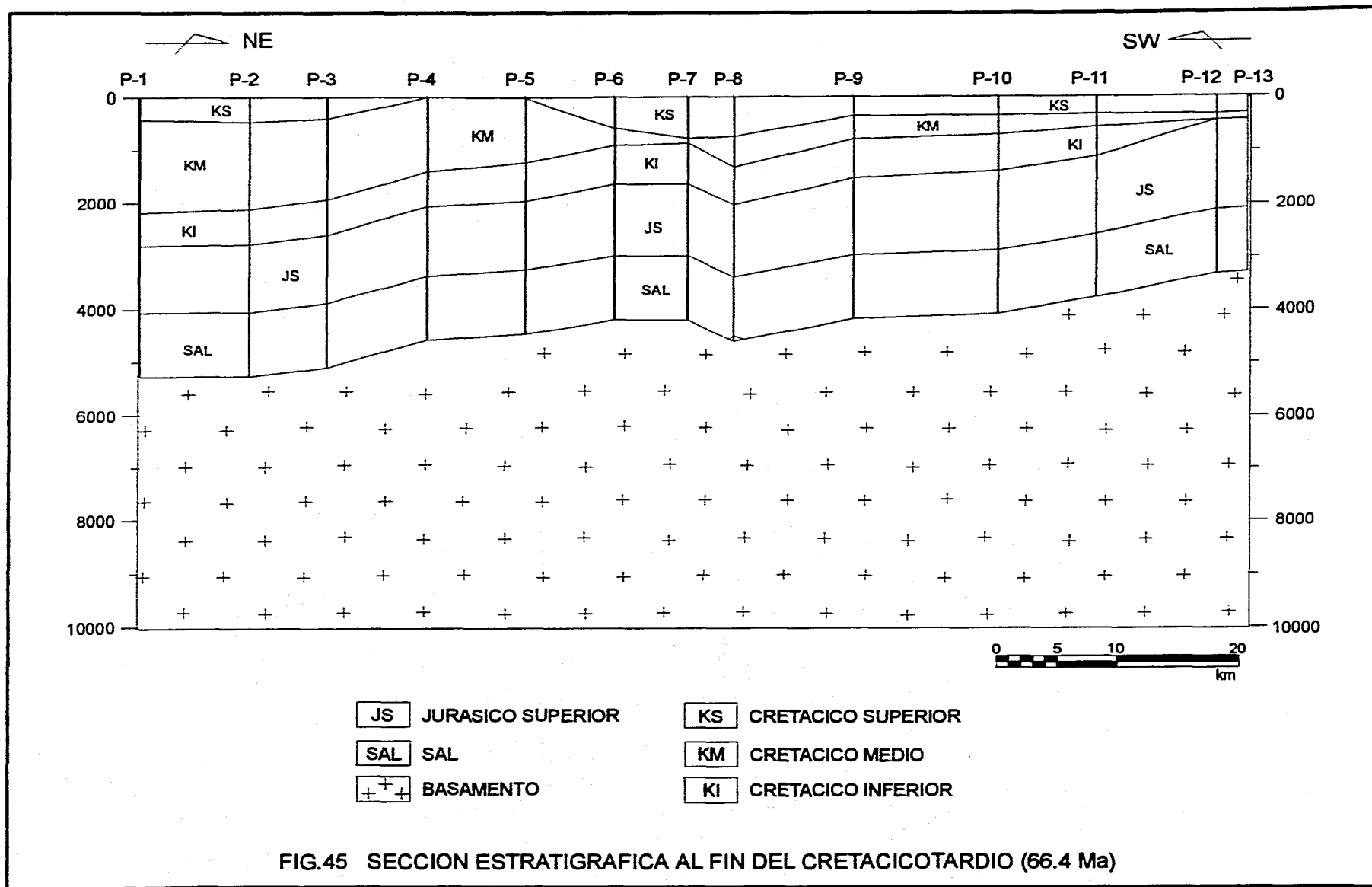
El primer grupo de tasas de sedimentación, presente en la porción suroccidental de la sección, manifiesta una tasa promedio de alrededor de 17 m/Ma (0.017 mm/año); el segundo, en la parte media de dicha sección, con una relación promedio de 30 m/Ma (0.030 mm/año) y, el tercero, en la porción nororiental, en donde se estima una tasa promedio de alrededor de 13 m/Ma (0.013 mm/año) (Fig. 44).

El espesor descompactado del Cretácico Superior en el Pozo 7, en conjunción con el

definido en el Pozo 8, el cual es tan sólo 30 m menor ya que allí se le estimaron 750 m, destacan la zona en la que ambos se ubican dentro de la sección, como la porción con mayor hundimiento de ésta última, en donde se define el desarrollo de un centro de subsidencia angosto durante el depósito de esta serie (Fig. 45). El Pozo 6, con un espesor de 593 m, prácticamente también se encuentra formando parte del desarrollo de este centro, el cual se ubica inmediatamente adyacente al NE de la porción de la sección sujeta a erosión durante este tiempo (Fig. 14).

Con el depósito de esta serie, la geometría de la columna sedimentaria de la sección para el tiempo de los 66.4 Ma, a la terminación del Cretácico Tardío (Fig. 45), no varía de manera importante con relación a la definida hacia la finalización del depósito del Cretácico Medio (Fig. 42), aunque sí ligeramente más engrosada.

De una manera general, la columna sedimentaria continua definiéndose con un paulatino adelgazamiento en dirección SW-NE, ya que presenta un espesor más potente en la porción suroccidental de la sección, de poco más de 5000 m y uno más delgado en la parte nororiental, en donde alcanza poco más de 3000 m (Fig. 45). Aunque se debe resaltar un cambio que sí es evidente en la zona media de la sección, en donde la drástica reducción de espesor que de esta columna se manifestaba en la porción de los pozos 6 al 7 en la etapa anterior, con la mayor acumulación de materiales del Cretácico Superior allí, disminuyó su expresión dentro de la sección de manera importante (Figs. 42 y 45).



## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

La relación existente entre los espesores descompactados y los espesores actuales de la serie Cretácico Superior, señala que las mayores proporciones de compactación experimentada por esta serie a lo largo de la sección durante la evolución de la cuenca, se desarrollaron en las localidades de los pozos 9 y 10, donde se alcanzaron valores de 52 y 53 % respectivamente, coincidiendo con la zona de mayor sepultamiento y de mayor pérdida de porosidad de la serie (Figs. 43 y 44). Las menores proporciones de compactación de la serie, se manifiestan desarrolladas en las localidades de los pozos 6, 7 y 1, con un 43 %, coincidiendo con las zonas de la sección en donde esta serie se encuentra menos sepultada.

### Serie Paleoceno

En la Figura 46 se presentan las gráficas Porosidad-Tiempo de la serie Paleoceno para cada uno de los puntos de control de la sección, en las que, por medio de las pendientes que describen las líneas de comportamiento de la cima y la base de la serie, se visualiza el grado de reducción de la porosidad de esta serie con el sepultamiento durante el tiempo cenozoico.

No se elaboró la gráfica de la localidad del Pozo 5 de la sección, debido a que el Paleoceno no se tiene presente en ese punto (Figs. 9 y 12).

Las pendientes de las gráficas Porosidad-Tiempo (Fig. 46), señalan que la reducción de

la porosidad por sepultamiento de esta serie, siguió diferentes caminos a lo largo de la sección. En las localidades de los pozos 10 al 13 se efectuó primero rápidamente, hasta los 36 Ma aproximadamente, y después de manera más lenta. Mientras que en las localidades restantes, se llevó a cabo siguiendo un camino inverso, es decir, primero una reducción de forma lenta, hasta los 23 Ma aproximadamente, y después más rápidamente.

En la gráfica del Pozo 2, las líneas de comportamiento de la cima y la base de la serie prácticamente coinciden, lo cual es debido a que el espesor presente en esta localidad es muy delgado en comparación con el detectado en los demás puntos de control de la sección (Fig. 12).

En las gráficas de los pozos 10, 12 y 9 se manifiestan, respectivamente, las máximas reducciones de porosidad por sepultamiento que experimenta la serie, ya que se tienen valores estimados de 3.7 % a 5.1 % (Fig. 47). Esto caracteriza a la porción en la que se ubican estas localidades dentro de la sección, como la zona en la que la serie alcanzó un mayor sepultamiento.

Los mayores valores de porosidad de la serie se estiman dentro de un rango de 14 % a 12.9 %, y se marcan presentes en las localidades de los pozos 6, 7 y 4 respectivamente, que describen la porción de la sección en donde la serie fue menos sepultada. Los demás valores de porosidad final de la serie, en las restantes localidades de control de la sección, se resumen en la tabla de la Figura 47.

Cabe señalar aquí que los valores de porosidad final de esta serie, cuantitativamente son mucho menores que los valores estimados para las series infrayacentes del Cretácico (Figs. 38, 41 y 44), y aún que los de la serie Jurásico Superior (Fig. 35), todas las cuales experimentaron un mayor sepultamiento que la serie Paleoceno. Esta respuesta se debe a que las características litológicas predominantemente terrígeno-arcillosas de esta serie, aportan de por sí, un valor de porosidad inicial estimado menor que el de las series anteriores (Fig. 28), además de que la forma de la correspondiente curva de compactación (Fig. 30) la califica como una serie de rápida reducción de la porosidad con el sepultamiento.

Los espesores descompactados estimados para esta serie Paleoceno (Fig. 47), señalan que la mayor acumulación de materiales, dentro de la sección, se registró en las localidades de los pozos 7 y 6, en donde se depositaron 709 m y 663 m respectivamente. El menor espesor descompactado se tiene en la localidad del Pozo 2 con un depósito de 74 m.

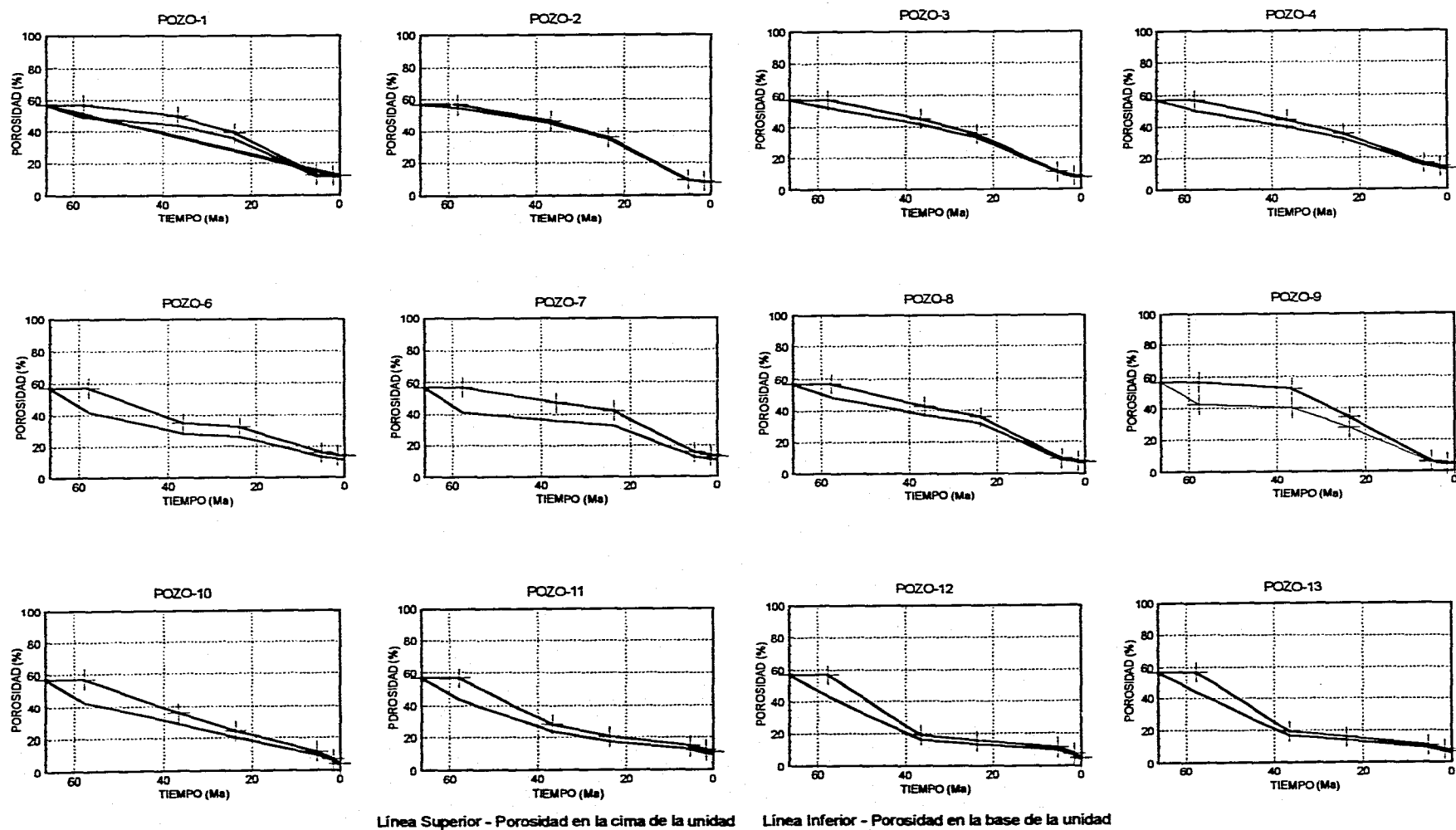
De hecho, los espesores de esta serie en los diferentes puntos de control de la sección, se pueden reunir en dos grupos principales; uno con valores relativamente más delgados, en los pozos 1 al 4, y el otro con valores relativamente más gruesos, en los pozos 6 al 13. Estos grupos de espesores están separados por la localidad en la que no se tiene la ocurrencia de materiales de esta serie, el Pozo 5 (línea doble en Fig. 47).

Las tasas de sedimentación estimadas para el depósito de la serie Paleoceno (Fig. 47), resultantes de estos espesores descompactados, para el primer grupo antes descrito, varían de 9 a 36 m/Ma (0.009 a 0.036 mm/año), mientras que para el segundo de 42 a 82 m/Ma (0.042 a 0.082 mm/año). En ambos grupos predominan los valores mayores de tasa de sedimentación que los menores.

La disposición de estos grupos de espesores descompactados a lo largo de la sección, caracterizan a ésta última con el depósito más delgado en la porción suroccidental, y el más grueso en la parte media y nororiental como se puede observar esquemáticamente en la Figura 48, en la sección estratigráfica establecida para los 57.8 Ma, a la finalización del Paleoceno.

En la parte media de la sección, en la zona de los pozos 6 y 7, dado que allí se presentan los mayores espesores de la serie, se caracteriza como el sector de la sección que tuvo el mayor hundimiento con el depósito, definiendo con esto, el desarrollo de un centro de subsidencia.

De hecho, el desarrollo de este centro en el sector medio de la sección, se define desde el depósito de la serie Cretácico Superior (Fig. 45), aunque para el Paleoceno se manifiesta con un carácter todavía más angosto, ya que sólo comprende la porción de dos pozos, mientras en la etapa anterior involucraba tres. Su ubicación se mantiene inmediatamente adyacente al NE de la zona sujeta a erosión.



**FIG. 46 VARIACION DE LA POROSIDAD A TRAVES DEL TIEMPO DE LA SERIE PALEOCENO EN LA SECCION**

ANALISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

POZO	POROSIDAD FINAL (%)		ESPESOR (m)		TASA DE SEDIMENTACION (m/Ma - mm/año)
	CIMA	BASE	ACTUAL	DESCOMPACTADO	
1	12.0	11.2	163	308.11	36 - 0.036
2	7.5	7.4	35	73.70	9 - 0.009
3	7.8	7.5	100	202.84	24 - 0.024
4	12.9	12.0	157	294.79	34 - 0.034
6	14.0	11.8	386	683.01	77 - 0.077
7	13.0	10.8	412	709.40	82 - 0.082
8	7.1	6.5	184	361.71	42 - 0.042
9	5.1	4.4	340	641.50	75 - 0.075
10	3.7	3.2	330	632.46	74 - 0.074
11	11.1	9.6	320	576.23	87 - 0.067
12	4.7	4.1	310	593.27	69 - 0.069
13	6.5	5.6	300	567.24	66 - 0.066

FIG. 47 TABLA DE POROSIDAD FINAL, ESPESOR Y TASAS DE SEDIMENTACION DE LA SERIE PALEOCENO

Con el depósito de esta serie, la geometría de la cubierta sedimentaria en la sección para el tiempo de los 57.8 Ma, a la finalización del Paleoceno, con respecto a la de la etapa anterior de fines del Cretácico Tardío, manifiesta modificaciones más acentuadas en la porción nororiental, de los pozos 6 al 13, que en la parte suroccidental, de los pozos 1 al 4 (Figs. 45 y 48).

En la porción nororiental, con el depósito más grueso de la serie Paleoceno, la columna sedimentaria de la sección experimentó un mayor engrosamiento que en la parte suroccidental. Esto repercutió en la disminución del contraste de espesores existente entre ambos extremos de la sección

hasta antes de este depósito, haciendo menos notorio el definido adelgazamiento de dirección SW-NE de la cubierta sedimentaria. Aunque ésta continuó siendo más potente en la parte suroccidental, con un espesor máximo de alrededor de 5400 m, por uno mínimo de alrededor de 3700 m, en la porción nororiental.

La geometría de la cubierta sedimentaria de la parte central de la sección, en la zona de los pozos 6 al 7, también se modificó de manera importante, ya que la drástica reducción de espesor que ésta experimentaba en dicha zona en las etapas anteriores, para este tiempo ya no se manifiesta y pasa a ser reconocida hacia la zona del Pozo 5, aunque de manera no tan prominente (Fig. 48).

## ANALISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

El grado de compactación que sufrieron los espesores originales estimados de esta serie Paleoceno, para alcanzar los espesores que actualmente se le reconocen a lo largo de la sección, función de la posterior historia depositacional desarrollada en la cuenca, de una manera general se encuentra dentro de un rango del 47 al 49 %, aunque para la zona de los pozos 6 y 7, ésta disminuye al 42 %, y para la porción de los pozos 2 y 3, aumenta hasta el 51-53 %.

La zona en la que el Paleoceno experimentó el menor porcentaje de compactación, coincide con la porción en donde se desarrolló la menor pérdida de porosidad por sepultamiento (Figs. 46 y 47) y, por lo tanto, la región en la que la serie alcanzó un menor profundizamiento pero, además, es en donde se tiene presente el mayor espesor de dicha serie.

Las localidades con una mayor proporción de compactación de la serie, no corresponden con la zona de mayor profundizamiento de ésta última, que se desarrolló en la porción de los pozos 9 y 10, en donde se tienen los menores valores de porosidad, ya que en éstas últimas, el espesor del Paleoceno es mucho mayor que en las primeras (Fig. 47), en donde sólo se manifiesta una proporción de compactación del 47 %. El mayor grado de compactación en este caso, es principalmente función del menor espesor de la serie allí presente.

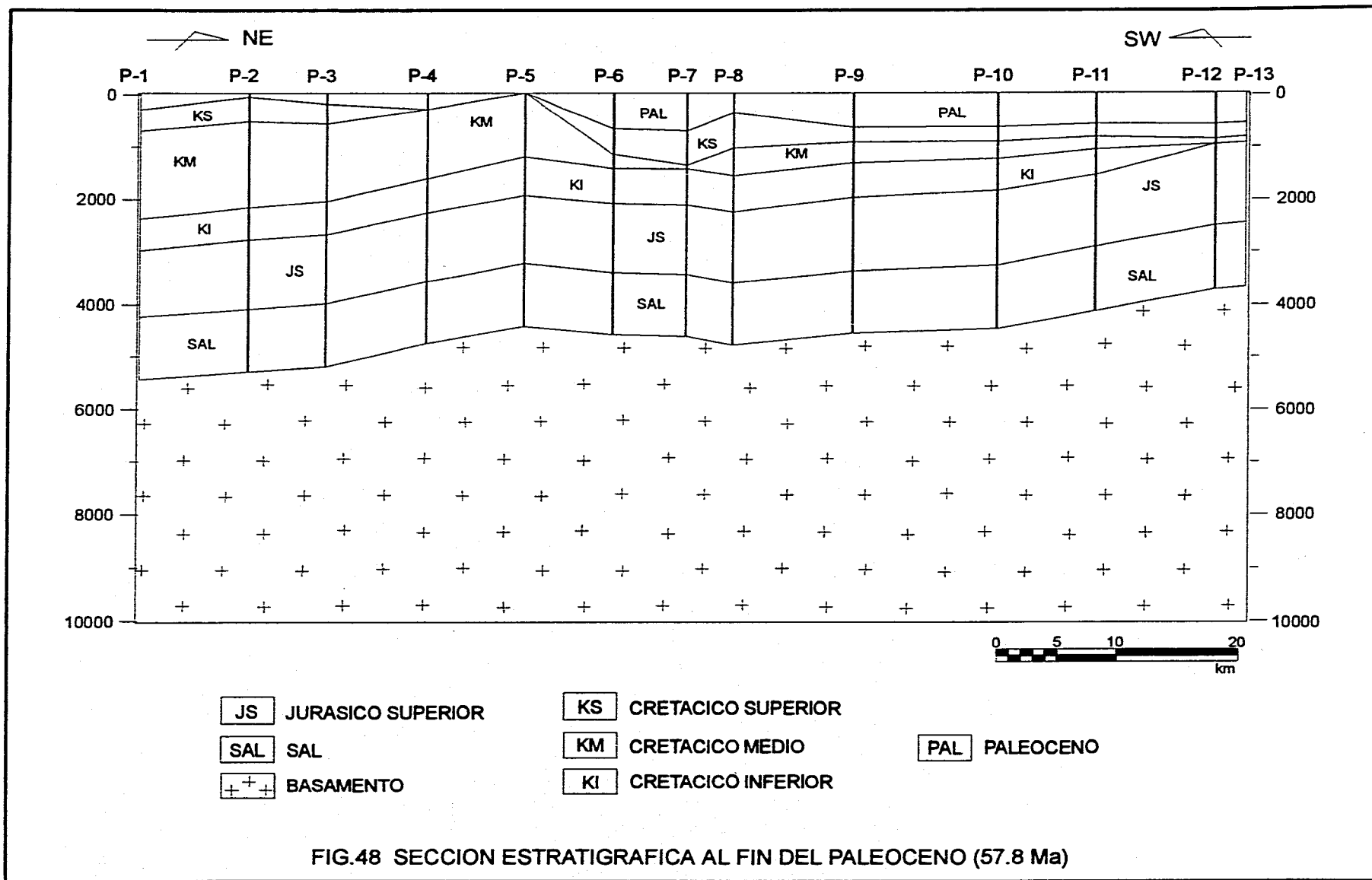
### Serie Eoceno

Por lo que se refiere a la serie Eoceno, la evolución de la porosidad que experimenta con el sepultamiento a lo largo de la sección durante el Paleógeno y Neógeno, se sintetiza en las gráficas Porosidad-Tiempo de cada uno de los puntos de control de ésta última (Fig. 49).

En éstas gráficas se puede observar que la diferencia que se desarrolla entre los valores de porosidad de la cima y la base de la serie, es mucho más evidente en las localidades de los pozos 6, 11, 12 y 13, que en el resto de los puntos de control de la sección, y que esta diferencia, a pesar de la reducción que de ella se lleva a cabo con el sepultamiento, alcanza a mantenerse en esos mismos lugares, con una magnitud relativamente importante para el tiempo actual. Por el contrario, en la gráfica del Pozo 9 se nota que esta diferencia es muy pequeña, y que prácticamente desaparece en la actualidad.

Precisamente, es en las localidades de los pozos 6 y 11, donde se conservan los valores de porosidad final más altos de la serie en la sección, con 19.6 % y 18.5 % en su cima respectivamente, indicando dónde dicha serie alcanzó el menor sepultamiento. Por otro lado, los valores mínimos de porosidad final se tienen en las localidades de los pozos 9 y 10, en donde se estiman porosidades para la cima de 5.7 % y 5.2 % respectivamente, lo que marca el lugar donde la serie Eoceno alcanzó el mayor profundizamiento.





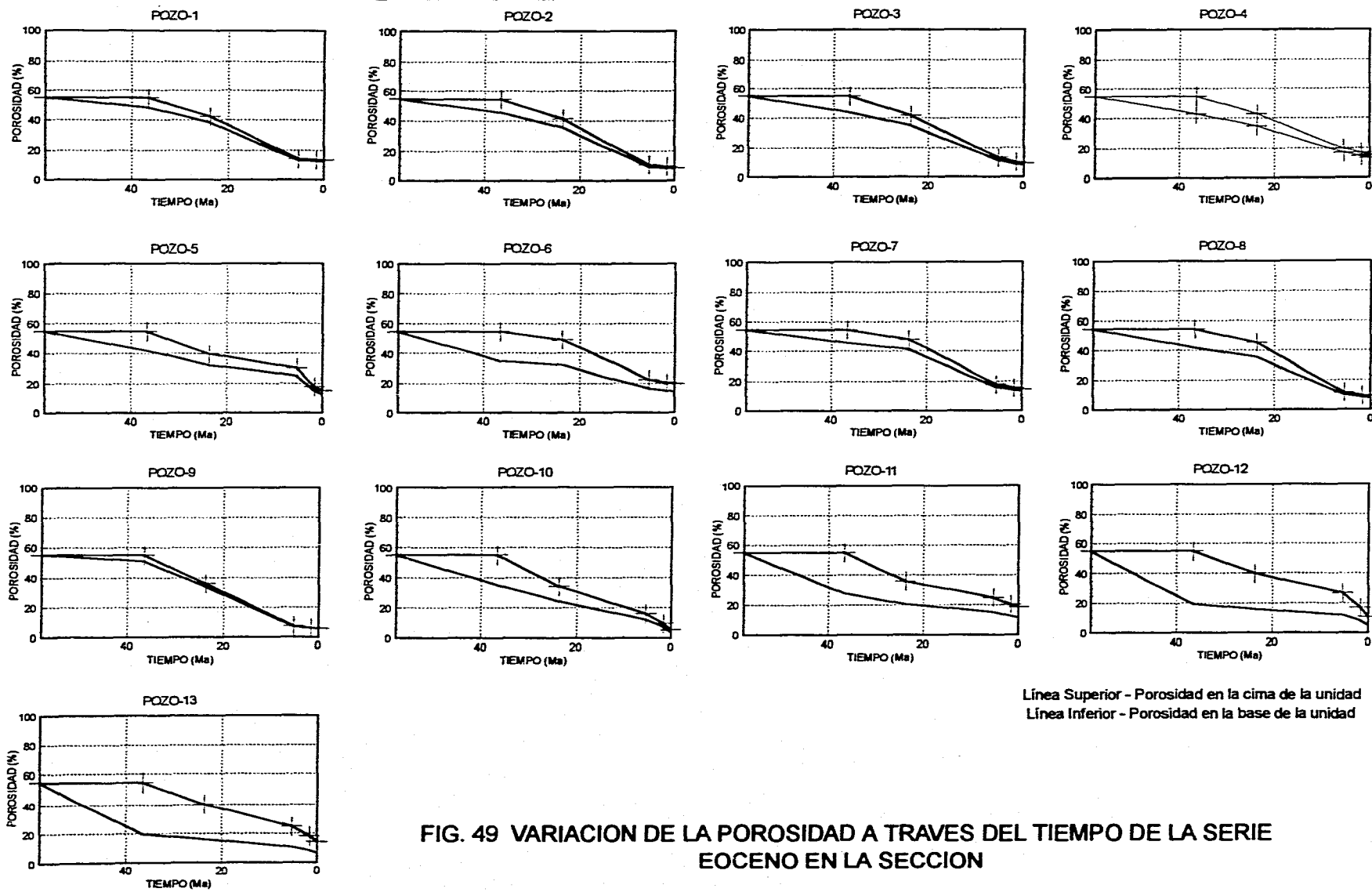


FIG. 49 VARIACION DE LA POROSIDAD A TRAVES DEL TIEMPO DE LA SERIE EOCENO EN LA SECCION

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

Los demás valores de porosidad final estimados para la serie en los restantes puntos de control de la sección, se sintetizan en la tabla de la Figura 50.

El espesor descompactado más potente del Eoceno que se obtiene en la sección se ubica en la localidad del Pozo 12 con 2 422 m, mientras que el más delgado, con 171 m, se tiene en el Pozo 9. De una manera general, los espesores descompactados estimados para la serie en la sección se conjuntan en dos grupos de localidades; uno, el de los pozos 1 al 9, que se caracteriza con un espesor relativamente más delgado que el que se describe en el otro grupo, que se conforma con los pozos 10 al 13 (Fig. 50).

Con estos espesores descompactados, a la localidad de mayor espesor de esta serie le corresponde la mayor tasa de sedimentación, la cual se estima dada por una relación de 0.114 mm/año (114 m/Ma), mientras que, a la localidad con el menor espesor, le concierne la tasa de sedimentación más baja, 0.008 mm/año (8 m/Ma). Como se puede ver en la Figura 50, la relación promedio de proporción sedimentación para el grupo de localidades con espesores relativamente más delgados, es de alrededor de 0.025 mm/año (25 m/Ma), mientras que, para el otro grupo, ésta es de alrededor de 0.090 mm/año (90 m/Ma).

La disposición que de estos espesores descompactados se tiene a lo largo de la sección para el tiempo de los 36.6 Ma (Fig. 51), individualiza en dos zonas la distribución de los dos grupos de espesores referidos. Una

porción suroccidental, con los espesores relativamente más delgados, y una porción nororiental con aquéllos relativamente más gruesos.

En la porción suroccidental de la sección, la acumulación de un mayor espesor de la serie en la localidad del Pozo 6, respecto a los puntos de control aledaños de la zona (Fig. 51), describe allí, el desarrollo de un mayor hundimiento o centro de subsidencia durante el depósito, el cual se ha considerado que se encontraba funcionando desde el depósito de la serie Cretácico Superior, pero ahora con dimensiones más angostas, ya que para el Paleoceno involucraba hasta parte de la zona del Pozo 7 (Fig. 48).

En la porción nororiental de la sección, el continuo engrosamiento en sentido SW-NE de la acumulación de la serie, manifiesta el desarrollo de un mayor hundimiento en la zona del extremo noreste, donde se ubican los pozos 12 y 13, el cual ya no se alcanza a definir si es de carácter local o regional, pero que sí se caracteriza de una dimensión bastante prominente con respecto al resto de la sección.

Con el depósito de la serie Eoceno, la geometría de la cubierta sedimentaria en la sección se engruesa de manera importante hacia la porción nororiental, con lo que viene a desaparecer el marcado contraste de espesores prevaleciente para finales del Paleoceno (Figs. 48 y 51). Para la finalización del Eoceno, de manera general, la cubierta sedimentaria presentaba una geometría más homogénea con un espesor promedio de alrededor de 5 500 m.

ANALISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

POZO	POROSIDAD FINAL (%)		ESPESOR (m)		TASA DE SEDIMENTACION (m/Ma - mm/año)
	CIMA	BASE	ACTUAL	DESCOMPACTADO	
1	13.3	12.4	160	288.8	14 - 0.014
2	8.8	8.0	235	430.3	20 - 0.020
3	9.4	8.3	290	521.4	25 - 0.025
4	15.4	13.3	340	588.8	27 - 0.027
5	15.2	12.9	375	623.0	29 - 0.029
6	19.6	14.4	714	1062.7	50 - 0.050
7	14.8	13.4	240	415.5	20 - 0.020
8	8.8	7.5	363	642.0	30 - 0.030
9	5.7	5.5	85	170.9	8 - 0.008
10	5.2	4.0	600	1030.4	49 - 0.049
11	18.5	11.5	1100	1564.2	74 - 0.074
12	10.6	5.0	1723	2422.0	114 - 0.114
13	14.4	6.9	1723	2358.5	111 - 0.111

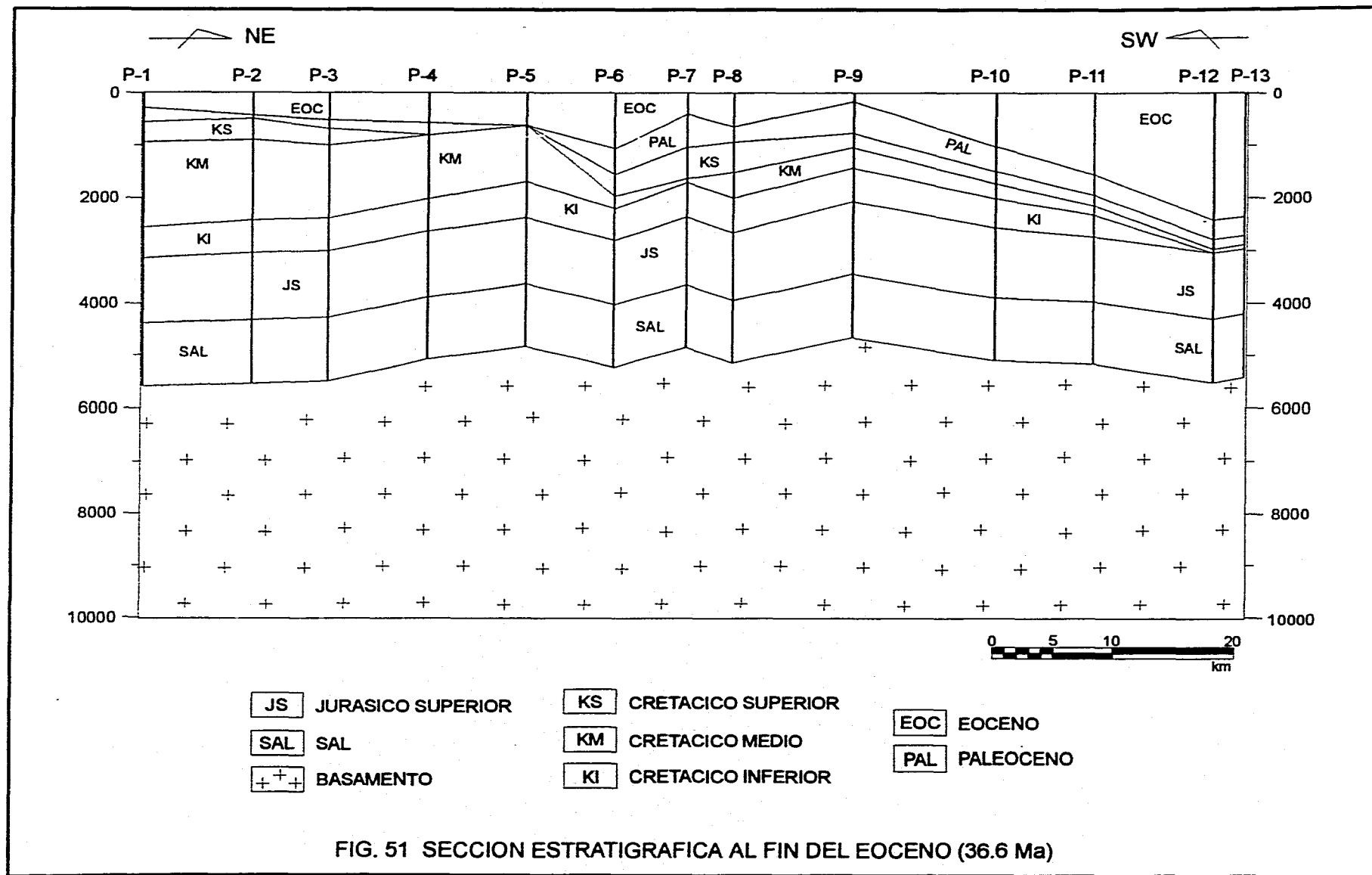
FIG. 50 TABLA DE POROSIDAD FINAL, ESPESOR Y TASAS DE SEDIMENTACION DE LA SERIE EOCENO

Se definen algunas irregularidades hacia la parte media de la sección, hacia la zona de los pozos 5, 7 y 9, en donde la cubierta sedimentaria manifiesta ligeros adelgazamientos de espesor; en la porción de la primera localidad, debido a que con este depósito se reinició allí la acumulación, y en las dos últimas, porque este depósito fue proporcionalmente muy escaso.

La proporción de compactación que sufrieron los espesores de depósito de esta serie, en la mayor parte de los puntos de control de la sección se encuentran dentro de un rango de porcentaje del 40 % al 45 %, pero en la localidades de los pozos 6, 11, 12 y 13, se registra una proporción sensiblemente menor, 33 %, 30 %, 29 % y 27 % respectivamente. En

la localidad del Pozo 9 se estima el mayor porcentaje de compactación con el 50 %.

El mayor grado de compactación en esta localidad del Pozo 9, coincide con uno de los puntos de control de la sección en donde se estiman los más bajos valores de porosidad para el Eoceno (Figs. 49 y 50), que indican la zona de mayor grado de sepultamiento experimentado por dicha serie, pero en la otra localidad de éstas últimas, en el Pozo 10, la proporción de compactación es notablemente menor, de 42 %. Esto se debe a que en la primera localidad la serie se presenta con el menor espesor de la sección, 171 m, mientras que en la segunda se tiene un espesor bastante más importante, de 1030 m.



Las localidades con menor sepultamiento del Eoceno en la sección, los pozos 6 y 10, tampoco coinciden con aquéllas en donde se manifiesta la menor proporción de compactación, los pozos 12 y 13, debido también a que en éstos últimos, se presentan los mayores espesores de la serie, los cuales, de esta manera, influyen retardando el grado de compactación, aún cuando dicha serie haya sido ligeramente más profundizada.

#### **Serie Oligoceno**

La manera y el grado de disminución de la porosidad por sepultamiento que experimenta la serie Oligoceno, a lo largo de la sección, se visualiza por medio de las pendientes que describen las líneas de comportamiento de la cima y la base de la unidad en las gráficas Porosidad-Tiempo, las cuales se elaboraron a partir de los valores de porosidad obtenidos para dicha serie con el modelado (Fig. 52).

Las gráficas correspondientes a los pozos 7 y 8 no fueron elaboradas, debido a la ausencia que se marca de esta serie en esas localidades por efectos de erosión (Figs. 9 y 12).

La predominancia de pendientes suaves en las gráficas de los pozos 4, 5, 6 y 11, repercute en que, para el tiempo actual, aquí es donde se tengan los valores más altos de porosidad, los cuales se encuentran en alrededor del 20 % en promedio (Fig. 53), lo que es indicativo de las zonas de la sección en la que menor cantidad de sepultamiento experimentó la serie.

En las localidades de los pozos 5 y 11 inclusive, la diferencia de porosidad que se tiene entre la cima y la base de la serie, dados también los espesores relativamente importantes de ésta última, no experimenta una alta reducción, llegando a mantenerse todavía de manera apreciable para el tiempo actual.

Los menores valores de porosidad final, por su parte, se tienen desarrollados en las localidades de los pozos 9 y 10, con alrededor del 7.5 %, señalando la porción de la sección en donde el Oligoceno fue más profundamente sepultado. Los valores de porosidad final de la serie en todos los puntos de control de la sección, se sintetizan en la tabla de la Figura 53.

El espesor descompactado más delgado de la serie, ocurre en la zona del Pozo 6, con un depósito de 257 m, mientras que el más potente se estima en la localidad del Pozo 10 con un desarrollo de 1078 m (Fig. 53).

De una manera general, los espesores descompactados de las primeras cinco localidades de la sección, de los pozos 1 al 6, son relativamente más delgados que aquéllos que se presentan en las localidades de los pozos 9 al 11, no conociéndose la relación que se guarda entre ambos grupos, ya que en la zona de los pozos 7-8, la serie fue removida por erosión (línea doble en Fig. 53). Los espesores de las localidades de los pozos 12 y 13, respecto a estos últimos, son más delgados.

En los pozos 7 al 8, se contempló un depósito de 300 y 450 m de espesor de esta serie

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

respectivamente (Fig. 12), los cuales fueron posteriormente erosionados.

Las tasas de sedimentación relacionadas con el primer grupo de estos espesores, varían de 20 a 59 m/Ma (0.020 a 0.059 mm/año), pero con la predominancia los valores mayores, ya que el valor mínimo es uno solo (Fig. 53). Para el segundo grupo de espesores, estas tasas varían de 76 a 84 m/Ma (0.076 a 0.084 mm/año).

En la sección estratigráfica para el tiempo de los 23.7 Ma, a la finalización del depósito de la serie Oligoceno, el grupo de espesores delgados de ésta última, se distribuye a lo largo de la porción suroccidental, mientras que, los espesores gruesos se manifiestan en el sector nororiental (Fig. 54).

Este engrosamiento de la serie que, de manera general, se describe con una dirección SW-NE, caracteriza a este último sector, como la zona en la que se llevó a cabo el mayor hundimiento.

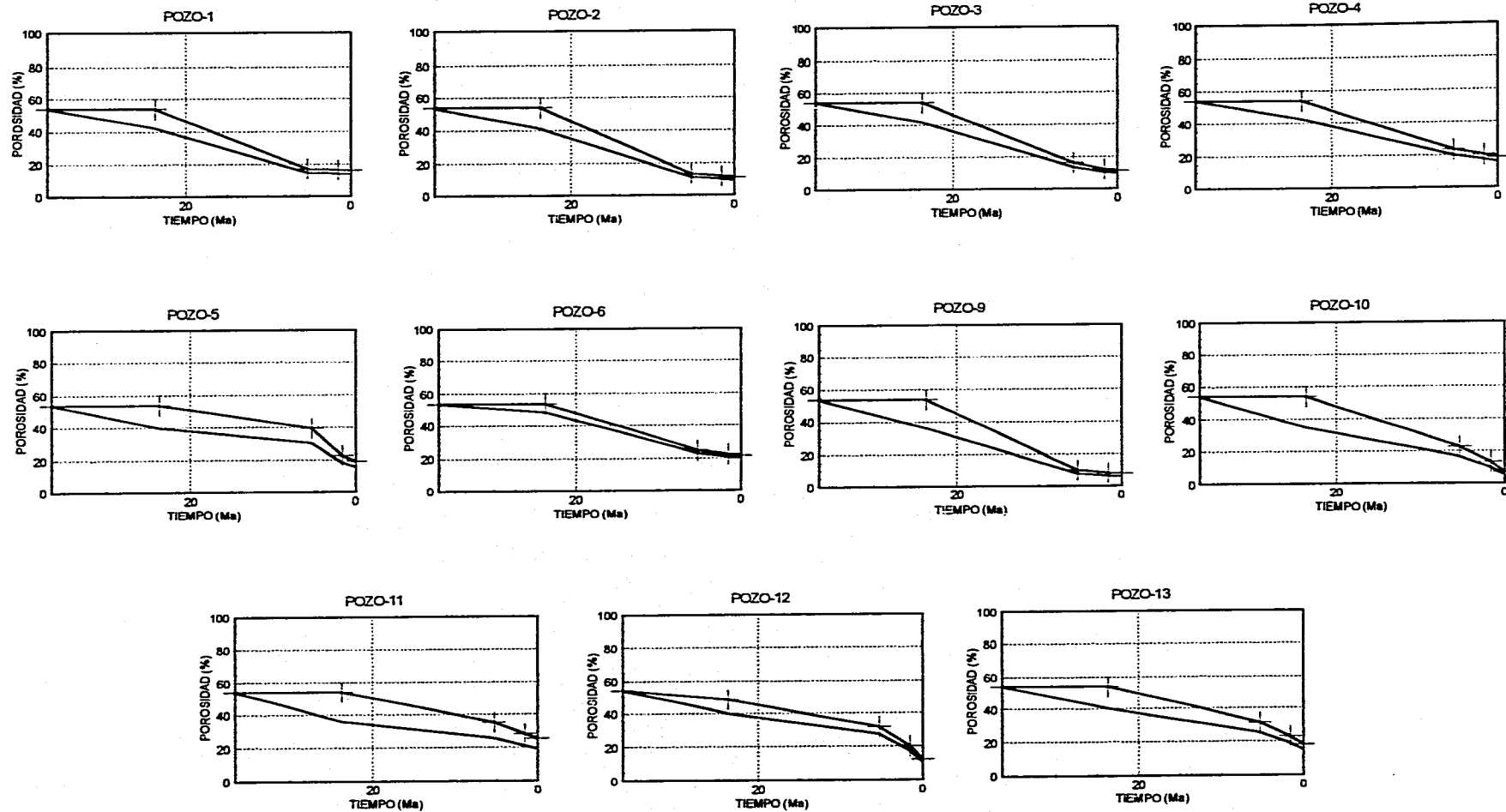
Para este tiempo, los depósitos aquí considerados de la serie ya no se presentan en la zona de los pozos 7 al 8, por lo cual se define un acunamiento desde ambos extremos de la sección hacia estas localidades, lo que, como resultado relativo, describe a la zona con la aparente ausencia de hundimiento, cuando sí lo hubo y fue seguido de un levantamiento.

Hacia la región del Pozo 12, además del depósito de la serie Oligoceno, para este tiempo, también, se registra el emplazamiento

por medio de fallamiento inverso, de un paquete alóctono de columna sedimentaria (F-OLI en Fig. 54). Con el depósito de la serie Oligoceno y este emplazamiento alóctono, la geometría de la cubierta sedimentaria en la sección, se engruesa un poco más marcadamente en la porción nororiental que en la suroccidental, pero sin experimentar una modificación muy notable respecto a la geometría que se tenía a fines del Eoceno, aunque ahora, con un espesor de alrededor de 6 000 m.

En detalle, este espesor de la cubierta sedimentaria se manifiesta desarrollado hacia ambos extremos de la sección, ya que hacia la porción media de ésta se define un paulatino adelgazamiento que tiene su culminación en la localidad del Pozo 7 (Fig. 54), en donde se tiene un espesor de alrededor de los 5 000 m.

La mayor proporción de compactación que sufre la serie, se registra en las localidades de los pozos 2 y 3, con un 41 %, las cuales no coinciden con la zona en la que se desarrolló la mayor pérdida de porosidad y, por lo tanto, el mayor sepultamiento, en los pozos 9 y 10 (Figs. 52 y 53), debido a que en éstos últimos la serie se presentó con un mayor espesor. Aunque se debe señalar que, dado este relativamente mayor grado de sepultamiento, el porcentaje de compactación fue también alto, alrededor del 40 %, lo cual ocasionó que el mayor espesor descompactado de la sección (Pozo 10 con 1078 m), en la época actual se manifieste más delgado que un espesor descompactado menor (Pozo 11 con 981 m), con 650 por 700 m respectivamente (Fig. 53).



Línea Superior - Porosidad en la cima de la unidad    Línea Inferior - Porosidad en la base de la unidad

**FIG. 52 VARIACION DE LA POROSIDAD A TRAVES DEL TIEMPO DE LA SERIE OLIGOCENO EN LA SECCION**



ANALISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

POZO	POROSIDAD FINAL (%)		ESPESOR (m)		TASA DE SEDIMENTACION (m/Ma - mm/año)
	CIMA	BASE	ACTUAL	DESCOMPACTADO	
1	16.2	14.0	385	595.27	46 - 0.046
2	11.0	9.4	383	653.53	51 - 0.051
3	11.6	10.0	370	629.95	49 - 0.049
4	18.6	16.0	360	573.90	44 - 0.044
5	19.4	15.8	492	757.28	59 - 0.059
6	21.5	20.2	158	256.55	20 - 0.020
9	7.9	6.2	588	983.92	76 - 0.076
10	7.4	5.7	650	1078.20	84 - 0.084
11	25.4	19.1	700	981.48	76 - 0.076
12	12.6	11.2	286	453.07	35 - 0.035
13	18.1	15.0	450	707.13	55 - 0.055

FIG. 53 TABLA DE POROSIDAD FINAL, ESPESOR Y TASAS DE SEDIMENTACION DE LA SERIE OLIGOCENO

De hecho, la menor proporción de compactación de la serie, se tiene registrada en la localidad del Pozo 11 con un 29 %, coincidiendo con la zona de menor reducción de porosidad y, por lo tanto, la de menor sepultamiento de dicha serie.

**Serie Mioceno**

La evolución de la porosidad con el sepultamiento de la serie Mioceno durante el Neógeno y Cuaternario, en los distintos puntos de control de la sección, se muestra en las gráficas Porosidad-Tiempo de cada uno de estos puntos (Fig. 55).

La reducción de porosidad que se marca desarrollada en la serie, en la mayor parte de la sección, se manifiesta cuantitativamente de manera mucho más atenuada que la registrada en todas las demás series anteriores, ya que, como se ha visto, viene a constituir ya una de las últimas unidades de la cubierta sedimentaria de la sección.

La diferencia de porosidad entre la cima y la base de la serie, se mantiene para el tiempo actual, todavía con una relación sensiblemente alta en la mayoría de las localidades de control, debido principalmente a que el Mioceno constituye un depósito predominantemente de espesor grueso.

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

El menor sepultamiento de la serie, se registra en la zona de los pozos 1 y 6, en donde se definen los mayores valores de porosidad final con 48.9 % y 44.2 % respectivamente, mientras que el mayor profundizamiento se le marca en la porción de los pozos 10 y 12, en donde se caracterizan porosidades finales con valores de 14.2 % y 18.6 % respectivamente. Los demás valores de porosidad final de la serie en los restantes puntos de control de la sección, se resumen en la Figura 56.

Los espesores descompactados estimados para la serie en los diferentes puntos de control de la sección, se muestran también en esta tabla de la Figura 56, de los cuales, el mayor y el menor espesor se presentan en las localidades de los pozos 9 y 12 respectivamente con 4 090 y 539 m.

Los espesores que se definen para esta serie, predominantemente con valores bastante importantes, la caracterizan como el depósito más grueso de toda la cubierta sedimentaria de la sección. La presencia local de espesores relativamente más delgados (pozos 5 y 12), permite separar en cuando menos dos grupos los demás espesores relativamente más gruesos, uno en el que se incluyen los de los pozos 1 al 4, y otro, con aquéllos de los pozos 6 al 11.

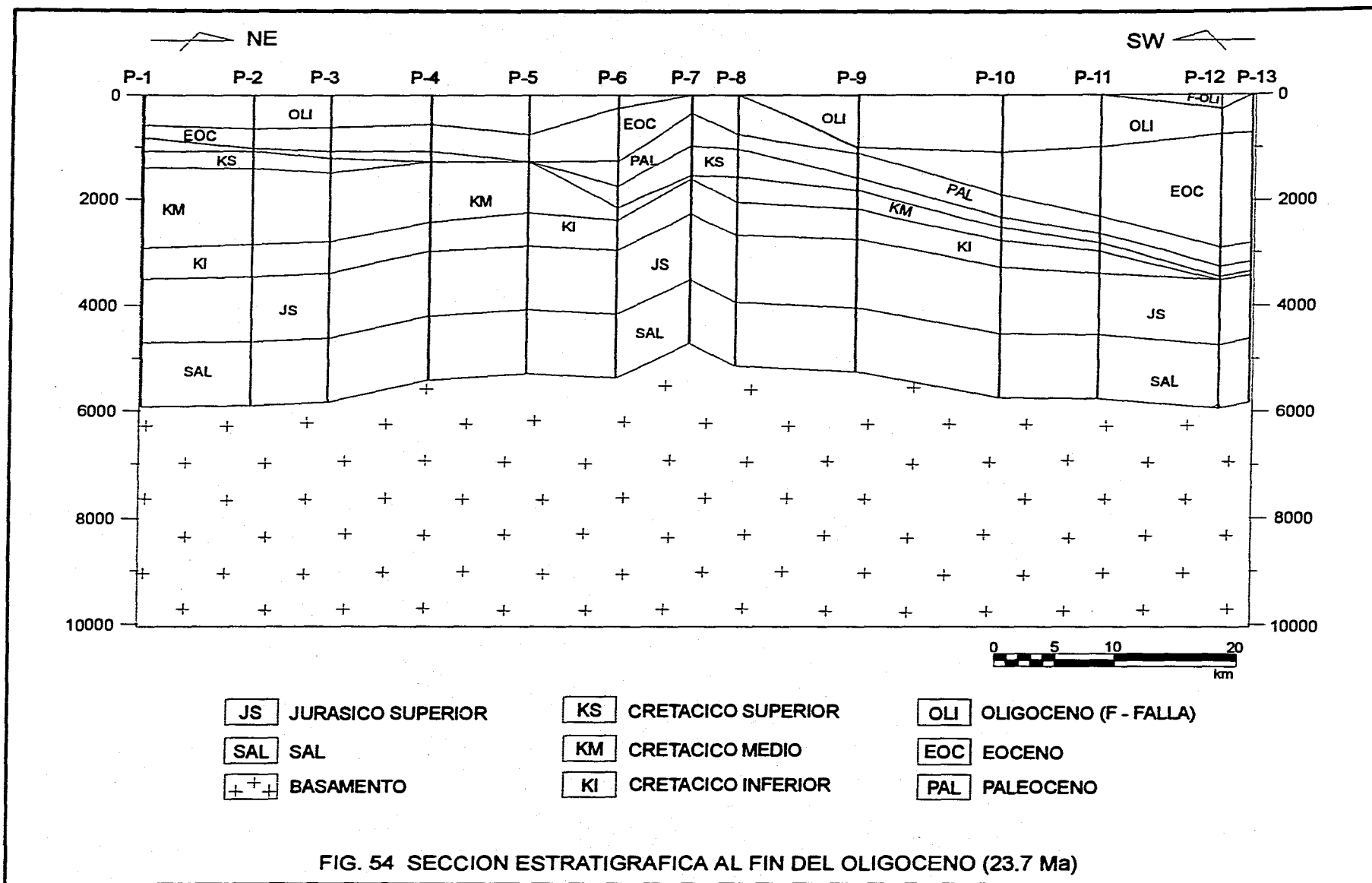
Dado que las tasas de sedimentación se establecen a partir de los espesores descompactados de la serie, las relaciones de este tipo que se obtienen, son en su mayoría cuantitativamente altas.

La proporción mínima, para la localidad del Pozo 12, se estima con una relación de 60 m/Ma (0.060 mm/año), mientras que la máxima, que se refiere para la zona del Pozo 9, se presenta con un valor de 235 m/Ma (0.235 mm/año). En general (Fig. 56), en la sección predominan las proporciones entre 100 y 200 m/Ma (entre 0.1 y 0.2 mm/año).

Dados los espesores descompactados de esta serie, su depósito se caracteriza por el desarrollo de dos zonas de máximo hundimiento o centros de subsidencia de dimensiones relativamente considerables. Uno ubicado en la porción suroccidental de la sección, que comprende la zona de los pozos 1 al 4, y el otro hacia la parte central de la misma, en la zona de los pozos 7 al 10, con los máximos espesores en los pozos 2 y 9 respectivamente, como se puede observar en la sección estratigráfica que se presenta en la Figura 57, a la finalización del Mioceno.

Las zonas de la sección relativamente con menos hundimiento para el depósito de esta serie, son también dos y se desarrollan, una en la porción de los pozos 4 al 7, y otra hacia el extremo noreste de la sección, de los pozos 10 al 13.

Con el depósito de esta serie, la geometría de la cubierta sedimentaria de la sección se modifica substancialmente respecto a la del Oligoceno, describiéndose ahora con una forma muy parecida a la definida para la acumulación del Mioceno, es decir, con dos zonas con un espesor más potente, y con dos porciones de espesor más delgado (Fig. 57).



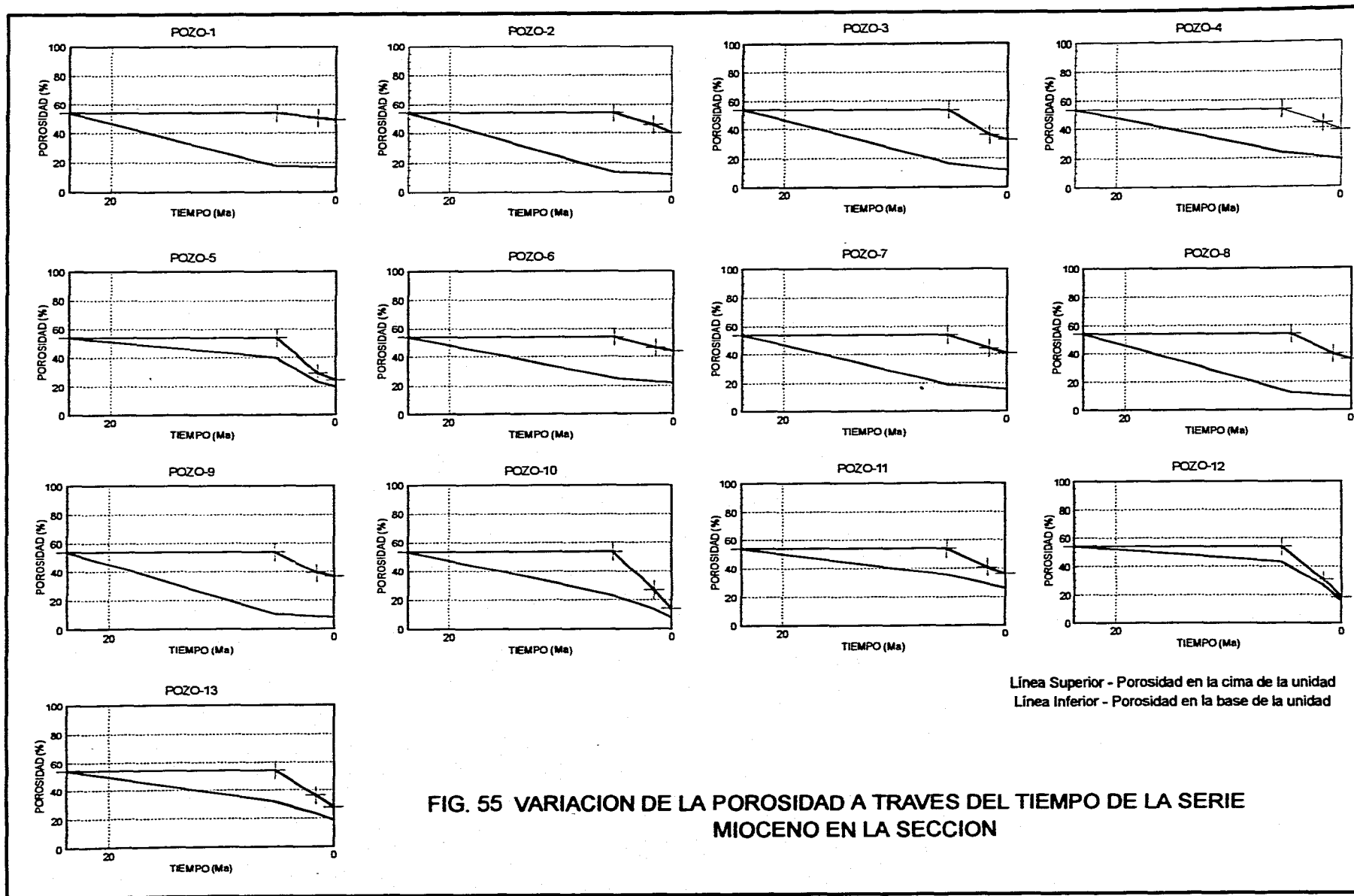


FIG. 55 VARIACION DE LA POROSIDAD A TRAVES DEL TIEMPO DE LA SERIE MIOCENO EN LA SECCION

ANALISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

POZO	POROSIDAD FINAL (%)		ESPESOR (m)		TASA DE SEDIMENTACION (m/Ma - mm/año)
	CIMA	BASE	ACTUAL	DESCOMPACTADO	
1	48.9	16.7	2685	2788	160 - 0.160
2	40.1	11.5	3132	3423	197 - 0.197
3	32.8	12.0	2500	2911	167 - 0.167
4	38.8	19.1	1774	2032	117 - 0.117
5	24.5	19.8	528	769	44 - 0.044
6	44.2	22.0	1741	1907	110 - 0.110
7	41.1	15.9	2368	2615	150 - 0.150
8	35.8	9.8	3237	3619	208 - 0.208
9	36.5	8.3	3709	4090	235 - 0.235
10	14.2	7.8	1500	2109	121 - 0.121
11	36.3	25.9	840	1041	60 - 0.060
12	18.6	16.3	336	539	31 - 0.031
13	27.7	18.6	1000	1328	76 - 0.076

FIG. 56 TABLA DE POROSIDAD FINAL, ESPESOR Y TASAS DE SEDIMENTACION DE LA SERIE MIOCENO

Los sectores de la sección en los que la cubierta sedimentaria se manifiesta con un engrosamiento de importancia, son las zonas en los que se marca el desarrollo de los centros de subsidencia del Mioceno, en donde se presenta un espesor de hasta poco más de los 8 000 m. En el extremo noreste de la sección, la zona de los pozos 11 al 13, la cubierta es más delgada, y tiene un espesor de alrededor de los 6 500 m, algo similar a lo que se define en la zona de los pozos 5 al 7, la otra porción con una cubierta sedimentaria adelgazada, en la que la porción del pozo 5, tiene el espesor mínimo, con aproximadamente 6 000 m.

Con el posterior sepultamiento que experimenta la serie Mioceno, la relación de espesores descompactados-espesores actuales

de ésta, indica para la zona de los pozos 1 al 9 una proporción de compactación en general de carácter bajo, menor al 15 %, aunque localmente en la localidad del Pozo 5, en donde se tiene el espesor más delgado de la serie en este sector, se establece una relación del 31 %. Para la porción restante de la sección, la zona de los pozos 10 al 13, la relación de compactación que se obtiene, es bastante mayor, y varía del 19 % al 38 %.

Los mayores porcentajes de compactación de la serie, del 29 % y 38 % en los pozos 10 y 12 respectivamente, coinciden con las zonas de mayor reducción de la porosidad de dicha serie (Fig. 56). Aunque de éstos, el menor corresponde con el mayor sepultamiento y viceversa, la mayor compactación con el

menor sepultamiento, debido a que en el primer caso se presenta un mayor espesor de la serie que en el segundo.

La menor proporción de compactación en la sección, con un valor del 4 %, coincide con la localidad de la menor reducción de porosidad por sepultamiento, esto es en el Pozo 1.

### **Serie Plioceno**

En la serie Plioceno, la evolución de la porosidad que con el sepultamiento se desarrolla durante parte del Neógeno y Cuaternario, los últimos 5 Ma, en cada uno de los puntos de referencia de la sección, se visualiza en las respectivas gráficas Porosidad-Tiempo de estas localidades (Fig. 58).

La reducción de porosidad que la serie experimenta, ya no es tan pronunciada como en las unidades precedentes dado que constituye la penúltima serie de la cubierta sedimentaria de la sección, y sólo una serie más que se deposita sobre ella, provoca algo de sepultamiento y la modificación de su porosidad, como se puede observar de manera más marcada, en las gráficas de los pozos 10, 12 y 13.

La diferencia de porosidad entre la cima y la base de la serie, para el tiempo actual, con excepción de las localidades que se acaban de mencionar, casi se mantiene sin cambio desde

que termina su depósito. De hecho es el caso de la localidad del Pozo 1, en donde ya no se tiene un depósito más joven (Figs. 9, 12 y 58)

La mayor reducción de porosidad de la serie se marca desarrollada en los pozos 10 y 12, en donde se estiman valores de porosidad final de 25.1 % y 28.8 % respectivamente, siendo las zonas de mayor sepultamiento de la serie dentro de la sección. El menor sepultamiento se registra en la zona del Pozo 6, en donde se obtiene el valor de porosidad más alto con un 49.2 %. Los demás valores de porosidad de los otros puntos de control de la sección, intermedios entre los valores máximo y mínimo mencionados, se sintetizan en la tabla de la Figura 59.

Los espesores descompactados estimados, con que se caracteriza el depósito de esta serie en los diferentes puntos de control de la sección, se resumen también en esta misma tabla. El máximo espesor se tiene en la localidad del Pozo 10, con 1 724 m, mientras que el mínimo se presenta en el Pozo 6 con 367 m.

En la localidad del pozo 1, el espesor presente actual, dado que ya no experimentó ningún sepultamiento, representa el espesor de depósito de la serie en ese punto.

De una manera general, espesores relativamente más delgados tienden a presentarse en los primeros siete pozos, no considerando las localidades de los pozos 3 y 5, mientras que en los seis restantes, de los pozos 8 al 13, se manifiestan de carácter relativamente más grueso.

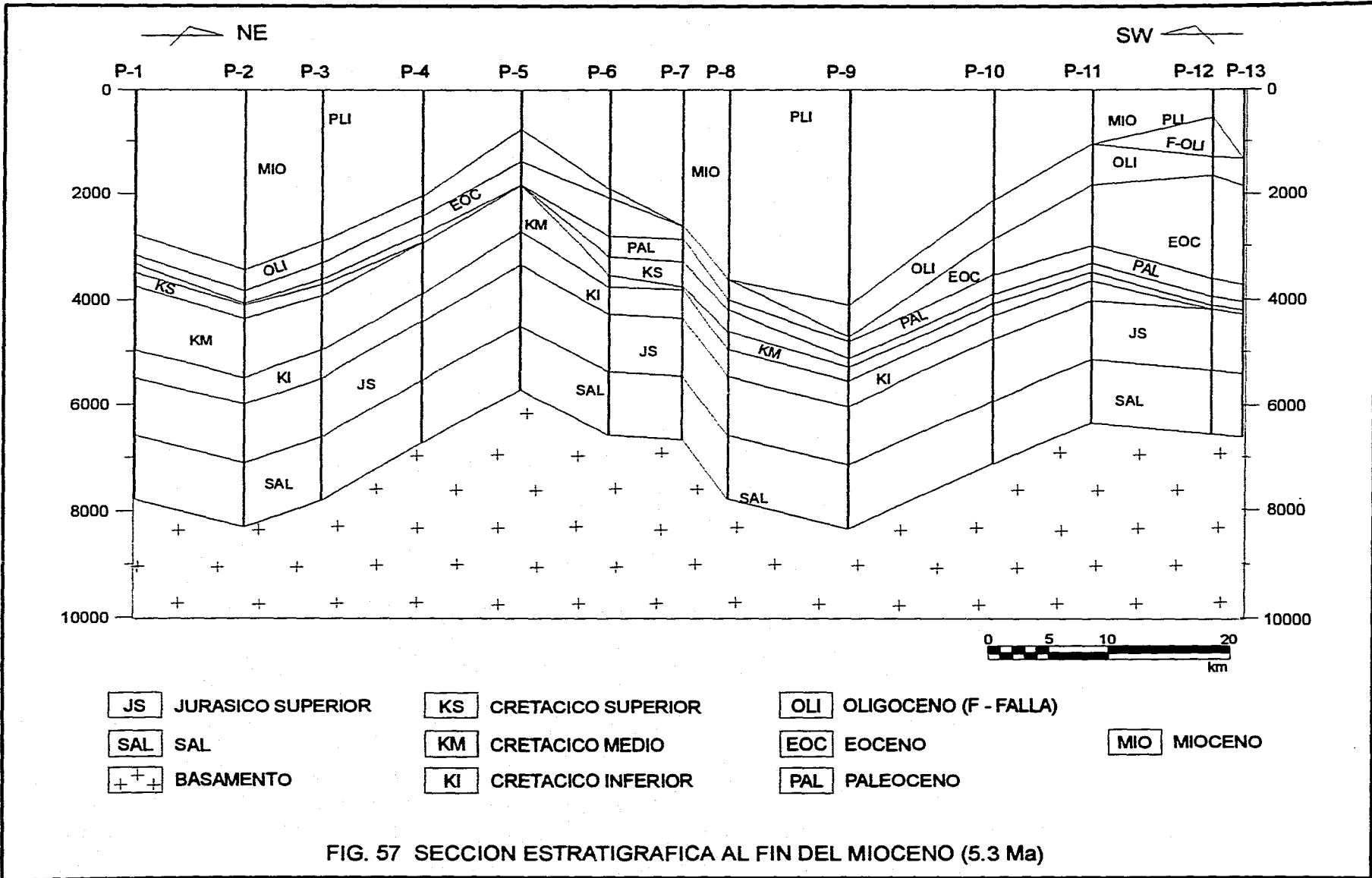


FIG. 57 SECCION ESTRATIGRAFICA AL FIN DEL MIOCENO (5.3 Ma)

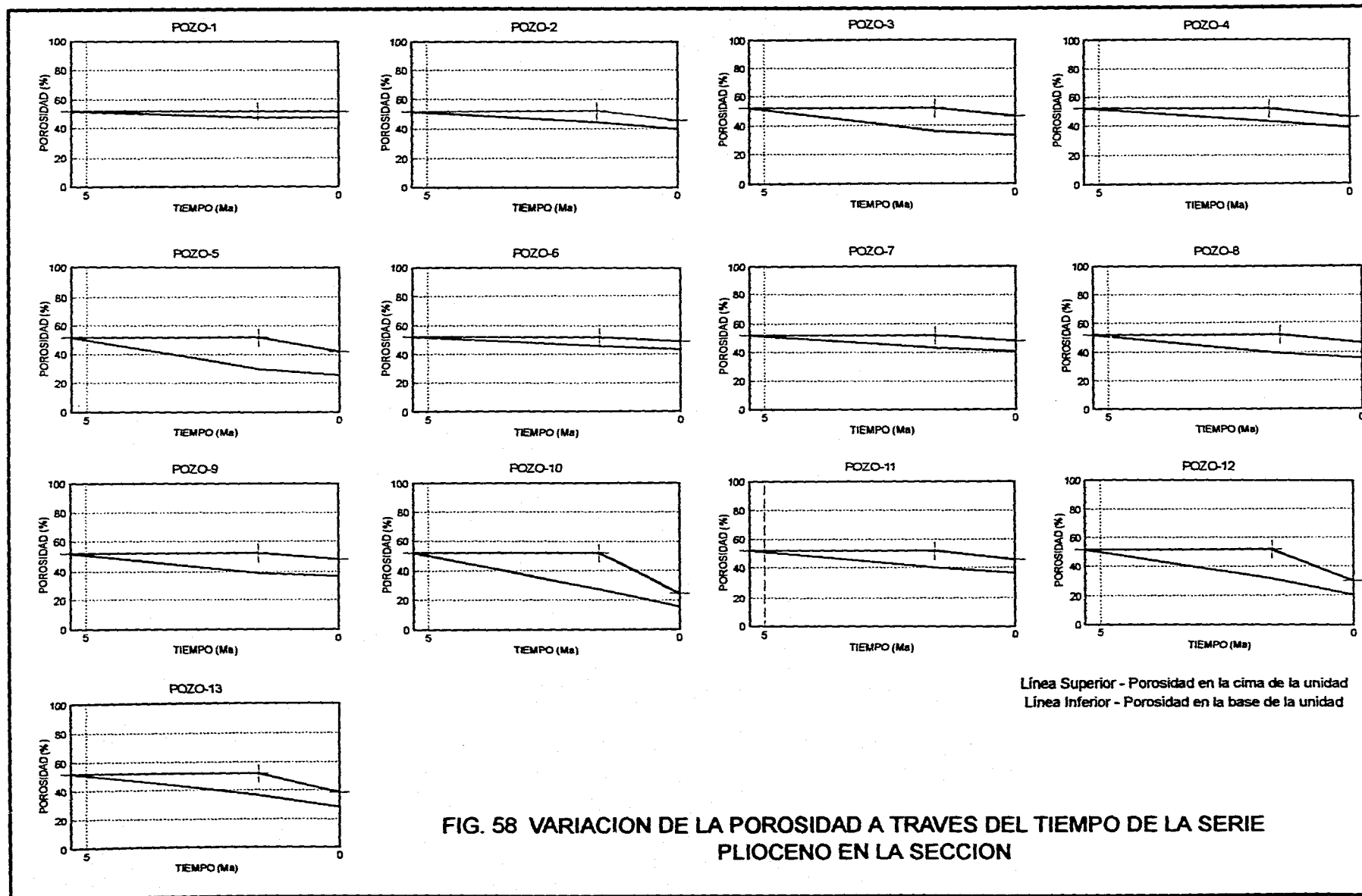


FIG. 58 VARIACION DE LA POROSIDAD A TRAVES DEL TIEMPO DE LA SERIE PLIOCENO EN LA SECCION



ANALISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

POZO	POROSIDAD FINAL (%)		ESPESOR (m)		TASA DE SEDIMENTACION (m/Ma - mm/año)
	CIMA	BASE	ACTUAL	DESCOMPACTADO	
1	52.0	47.5	250	250	68 - 0.068
2	45.6	39.8	380	421	114 - 0.114
3	46.6	33.2	945	1013	274 - 0.274
4	45.9	38.6	480	527	142 - 0.142
5	42.0	25.5	1378	1535	415 - 0.415
6	49.2	43.4	350	387	99 - 0.099
7	48.3	40.7	476	505	136 - 0.136
8	46.5	38.0	716	773	209 - 0.209
9	47.8	38.6	746	791	214 - 0.214
10	25.1	15.6	1320	1724	466 - 0.466
11	45.9	36.3	647	707	191 - 0.191
12	29.8	20.0	1110	1414	382 - 0.382
13	38.5	28.5	631	986	266 - 0.266

FIG. 59 TABLA DE POROSIDAD FINAL, ESPESOR Y TASAS DE SEDIMENTACION DE LA SERIE PLIOCENO

Las proporciones de sedimentación que se le estiman a la serie en los diferentes puntos de control de la sección, son cuantitativamente altas (Fig. 59). La menor tasa de sedimentación se establece en la localidad del Pozo 1 con una relación de 68 m/Ma (0.068 mm/año), mientras que la mayor se tiene en el punto del Pozo 10 con una relación de 466 m/Ma (0.466 mm/año).

Comparativamente, estas tasas de sedimentación de la serie Plioceno, son de una manera general mayores que las de la serie Mioceno, las que también se estimaron con una relación de carácter alto, y son indicadoras de un notable incremento en el aporte y acumulación de materiales clásticos en la región de la sección para este tiempo.

La geometría del depósito de la serie Plioceno, dados los espesores que la caracterizan, se define con un aspecto bastante irregular en la sección estratigráfica para el tiempo de los 1.6 Ma, a la finalización del Plioceno (Fig.60). De una manera general, en el sector noreste de la sección, la porción comprendida de los pozos 8 al 13, es en donde se marca desarrollado el mayor hundimiento con el depósito de esta serie, y específicamente hacia la zona del Pozo 10, el más pronunciado. En el sector suroccidental, este hundimiento es relativamente menor, aunque la excepción se tiene en los pozos 3 y 5, en donde sí es de importancia.

Con este depósito, la geometría de la cubierta sedimentaria de la sección, aunque con un

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

mayor grosor, no difiere mucho de la que se presentaba a la finalización del Mioceno, ya que se continúa caracterizando subdividida en cuatro sectores con diferente espesor, dos porciones relativamente más gruesas y dos relativamente más delgadas.

Un sector de espesor grueso, con hasta 8 400 m, lo definen las localidades de los pozos 1 al 3, en la porción suroccidental de la sección; el otro sector de este tipo, con un espesor de hasta 8 700 m, se describe en la zona de los pozos 8 al 10. Por su parte, un sector de cubierta sedimentaria de espesor relativamente más delgada se define en la zona de los pozos 4 al 7, con alrededor de 7 000 m de columna y, el otro, en el extremo noreste de la sección, en la zona de los pozos 11 al 13, con un espesor de hasta 7 400 m.

La proporción de compactación que experimentó esta serie con el sepultamiento, es en general de baja magnitud, menor al 10 %, aunque en algunas localidades sí se llega a exceder este porcentaje. La menor proporción de compactación se desarrolla en la localidad del Pozo 5, en donde se registra un 5 %, la cual coincide con la obtención de una menor reducción de la porosidad en la serie (Figs. 58 y 59) y, por lo tanto, de menor sepultamiento de ésta última.

Las mayores proporciones de compactación de la serie, se registran en las localidades de los pozos 10 y 12 con un 23 % y 21 %, coincidiendo con las zonas en donde se manifestó una mayor reducción de la porosidad (Figs. 58 y 59), y mayor

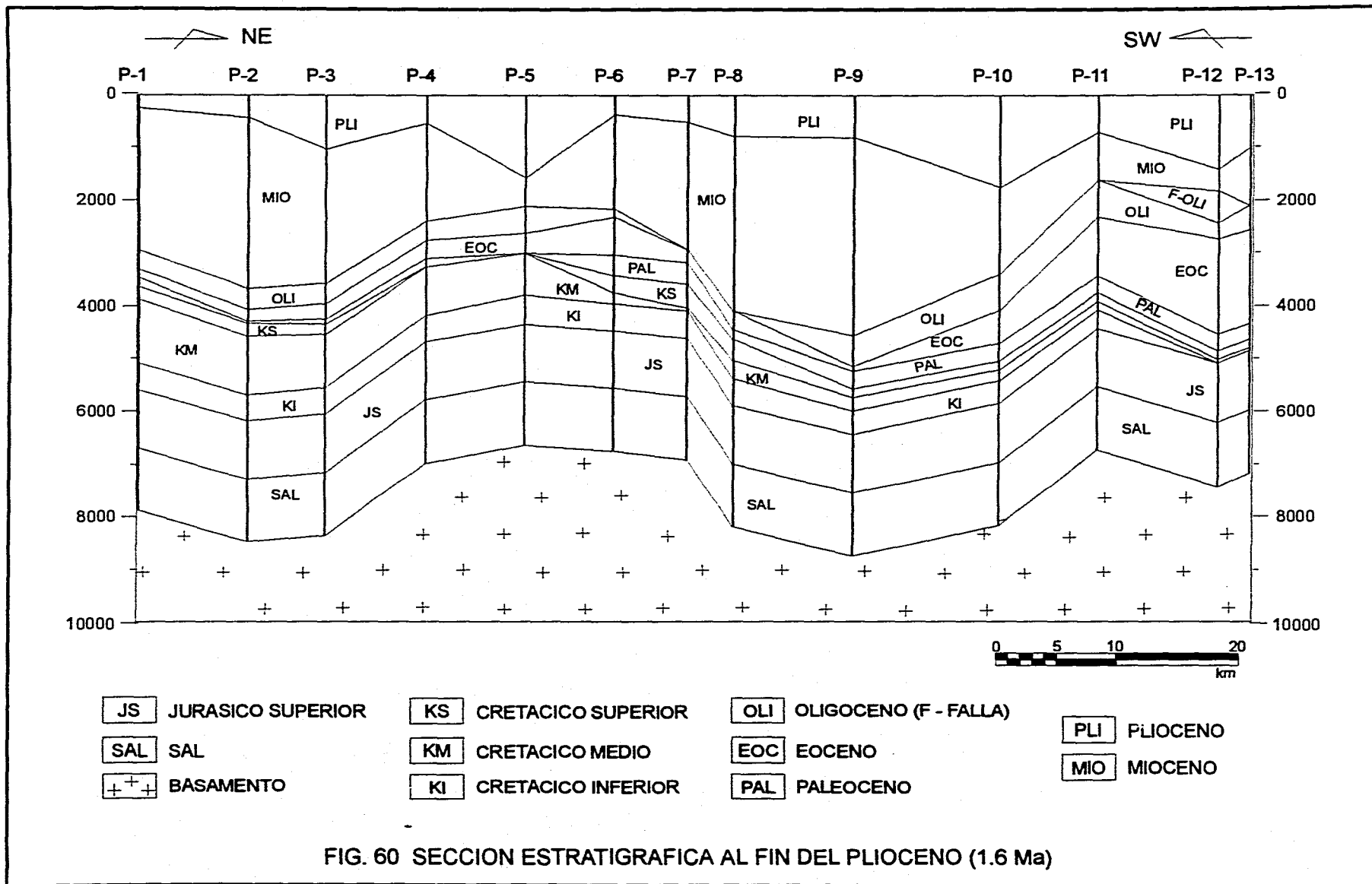
sepultamiento de la serie. En la localidad del Pozo 1, la proporción de compactación del Plioceno es de 0 %, dado que allí ya no hubo sepultamiento de dicha serie.

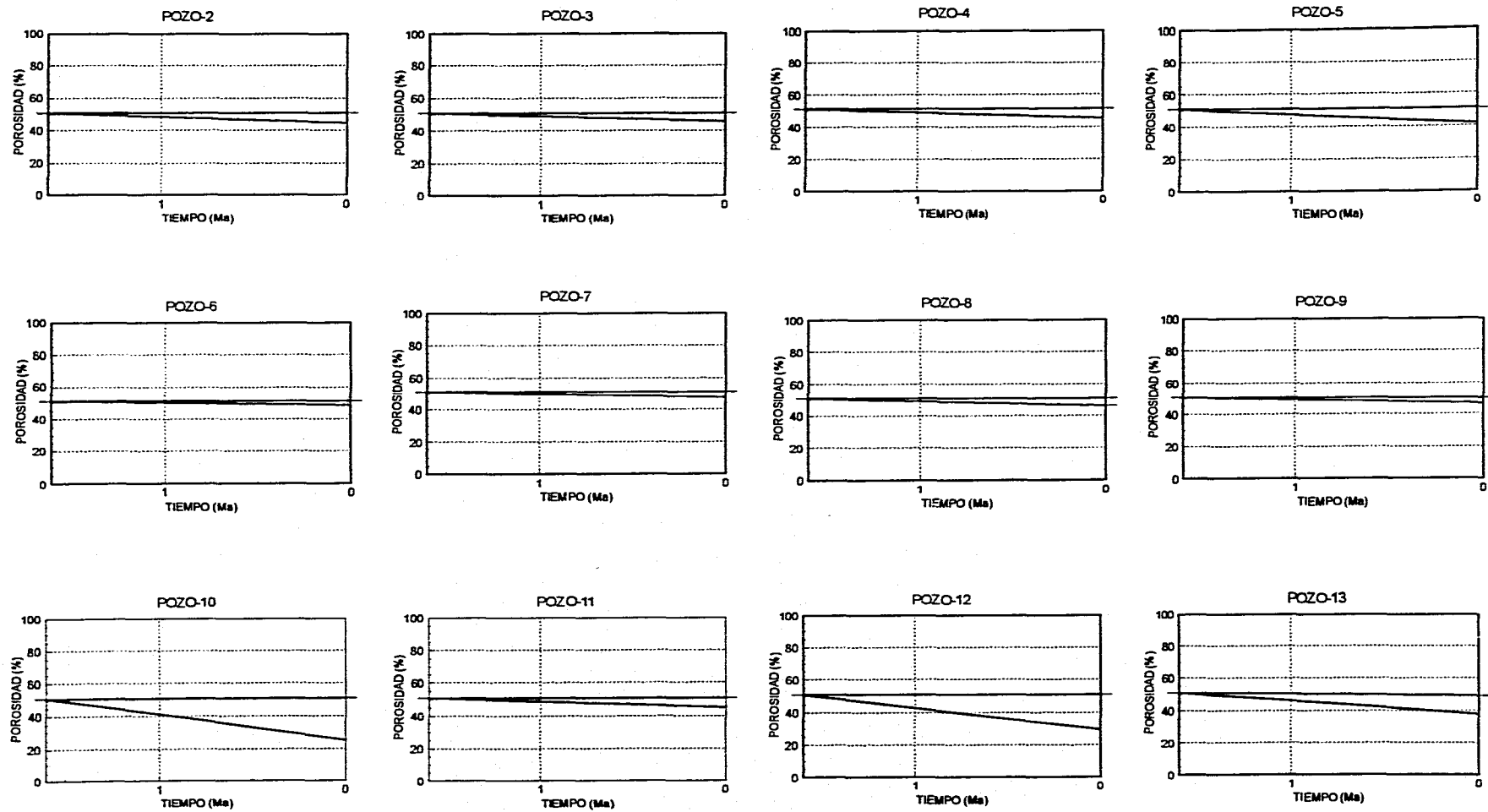
### Serie Pleistoceno

La serie Pleistoceno, ya que prácticamente no ha sufrido sepultamiento, aunque en algunas localidades cubierta por materiales recientes, se considera que no presenta reducción de porosidad por sepultamiento, por lo que su espesor actual es esencialmente el de depósito.

La porosidad del Pleistoceno, sólo varía de la cima a la base de la serie por el hecho mismo de la acumulación de ésta última, por lo que, dependiendo del espesor depositado, es la magnitud de la diferencia de porosidad que se manifiesta en la serie. En las gráficas Porosidad-Tiempo de la serie en los distintos puntos de control de la sección (Fig. 61), las diferencias de porosidad más marcadas se tienen en las localidades de los pozos 10 y 12, en donde se presentan los espesores más potentes de esta serie. Para la localidad del Pozo 1 no se elaboró una gráfica de este tipo, dado que no se reporta allí el depósito de esta serie.

Los valores de porosidad de la cima y la base de la serie, para los diferentes puntos de control de la sección, se sintetizan en la tabla de la Figura 62, en donde se puede observar cuantitativamente la magnitud estimada de esta diferencias de porosidad en cada localidad.





Línea Superior - Porosidad en la cima de la unidad      Línea Inferior - Porosidad en la base de la unidad

**FIG. 61 VARIACION DE LA POROSIDAD A TRAVES DEL TIEMPO DE LA SERIE PLEISTOCENO EN LA SECCION**

ANALISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

POZO	POROSIDAD FINAL (%)		ESPESOR (m)	TASA DE SEDIMENTACION (m/Ma - mm/año)
	CIMA	BASE		
2	51.0	44.9	365	228 - 0.228
3	51.0	45.8	292	183 - 0.183
4	51.0	45.2	346	216 - 0.216
5	51.0	41.4	596	373 - 0.373
6	51.0	48.4	151	94 - 0.094
7	51.0	47.5	206	129 - 0.129
8	51.0	45.8	309	193 - 0.193
9	51.0	47.0	222	139 - 0.139
10	51.0	25.1	2012	1258 - 1.258
11	51.0	45.2	318	199 - 0.199
12	51.0	29.6	1538	981 - 0.981
13	51.0	38.1	734	459 - 0.459

FIG. 62 TABLA DE POROSIDAD FINAL, ESPESOR Y TASAS DE SEDIMENTACION DE LA SERIE PLEISTOCENO

Las proporciones de sedimentación que se estiman para el depósito de la serie Pleistoceno, que se refieren también en la tabla anterior, presentan relaciones cuantitativamente altas, con valores en estrecha relación con las dos series anteriores. La mayor tasa de sedimentación se estima en la localidad del Pozo 10 con una relación de 1 258 m/Ma (1.258 mm/año) y, la menor, en el Pozo 6 con 94 m/Ma (0.094 mm/año).

La geometría del depósito se describe con un espesor relativamente más delgado en el sector suroccidental de la sección, la zona de los pozos 1 al 9, y con un espesor relativamente más grueso en la parte nororiental, de los pozos 10 al 13. Este comportamiento repercute

en el desarrollo de un hundimiento mayor en ésta última porción, que en la primera, el cual es mucho más pronunciado en la zona del Pozo 10 (Fig.13).

Con este depósito, la geometría de la cubierta sedimentaria de la sección para la actualidad, experimenta un engrosamiento general respecto al espesor a la finalización del Plioceno, pero su aspecto no se modifica substancialmente, ya que prevalecen para la actualidad los cuatro rasgos mayores que se definían para ese tiempo, dos zonas con un espesor relativamente más potente y dos con un espesor relativamente más delgado.

En la porción suroccidental de la sección, en la zona de los pozos 1 al 3, se define uno de estos

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

sectores de espesor grueso de hasta 8 700 m (Fig. 13), mientras que en la porción central, en la zona de los pozos 8 al 10, se tiene la definición del otro sector de este tipo, en donde la cubierta sedimentaria alcanza hasta un espesor de más de 9 000 m, siendo con esto la zona con la columna sedimentaria más potente.

En la zona de los pozos 4 al 7 se define uno de los sectores con espesor delgado de la cubierta sedimentaria, el cual tiene un promedio de alrededor de los 7 200 m. El otro sector se tiene en el extremo noreste de la sección, el cual sí muestra un ligero cambio de geometría con respecto a la de finales del Plioceno, ya que la porción del Pozo 11 no se engruesa en la misma magnitud que la porción restante, lo que hace que en esa zona se tenga una columna de alrededor de los 7 000 m, por los 8 000 m que tiene en promedio hacia la zona más nororiental de la sección.

### III.2.3. HISTORIA DE SUBSIDENCIA TOTAL

En la actualidad, en los distintos estudios de modelado de la subsidencia, es más común manejar la subsidencia total corregida que aquella no corregida, razón por la cual, la primera acepción es mayormente referida sin el adjetivo, sólo como subsidencia total, mientras que la segunda, sí con el adjetivo como subsidencia total no corregida.

Esto es debido a que la aplicación de las diferentes correcciones a la subsidencia (dese compactación, paleobatimetría y eustatismo), no representa problema, ya que son realizadas fácil y rápidamente mediante el auxilio de programas informáticos en computadora.

En el presente trabajo se sigue esta consideración, y la subsidencia total a la que se hace referencia, es la de carácter corregido.

La subsidencia total estimada puntualmente en cada una de las trece localidades de control de la sección, se visualiza en las diferentes gráficas Profundidad-Tiempo de dichos puntos (Fig. 63), mediante la curva que define el límite inferior de la zona sombreada. Su comportamiento en el espacio a través del tiempo, se encuentra referido respecto a la actual posición que guarda el nivel del mar, el cual, como se sabe, es representado con una profundidad igual a 0 m.

El comportamiento que define la curva de la subsidencia total, visualizado según las variaciones que describen las formas de las pendientes, es representativo de la dinámica de evolución espacial en el sentido vertical que siguió la cima del basamento de la cuenca a través del tiempo, en los diferentes puntos de control de la sección. Esto es un resultado acumulativo de los fenómenos tectónicos (subsidencia tectónica) y de los efectos inherentes a la acumulación de los materiales sedimentarios (subsidencia gravitatoria).

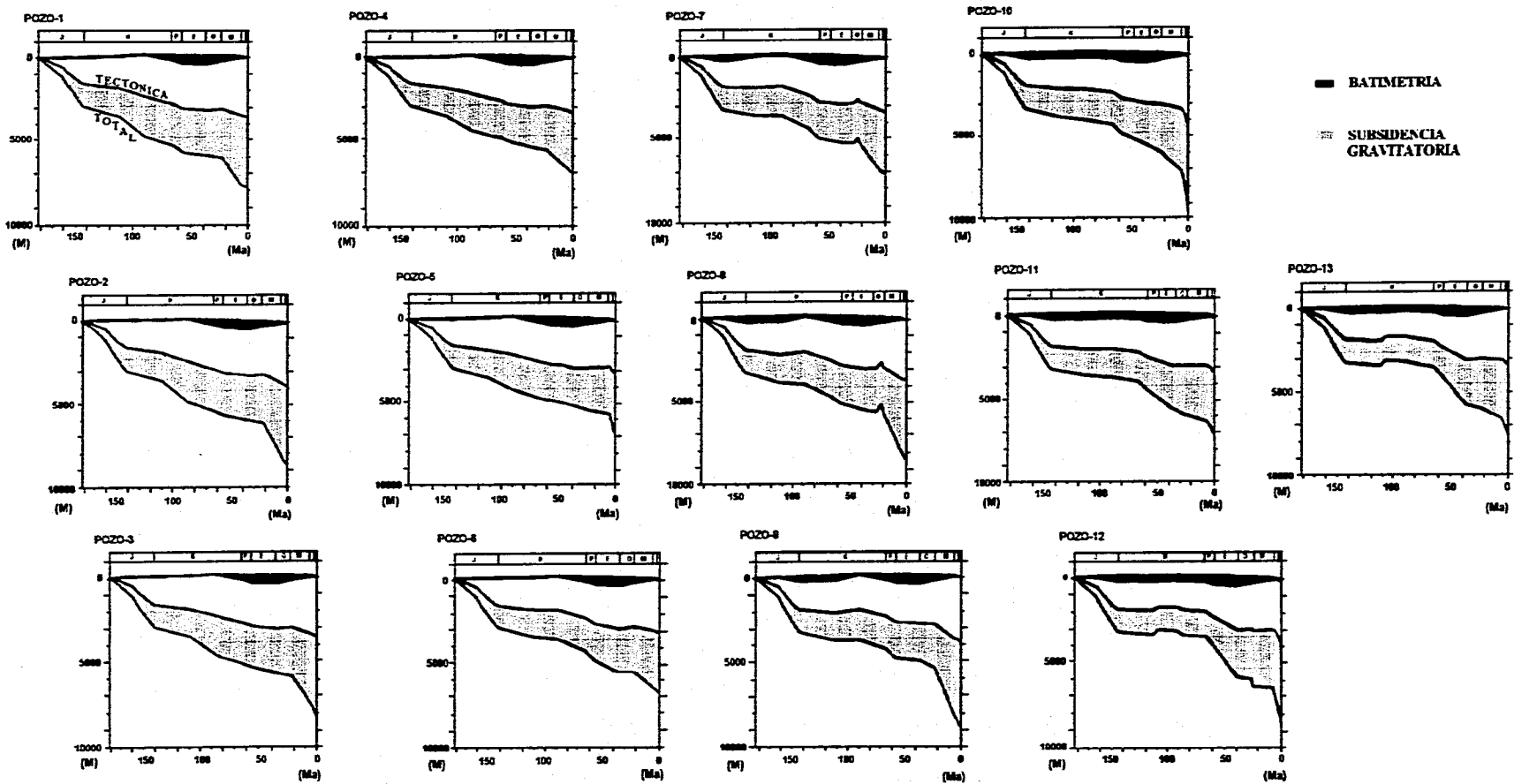


FIG. 63 CURVAS DE SUBSIDENCIA DE CADA UNO DE LOS PUNTOS DE CONTROL DE LA SECCION

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

En estas gráficas Porosidad-Tiempo referidas, las zonas sombreadas representan la cantidad de subsidencia gravitatoria ocasionada por la carga de los sedimentos en cada uno de esos puntos de control de la sección, por lo que la curva que se define como el límite superior de dicha zona sombreada, cuantifica y describe a la subsidencia tectónica.

Las áreas superiores de color continuo (negro) que se observan en las gráficas, representan los cambios de batimetría de la cuenca en cada punto de control de la sección, en donde el límite superior del área, describe la variación en el tiempo del eustatismo del nivel del mar, mientras que, el límite inferior representa el piso marino. Ambos rasgos se encuentran referidos también a la actual posición del nivel del mar.

El comportamiento que de la curva de subsidencia total se observa en cada una de las localidades analizadas de la sección, describe una continua profundización de la cima de basamento, lo cual accedió mediante la alternancia de proporciones variables de subsidencia. Esto último es indicativo de la ocurrencia de varias etapas de aceleración y atenuación de la subsidencia, y aún de subsidencia negativa o levantamiento.

Es de notar también que este comportamiento no es completamente homogéneo a todo lo largo de la sección, sino que de pozo a pozo de referencia, se manifiesta una serie de variaciones laterales en la disposición de las

pendientes. Esto indica una evolución de la subsidencia lateralmente diferencial dentro de la sección, sobre todo después de los 113 Ma, que redundó en el desarrollo de varios bloques individuales a lo largo de ella.

En la Figura 64 se presenta una configuración de la cantidad de subsidencia total desarrollada a lo largo de la sección y a través del tiempo, en la cual se conjuntan dentro de un solo marco de referencia las diferentes gráficas Profundidad-Tiempo, a manera de visualizar dicho comportamiento espacial de la subsidencia de forma integral y, asimismo, poder realzar y analizar cuantitativamente las variaciones antes mencionadas.

En esta configuración, realizada mediante una interpolación matemática de los datos puntuales estimados en los pozos de control de la sección, se pretende simular una respuesta de la litósfera de tipo flexural a lo largo de ésta última, en donde los efectos de subsidencia total, se consideran un poco más allá de cada localidad puntual en donde ésta se estima, tomando en cuenta la manera en que se manifiesta en los puntos adyacentes. En el plano de configuración (Fig. 64), esto se lleva a cabo a lo largo del eje de las X (eje de las abscisas).

Con la consideración del factor tiempo en el eje de las ordenadas (eje de las Y) en este plano de configuración, se consigue la visualización de la evolución de esta subsidencia a través del tiempo (Fig. 64).



Aquí, con base en la disposición que muestran las curvas de configuración, las cuales se representan con un intervalo de espaciamento de 100 m, se pueden diferenciar a lo largo de la sección, cuando menos cinco etapas o fases de distinto comportamiento o proporción de subsidencia total de la cima de basamento, en la evolución que siguió la cuenca en el área de la sección. En la Figura 64, los límites de estas etapas se diferencian por las líneas gruesas.

### **Primera Etapa**

La primera de estas etapas se define presente a lo largo de toda la sección, y se manifiesta acaecida durante el Jurásico. Se caracteriza por el estrecho espaciamento que se guarda entre las curvas de configuración, que describen un comportamiento de fuerte pendiente, la cual se puede observar mejor definida gráficamente en la Figura 65, que constituye la representación tridimensional del plano de configuración de subsidencia total, en donde la escala vertical se presenta exagerada, aproximadamente 2.5 veces la escala horizontal de la sección (el eje de las abscisas en el plano de configuración).

Esta etapa representa una acelerada tasa de subsidencia de la cima de basamento, bajo la cual ésta última alcanza un profundizamiento de alrededor de los 2 800 m en la porción suroccidental de la sección, la parte

comprendida desde el inicio de la misma hasta un poco más allá de la zona del Pozo 5, y de alrededor de los 3 000 m en la restante porción nororiental, la región de los pozos 6 al 13.

### **Segunda Etapa**

La segunda etapa de subsidencia total en la sección, se caracteriza por un comportamiento marcadamente más espaciado de las curvas de configuración (Fig. 64), indicativo de una notable atenuación de la proporción de subsidencia, respecto a la desarrollada en la etapa anterior, que inclusive se manifiesta con la ocurrencia de inversión de la subsidencia o levantamiento local (Fig 65). El inicio de esta etapa se marca para el Cretácico Temprano, tiempo durante el cual se manifiesta presente a lo largo de toda la sección para, después, en el Cretácico Medio y Tardío, prevalecer sólo en la porción noreste de ésta, en la zona de los pozos 6 al 13.

Esto último hace patente una notoria división de la sección en dos sectores o bloques mayores con diferente comportamiento de la subsidencia total para dicho tiempo Cretácico Medio-Tardío; uno suroccidental, el área de los pozos 1 al 5, en donde se desarrolla la tercera etapa, y otro, el nororiental, con esta segunda (Figs 64 y 65).

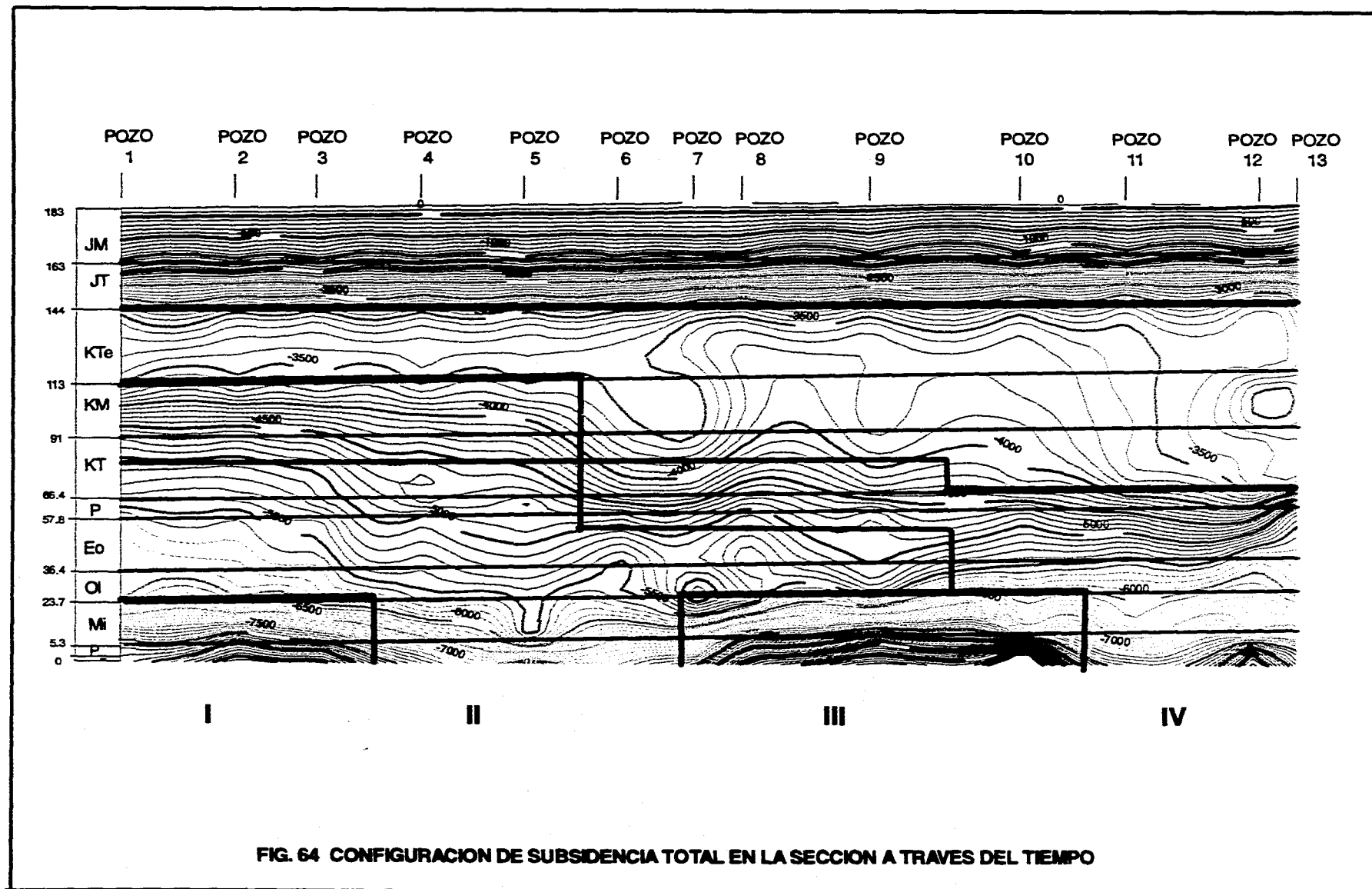
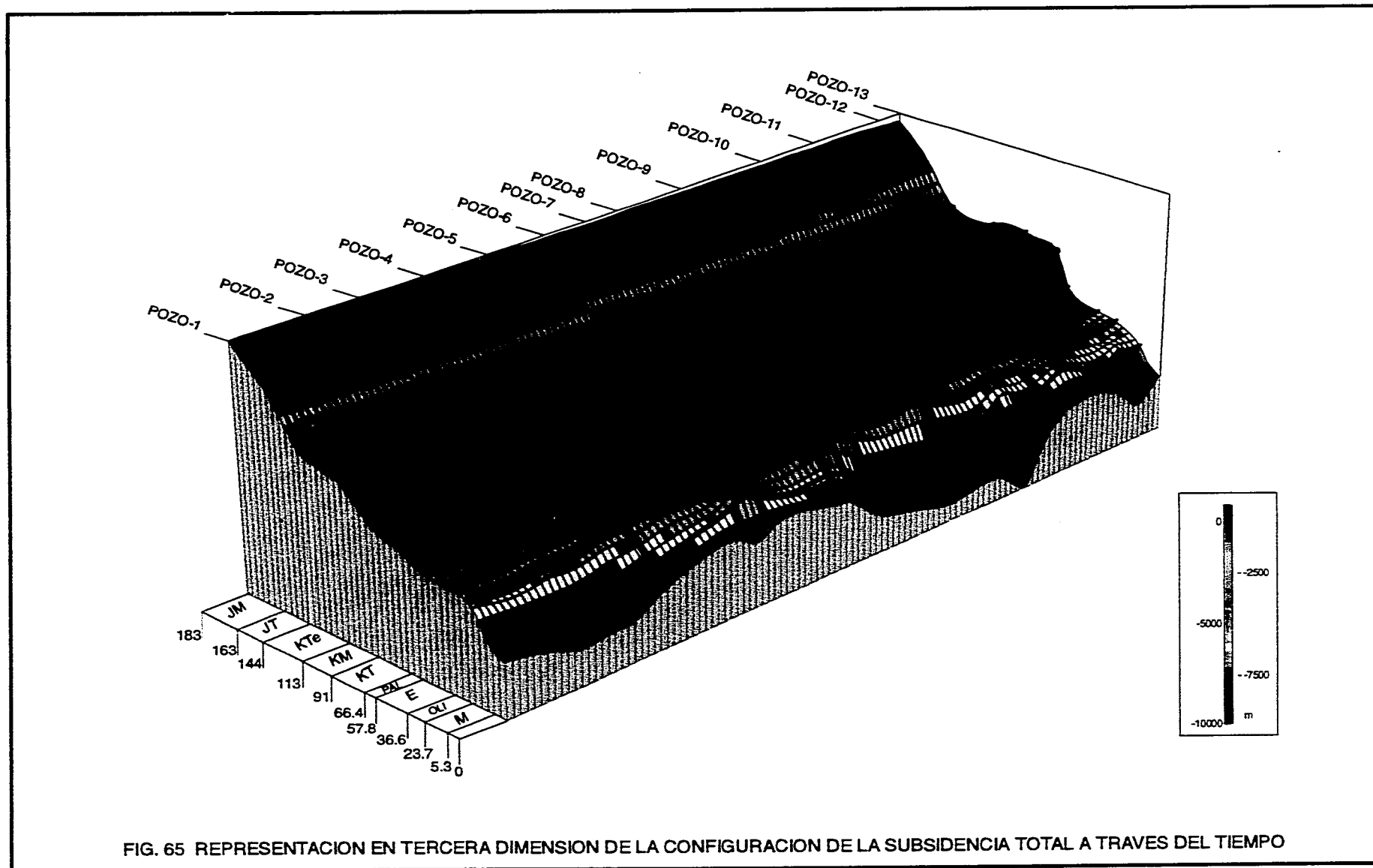


FIG. 64 CONFIGURACION DE SUBSIDENCIA TOTAL EN LA SECCION A TRAVES DEL TIEMPO



## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

La finalización de esta segunda etapa de subsidencia total dentro del sector suroeste de la sección, se marca por tanto al inicio del Cretácico Medio, mientras que, en el sector noreste, primero acontece en su porción sur, en la zona de los pozos 6 al 9, durante la parte temprana del Cretácico Tardío, y más tardíamente, al finalizar el Cretácico Tardío, hacia su porción norte en el área de los pozos 10 al 13. Esto define la existencia de dos subzonas dentro de este sector noreste de la sección durante gran parte del Cretácico Tardío.

Dada esta etapa de comportamiento de la subsidencia total, para el Cretácico Temprano, la profundidad del basamento en la sección se marca alrededor de los 3 500 m en promedio, con una zona dentro del sector noreste, el área de los pozos 8 al 10, en donde se manifiesta hasta alrededor de los 3 800 m en promedio (Figs. 64 y 65).

### Tercera Etapa

La tercera etapa de subsidencia total que se individualiza en el área de la sección, se caracteriza por el nuevo estrechamiento que se bosqueja en el espaciamiento de las curvas de configuración (Fig. 63), lo que es indicativo de una nueva fase de aceleración de la tasa de subsidencia, de la que su inicio y duración a lo largo de la sección, se marca para diferentes intervalos de tiempo (Fig. 64).

En el sector suroeste comienza en el Cretácico Medio y prevalece hasta la parte temprana del Cretácico Tardío, manifestándose con una proporción de subsidencia relativamente más acentuada hacia la parte sur del sector que hacia la parte norte.

En el sector noreste, por otro lado, se inicia durante el Cretácico Tardío, sólo que más tempranamente en su parte sur y, al finalizar este período en su parte norte, extendiéndose hasta el Eoceno Temprano en la primera parte, y hasta aparentemente el Oligoceno, en la segunda, cuando se marca una ligera atenuación.

Con el desarrollo de esta tercera etapa, para el tiempo Cretácico Medio, el basamento de la sección se ubicaba ahora diferencialmente más hundido en el sector suroeste de ésta última, en donde se tienen profundidades de alrededor de los 4 600 m en su porción sur y de los 4 200 m en su parte norte, que en el sector noreste de la misma, en donde se describen profundidades que varían de 3 500 a 4 000 m, aunque para su parte más norte se manifiesta a sólo 3 000 m.

### Cuarta Etapa

La cuarta etapa de subsidencia total diferenciada en la sección, se registra como una nueva fase de desaceleración de la tasa de subsidencia, hecho que se ve manifestado por un mayor espaciamiento de las curvas de configuración (Fig. 64), y espacialmente por

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

una pendiente menos pronunciada (Fig. 65) que, inclusive, llega a definir en algunas partes de la sección, una inversión de la subsidencia o levantamiento.

Esta etapa se caracteriza primordialmente dentro del sector suroeste de la sección, en donde su inicio se marca acacido hacia la parte temprana del Cretácico Tardío, y su finalización hacia la parte terminal del Oligoceno. Dentro del sector noreste de la sección, se manifiesta desarrollada sólo en la porción sur, en el área de los pozos 6 al 9, en donde comienza en el Eoceno y finaliza al mismo tiempo que en el sector anterior.

Con el desarrollo de esta cuarta etapa de comportamiento de la subsidencia total en la sección, para el Cretácico Tardío el basamento se mantenía más profundamente sepultado en el sector suroeste de la sección, variando de alrededor de los 5 400 m en su parte sur a los 4 700 m en su parte norte, que en el sector noreste de la misma, en donde se manifestaba de los 4 500 m en la subzona sur, a los 3 500 m en la subzona norte, siendo ésta última, por tanto, la zona más somera.

Para el Paleoceno, la disposición espacial que se define para este basamento, es de manera muy similar a la del Cretácico Tardío, aunque un poco más profundo.

Dado que a partir del Eoceno, el desarrollo de esta etapa se tiene presente simultáneamente en el sector suroeste y en la subzona sur del sector noreste de la sección, desaparece el límite de diferente comportamiento que hasta

ese entonces se marcaba entre estos dos sectores mayores de ésta última, en la zona de los pozos 5-6, ubicándose ahora entre los pozos 9 y 10 (Fig. 64), reduciendo considerablemente la extensión del sector noreste de la sección, al área de los pozos 10 al 13, lo que era la antigua subzona norte de dicho sector.

Así, para el Eoceno, se bosqueja ya una diferente disposición del basamento de la sección, ya que, dentro del ahora sector suroeste, en la porción comprendida entre los pozos 4 al 9, éste se encontraba a profundidades de alrededor de los 5 000 m a los 5 300 m en promedio, quedando con esto como la zona más somera de la sección. En la parte sur de este sector, de los pozos 1 al 3, se ubicaba a una profundidad de 5 800 m, siendo así la porción más profunda.

En el ahora sector noreste de la sección, la profundidad del basamento se encontraba intermedia a la del sector suroeste, esto es, a alrededor de los 5 500 m.

En este último sector de la sección, esta cuarta etapa de subsidencia total no se percibe desarrollada de manera clara, aunque parece manifestarse durante el Oligoceno como una ligera atenuación respecto a la que se presentaba en la tercera etapa (Figs 64 y 65).

Es también durante este tiempo Oligoceno, que en el ahora sector suroeste de la sección, en el área comprendida entre los pozos 6 al 8, se marca el desarrollo de subsidencia negativa o levantamiento del basamento de la sección.

Con esto, para el Oligoceno, en ésta última zona de la sección, es en donde el basamento se encontraba más somero, con una profundidad de alrededor de los 5 000 m. Hacia ambos lados se profundizaba escalonadamente, primero hasta los 5 500 m, en las zonas de los pozos 4-5 y 9 y, después, hasta alrededor de los 6 000 m, hacia las dos porciones extremas de la sección (Figs 64 y 65).

### Quinta Etapa

La quinta y última etapa de subsidencia total que se define acontece dentro de la sección, dado el estrechamiento del espaciamento de las curvas de configuración que de manera general se manifiesta a todo lo largo de ésta última, se describe conformada nuevamente por una fase de alta proporción de subsidencia (Fig. 64).

El comportamiento marcadamente estrecho con que se caracteriza este espaciamento, sugiere para esta etapa tasas de subsidencia notoriamente mayores que las definidas para las fases de este tipo de comportamiento anteriormente mencionadas. Las pendientes que se describen son bastante pronunciadas (Fig. 65).

El desarrollo de esta quinta etapa de subsidencia total, se inicia de manera general en el área de la sección en el Mioceno

Temprano, y se extiende hasta la época Reciente.

En detalle, la alta tasa de subsidencia de esta etapa, se caracteriza por un marcado comportamiento diferencial a lo largo de la sección. De hecho se pueden definir hasta cuatro sectores o bloques con proporciones de subsidencia algo distintas, los cuales se ubican ocupando posiciones muy diferentes a las de los sectores anteriormente definidos para el Cretácico y Paleógeno (Figs. 64 y 65).

Estos cuatro sectores o bloques se identifican a lo largo de la configuración de la subsidencia en la sección, con una numeración consecutiva de I a IV, caracterizándose con un comportamiento similar los bloques I y III, como los de mayor proporción de subsidencia, y el II con el IV, con una tasa algo menor.

Dado lo anterior, para el tiempo actual, en la zona del Bloque I, el área de los pozos 1 al 3, el basamento alcanza un profundizamiento de alrededor de los 8 500 m, mientras que en la porción del Bloque III, la zona de los pozos 7 al 10, llega a alcanzar hasta los 9 500 m, viniendo a ser con esto, el sector más profundo de la sección.

Los Bloques II y IV, que ubicados en las zonas de los pozos 4 al 6 y 11 al 13 respectivamente, manifiestan una proporción de subsidencia sensiblemente menor que la de los bloques anteriores, sobre todo al inicio de esta quinta etapa, pero la que después se integra al patrón general de una alta tasa de subsidencia, se

describen como los sectores de la sección menos profundos

En el Bloque II, el basamento se manifiesta a una profundidad de alrededor de los 7 000 m, calificándose con esto, como la parte relativamente más somera de la sección. En el Bloque IV, por su lado, se define una parte somera, la zona del Pozo 11, con el basamento a una profundidad de 7500 m, y una parte más profunda, la zona de los pozos 12 y 13, en donde el basamento se marca hasta los 8 500 m de profundidad (Figs 64 y 65).

### III.2.4. HISTORIA DE SUBSIDENCIA TECTÓNICA

De la misma manera que para la subsidencia total, la subsidencia tectónica fue estimada puntualmente en cada una de las trece localidades de control de la sección, solo que mediante la aplicación del método de "backstripping". Las curvas que la describen, se pueden visualizar en las diferentes gráficas Profundidad-Tiempo de dichos puntos (Fig. 63), como aquellas que se encuentran definiendo el límite superior de las zonas sombreadas que representan la cantidad de subsidencia gravitatoria.

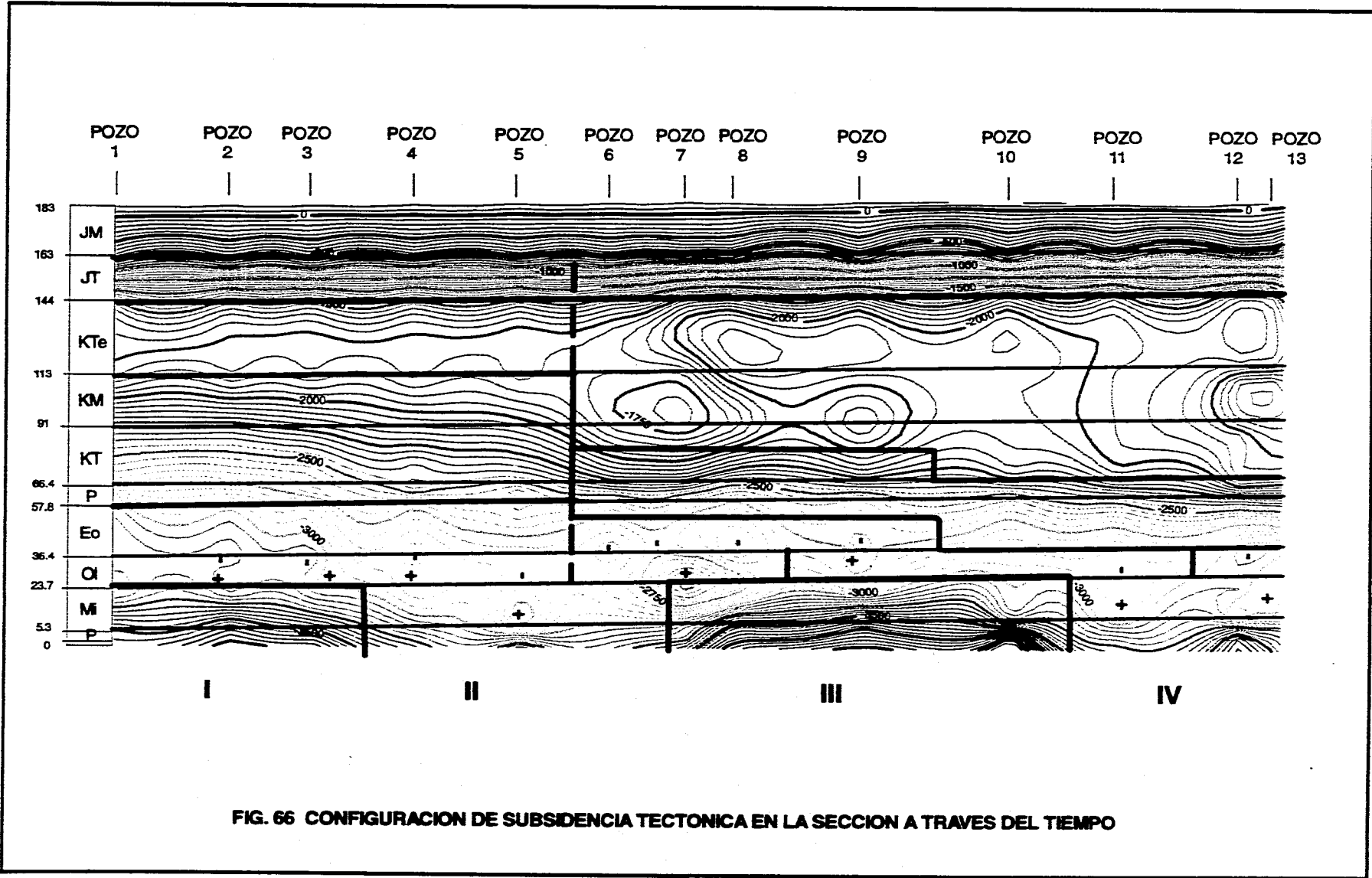
Su comportamiento en el espacio a través del tiempo, también se encuentra referido

respecto a la actual posición que guarda el nivel del mar (0 m).

Las variaciones en las pendientes que también presentan las curvas de subsidencia tectónica, son indicativas de que la magnitud de ésta última se incrementa o se atenúa a través del tiempo, lo cual repercute en el diferente grado de participación que tiene en el desarrollo de la subsidencia total. Asimismo, su comportamiento en los diferentes puntos de control de la sección es variable, indicando una respuesta tectónica lateralmente distinta dentro de la misma.

A manera de visualizar estas variaciones de la subsidencia tectónica a lo largo de la sección y a través del tiempo, así como de determinar la relaciones que éstas guardan con la subsidencia total, el comportamiento de las curvas de subsidencia tectónica de las diferentes gráficas Porosidad-Tiempo de la sección, se conjugan en un plano de configuración, de igual forma que se hizo con la subsidencia total (Fig. 66). En el caso de este plano, el intervalo de espaciamiento de las curvas de configuración tomado en consideración, es de cada 50 m.

También, buscando tener un mismo patrón de comparación con la subsidencia total, se realizó la representación tridimensional de esta configuración de la subsidencia tectónica, la cual se presenta con una exageración de la escala vertical, de aproximadamente 2.5 veces la escala horizontal en el eje de las abscisas de dicha configuración (Fig. 67).



**FIG. 66 CONFIGURACION DE SUBSIDENCIA TECTONICA EN LA SECCION A TRAVES DEL TIEMPO**



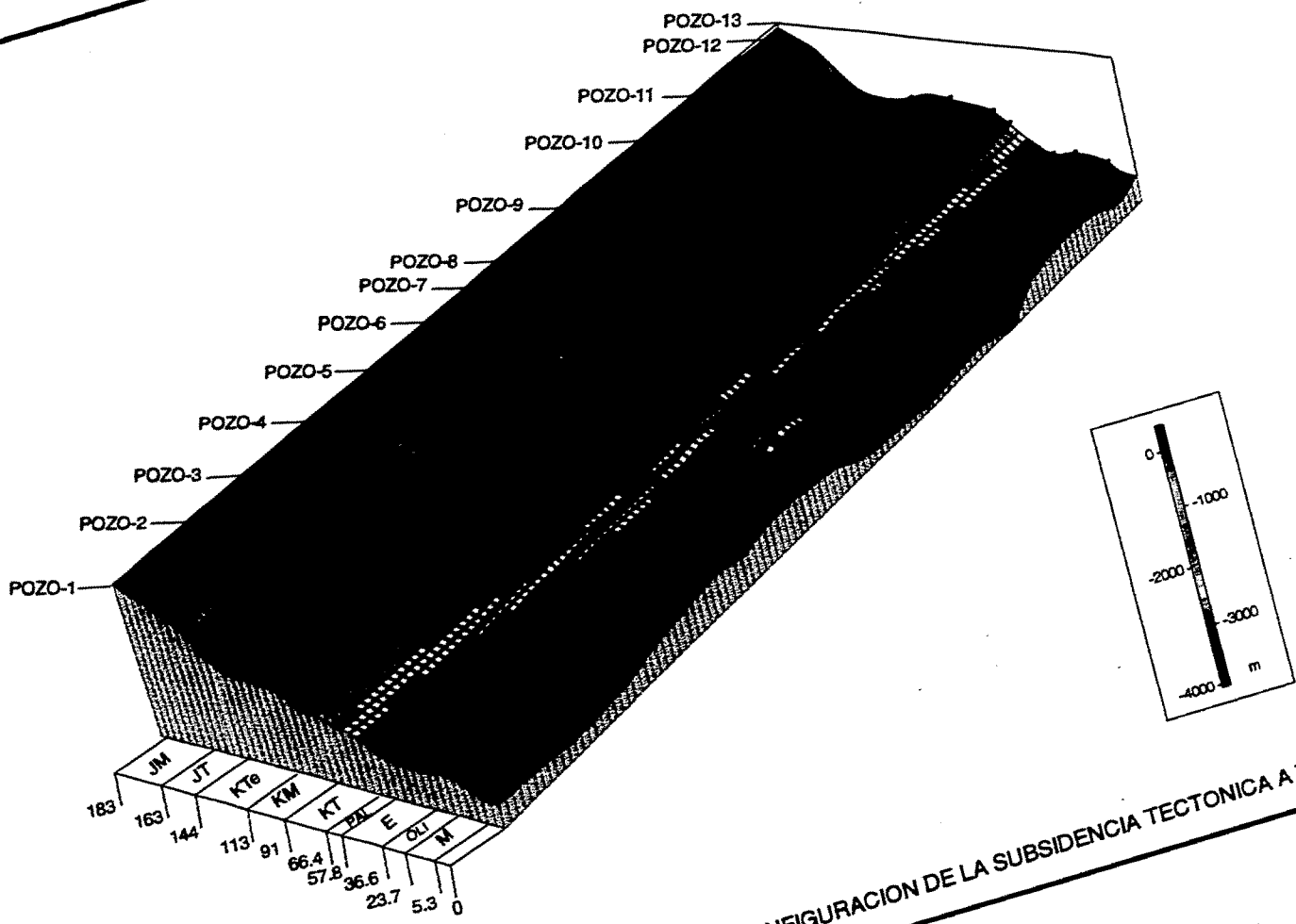


FIG. 67 REPRESENTACION EN TERCERA DIMENSION DE LA CONFIGURACION DE LA SUBSIDENCIA TECTONICA A TRAVES DEL TIEMPO

En el comportamiento de la subsidencia tectónica que se define a partir de la disposición que guardan en la sección las curvas de configuración resultantes, de una manera general, se encuentra la manifestación de cuando menos cinco etapas o fases principales de distinto comportamiento, las cuales, también de una manera general, guardan una estrecha correspondencia con las cinco etapas establecidas para la subsidencia total que ya fueron descritas.

Los límites de estas etapas se identifican en el plano de configuración y en su representación en tercera dimensión, por las líneas de carácter más grueso que allí se marcan (Figs. 66 y 67).

### **Primera Etapa**

La primera etapa o fase de subsidencia tectónica que se caracteriza desarrollada en la sección, se tiene definida por la distribución estrechamente espaciada que guardan las curvas de configuración en el plano elaborado (Fig. 66), lo que es indicativo de una pendiente de morfología pronunciada (Fig. 67), la cual se manifiesta a todo lo largo de la sección para el tiempo Jurásico Medio-Tardío.

El comportamiento con que se describe esta primera etapa, la califica como una fase de tasa de subsidencia tectónica acelerada o rápida, la cual, a su finalización hacia la parte más joven del Jurásico Tardío, se le cuantifica con alrededor de 1 500 m en el sector suroeste de la sección, la zona comprendida de los

pozos 1 al 5, y con más o menos 1 750 m, en el sector noreste, que abarca el área de los pozos 6 al 13.

El desarrollo de esta primera etapa de subsidencia tectónica de la sección, corresponde concordantemente en espacio y en tiempo con el de la primera etapa de subsidencia total (Figs. 64 y 66), de la que los anteriores valores estimados de subsidencia tectónica representan una proporción de alrededor del 60% de la cantidad de subsidencia total desarrollada en la sección.

### **Segunda Etapa**

La segunda fase de subsidencia tectónica, se caracteriza por la distribución más espaciada con que se manifiestan las curvas de configuración en el plano de este tipo (Fig. 66), hecho que es representativo de una pendiente de morfología suave (Fig. 67).

Esta segunda fase comienza en el Cretácico Temprano a lo largo de toda la sección, y termina al inicio del Cretácico Medio en el sector suroeste de ésta, y en el Cretácico Tardío en el sector noreste de la misma.

De hecho, en la porción de los pozos 6 al 9 de este último sector, la terminación de esta segunda etapa se define acaecida durante la parte media del Cretácico Tardío, mientras que en la porción restante de este sector, en el área de los pozos 10 al 13, se manifiesta hasta el final de este periodo.

Dado este comportamiento de la configuración, esta segunda etapa se caracteriza como una fase de tasa de subsidencia tectónica baja o lenta, la cual se bosqueja notablemente atenuada respecto a la de la etapa anterior. Inclusive, en el sector noreste de la sección, durante la parte media del Cretácico Temprano, se interrumpe el desarrollo del proceso de subsidencia, y se da lugar a uno de levantamiento, el cual viene a tener su máxima expresión durante el Cretácico Medio (Figs. 66 y 67).

Dicha atenuación e inversión de la subsidencia tectónica, se manifiesta de igual forma presente, en el desarrollo de la segunda etapa de subsidencia total. De hecho, una directa correspondencia en espacio y tiempo, se tiene bien marcada entre ambas etapas de subsidencia en la sección.

La cantidad de subsidencia tectónica promedio que se estima desarrollada en esta segunda etapa, en el sector suroeste de la sección es de alrededor de 350 m, mientras que en el sector noreste, es ligeramente mayor con aproximadamente 400 m. Con estos valores, la proporción promedio con que se estima participa la subsidencia tectónica en el desarrollo de la subsidencia total, es de alrededor del 50 %.

### Tercera Etapa

La tercera fase de subsidencia tectónica identificada en la sección, se define por una

nueva disposición estrechamente espaciada que guardan las curvas de configuración en el plano de este tipo (Fig. 66), lo que se delinea esquemáticamente como una pendiente de morfología pronunciada (Fig. 67).

Esto se describe como una nueva fase de tasa de subsidencia tectónica acelerada o rápida, la cual representa, una marcada reactivación de la proporción de ésta última en el área de la sección.

Esta tercera etapa se inicia en el Cretácico Medio y termina en el Paleoceno en el sector suroeste de la sección. En el sector noreste de la misma, la etapa comienza primero en su parte sur, en el área de los pozos 6 al 9, durante el Cretácico Tardío, y poco tiempo después, en el Paleoceno, en su parte norte, en la zona de los pozos 10 al 13. El tiempo de finalización de esta etapa en esas partes de la sección, se marca en el Eoceno Temprano y al fin del Eoceno Tardío respectivamente.

Comparativamente con la tercera etapa de subsidencia total, esta fase de subsidencia tectónica se corresponde concordantemente en tiempo y en espacio con ella, sólo en lo que se refiere al sector noreste de la sección, ya que en lo respecta al sector suroeste, ésta última se manifiesta con una mayor duración que la primera (Figs. 64 y 66).

La cantidad de subsidencia tectónica que se produce con el desarrollo de esta etapa en el sector suroeste de la sección, se cuantifica en dos intervalos; uno, de 400 m a 550 m durante el tiempo de correspondencia de ambas fases

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

de subsidencia en dicho sector, esto es, para el Cretácico Medio y parte del Cretácico Tardío, y otro, de 400 m a 500 m cuando la subsidencia total manifiesta una atenuación, es decir, para la parte terminal del Cretácico Tardío y el Paleoceno.

Con estos valores, en el referido primer intervalo, la participación de la subsidencia tectónica en el desarrollo de la subsidencia total se estima que constituye en promedio una proporción de alrededor del 43 %, mientras que, para el segundo intervalo, esta proporción se incrementa notablemente y llega a ser de alrededor del 75 %.

Por lo que se refiere al sector noreste de la sección, la cantidad de subsidencia tectónica promedio que se estima desarrollada en esta etapa tercera etapa, es de 850 m. Con este valor, en la parte sur de este último sector, la proporción de participación de la subsidencia tectónica en la total, se estima en promedio como del 75 %, mientras que, en lo que respecta a la parte norte, hasta cuando se marca definido el desarrollo de esta fase de subsidencia tectónica, ésta representa una proporción de alrededor del 60 % de la cantidad de subsidencia total.

### Cuarta Etapa

La cuarta fase de subsidencia tectónica en la sección, se particulariza por la disposición nuevamente más espaciada con que se muestran las curvas de configuración en el

plano de este tipo (Fig. 66), lo cual define una pendiente de morfología suave (Fig. 67).

Este comportamiento describe a esta cuarta fase, como una etapa de subsidencia tectónica baja o lenta, la cual representa un nuevo período de atenuación respecto a la etapa anterior. Característicamente, hacia la parte final de esta fase, se tiene la manifestación de subsidencia negativa o levantamiento en la mayor parte de la sección.

El tiempo de inicio de esta fase de subsidencia tectónica en la sección, se define en el comienzo del Eoceno para el sector suroeste, mientras que para la parte sur del sector noreste, en la zona de los pozos 6 al 9, en el Eoceno Temprano-Medio, y hasta el Oligoceno en la porción norte de dicho sector, en el área de los pozos 10 al 13. Su finalización, se marca acaecida simultáneamente a lo largo de toda la sección, precisamente hacia la terminación del Oligoceno.

Esta cuarta etapa de subsidencia tectónica, se relaciona con la cuarta etapa de subsidencia total, aunque sólo se corresponden directamente en tiempo y en espacio, en las dos porciones del sector noreste de la sección, ya que en lo que toca al sector suroeste, la fase tectónica, al iniciarse un poco más tardamente, es de menor duración que la total.

Con el desarrollo de esta etapa, para el tiempo Eoceno Medio-Tardío, el sector suroeste y la parte sur del sector noreste, se integran en uno solo con el mismo comportamiento de subsidencia tectónica baja o lenta, la cual se ve

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

interrumpida hacia el final de dicho período, con lo que se tiene la definición casi simultánea, a lo largo de dicho sector unificado, de un máximo de hundimiento (signo - en las Figs. 66 y 67).

De esta manera, la cantidad de subsidencia tectónica que se registra para esta parte de la etapa, se estima en promedio en alrededor de 200 m, la cual viene a representar una proporción de participación en la subsidencia total de alrededor del 60 %.

Durante el Oligoceno, en la mayor parte de la sección, con excepción de una porción de la zona entre los pozos 9 al 11, se registra la ocurrencia de subsidencia tectónica de carácter negativo o levantamiento (signo + en las Figs. 66 y 67), el cual, de una manera general, se caracteriza como de una magnitud apenas perceptible. Sólo en el área de los pozos 6 al 8, es en donde se manifiesta con un carácter más prominente.

Este comportamiento de carácter negativo de la subsidencia tectónica, contrasta con el de la subsidencia total, que para el mismo tiempo y para la mayor parte de la misma zona de la sección, se manifiesta desarrollada de manera normal, es decir, con hundimiento, aunque de baja proporción. Hay coincidencia de comportamiento, sólo en el sector de los pozos 6 al 8, en donde tanto la subsidencia total como la tectónica son de índole negativa.

Por lo que se refiere a la porción de la zona entre los pozos 9 al 11, el comportamiento de la subsidencia tectónica que se manifiesta

durante el Oligoceno, es de carácter normal, y se le cuantifica en promedio con 100 m. Este comportamiento se corresponde con el de la subsidencia total, que también es de carácter normal, en la que representa una participación de aproximadamente el 20 %.

### Quinta Etapa

La quinta fase de subsidencia tectónica que se presenta en la sección, se identifica por una nueva disposición estrechamente espaciada de las curvas de configuración en el plano que de este tipo se elaboró (Fig. 66), lo que es indicativo de la definición de una pendiente de morfología pronunciada (Fig. 67).

Este comportamiento describe a la fase como un nuevo período de aceleración o reactivación de la tasa de subsidencia tectónica, respecto a la etapa de atenuación y levantamiento anterior.

Esta quinta fase se define simultáneamente a lo largo de toda la sección, y su inicio se marca a partir del Mioceno, extendiéndose su manifestación hasta nuestros días. Se relaciona con la quinta etapa de subsidencia total descrita en la sección, con la cual su desarrollo corresponde concordantemente en tiempo y en espacio.

En detalle, esta fase se manifiesta característicamente con proporciones variables de subsidencia tectónica a lo largo de la sección, con lo que nuevamente, en ésta última,

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

se definen varios sectores o bloques con diferente comportamiento, que cuando menos son cuatro principales.

Estos bloques se marcan gráficamente en el plano de configuración de subsidencia tectónica y su representación tridimensional (Figs. 66 y 67), con una numeración consecutiva de I a IV en sentido SW-NE, de igual manera que se hizo con los bloques definidos en la quinta etapa de subsidencia total de la sección, con los cuales guardan una estrecha relación temporal y espacial.

En los Bloques I y III, en los que se incluyen las zonas de la sección ocupadas por los pozos 1 al 3 y del 7 al 10 respectivamente, es en donde se tiene la manifestación de las tasas de subsidencia tectónica relativamente más altas de esta fase, lo que es más evidente sobre todo, en el último bloque.

La cantidad de subsidencia tectónica desarrollada durante esta etapa en el Bloque I, se estima en promedio en 650 m, lo cual lo representa una proporción de participación en la subsidencia total del orden del 25 %. En el Bloque III, estos valores se ven incrementados a 900 m en promedio de subsidencia tectónica, y a un 35 % de participación en la subsidencia total.

En los Bloques II y IV, que comprenden las áreas de la sección ocupadas por los pozos 4 al 6 y del 11 al 13 respectivamente, la proporción de subsidencia tectónica es relativamente menor que en los dos bloques anteriores, lo cual se manifiesta de manera más

evidente en la etapa inicial de esta fase, durante el Mioceno Temprano. Esta proporción de subsidencia tectónica, es también relativamente menor en el Bloque IV que en el Bloque II.

La cantidad de subsidencia tectónica desarrollada durante esta etapa en este último bloque, se estima en promedio en 375 m, mientras que en el Bloque IV en 300 m. Estos valores de subsidencia tectónica, representan en promedio una proporción de participación en la subsidencia total del orden del 25 % y 20 % respectivamente.

### III.2.5. IMPLICACIONES GEODINAMICAS

Como ya se ha mencionado, el análisis del comportamiento de las curvas de subsidencia tectónica, aporta información que permite inferir y caracterizar los mecanismos tectónicos que pudieron haber participado en el desarrollo del área de la cuenca, en la que se encuentra contenida la sección de estudio.

En el presente trabajo, este análisis de la subsidencia tectónica en la sección, parte de reconsiderar dos premisas ya referidas:

- En el modelo geológico conceptual tomado en cuenta para la región de la sección, el desarrollo de la cuenca en la que se encuentra ésta última se describe sintetizado como parte de la margen divergente sur de la Cuenca del Golfo de México, dentro de un

contexto evolutivo relacionado a una apertura extensional de tipo "rift"- "drift" (Fig. 7),

- La subsidencia tectónica en una cuenca relacionada a un evento extensional regional, se describe desarrollada en dos etapas o fases principales consecutivas, referidas como Subsidencia Inicial (Si) y Subsidencia Térmica o Termotectónica (St). Cada una de ellas, se representa por una curva de pendiente característica en una gráfica Profundidad-Tiempo, cuyo comportamiento teórico específico, para diferentes valores de factor de estiramiento  $\beta$ , fue definido por Dewey J. F. (1982) (Fig. 26).

Dentro de este marco de referencia, las pendientes que se definen en las curvas de subsidencia tectónica, en las diferentes gráficas de cada uno de los puntos de control de la sección (Fig. 63), dadas por el límite superior de la zona sombreada, de una manera general se pueden agrupar dentro de dos patrones de comportamiento mayor:

- uno, marcado por una pendiente de morfología relativamente más pronunciada, que se distribuye al inicio de cada gráfica y que, por lo tanto, es de corta duración,

- y el segundo, caracterizado por una pendiente de morfología relativamente más suave o menos pronunciada, que se distribuye en la parte restante de cada gráfica y que es, por lo tanto, de larga duración.

La conjunción de las curvas de cada uno de los puntos de control de la sección en una sola

gráfica (Fig. 68), permite visualizar más claramente estos dos patrones de comportamiento mayor que se acaban de describir, los cuales, al compararse en la misma gráfica, con las dos clásicas formas de pendiente teóricamente definidas para una cuenca de carácter extensional, se puede observar que, de una manera general, guardan cierto grado de correspondencia.

Con esto, los dos patrones de comportamiento mayor que se definen en las curvas de subsidencia tectónica de la sección, se considera que representan los dos principales eventos de subsidencia de la parte de la cuenca en la que ésta se encuentra; el primero, relacionado con la etapa de subsidencia inicial y, el segundo, con la fase de subsidencia termotectónica.

La etapa de subsidencia inicial (Si), que se caracteriza como una fase de una proporción de subsidencia relativamente rápida o alta, se describe desarrollada durante el tiempo Jurásico Medio-Tardío, esto es, de los 183 Ma a los 144 Ma, lo que le representa una duración de 39 Ma. Este periodo se manifiesta como de magnitud sensiblemente mayor, comparativamente con el intervalo de tiempo de entre 10 y 30 Ma referido por Dewey J. F. (1982) como un rango común de tiempo para la fase de estiramiento de una cuenca sedimentaria y, con el periodo de duración ideal de menos de 20 Ma sugerido por Allen y Allen (1990), pero constituye un caso que no es único ya que estos últimos autores mencionan también varios ejemplos de cuencas con periodos mucho más prolongados.

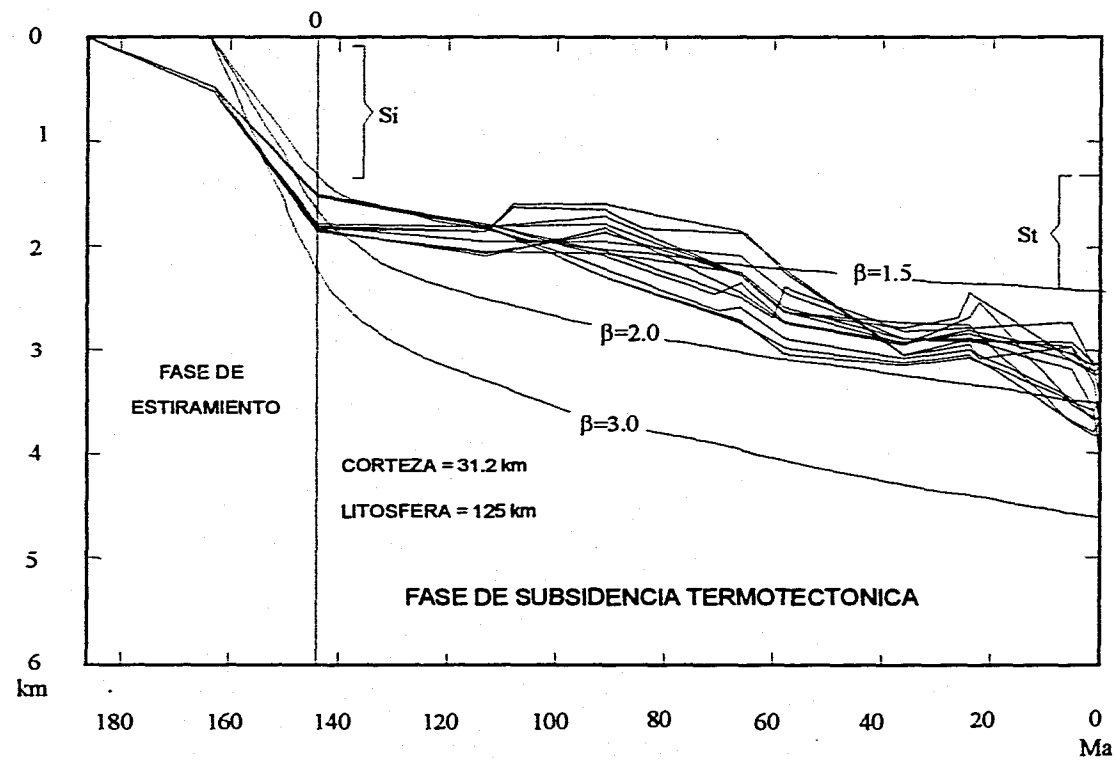


FIG. 68 COMPORTAMIENTO DE LAS CURVAS DE SUBSIDENCIA TECTONICA DE LA SECCION Y SU RELACION CON LAS CURVAS DE SUBSIDENCIA TECTONCA TEORICAS



Dado que las curvas de subsidencia tectónica de la sección dentro de la etapa de subsidencia inicial o de estiramiento se describen con una baja dispersión, de hecho se definen bajo sólo dos trayectorias principales (Fig. 68), sugieren el comportamiento de dicha etapa de subsidencia inicial a lo largo de la sección, como de carácter sensiblemente homogéneo.

Este comportamiento, así como la secuencia sedimentaria que se depositó durante el tiempo de duración de esta etapa de estiramiento, constituida por sal y materiales clástico-carbonatados, la que aparentemente no está precedida por ningún otro depósito sedimentario en la cuenca, sugieren que ésta última, en el área de la sección, pueda ser considerada más propiamente como de tipo "sag", que se caracteriza por subsidencia y la ausencia de fallamiento normal (Allen y Allen, 1990), más que de tipo "rift", que se caracteriza por fallamiento normal y subsidencia.

Dado que el desarrollo de la etapa de subsidencia inicial, desde el punto de vista tectónico general, se ha caracterizado como la fase de estiramiento o de "rift", la etapa de subsidencia inicial en la sección de estudio, aquí reconocida, se considera que representa propiamente la manifestación de la fase "rift", la primera fase tectónica dentro del contexto evolutivo "rift"- "drift", de la margen divergente donde se desarrolla la cuenca en la que se encuentra dicha sección. Esto implica, que la manifestación de dicha fase "rift" se registró hasta la parte final del Jurásico Tardío, consideración que de manera regional, se relaciona con lo sugerido por Marton y Buffler

(1993) para la evolución del área del Golfo de México, quienes extienden la etapa de fragmentación hasta la parte terminal del Jurásico Tardío, incluyendo dentro de ella la sedimentación clástico carbonatada del Jurásico Superior, como se manifiesta para el área de la sección de estudio.

Por lo que toca a la etapa de subsidencia termotectónica (St) en la sección, que se caracteriza como una fase en la que se presentan tasas de subsidencia relativamente más bajas o atenuadas con respecto a la de la etapa anterior, temporalmente se encuentra manifestada desde el Cretácico Temprano hasta el Reciente, estos es, desde los 144 Ma hasta la actualidad, lo que le representa un intervalo de tiempo compuesto por dicha cantidad mencionada.

Esta etapa de subsidencia termotectónica, dentro del contexto tectónico general, representa la Fase "Post-Rift" de un evento extensional regional, esto es, la etapa de individualización de las márgenes continentales a partir de una zona central en donde se tiene la implantación de piso o corteza oceánica, lo que en otras palabras, se denomina la etapa de deriva ("drift").

La subsidencia tectónica teórica relacionada con esta fase, está desarrollada con una proporción de subsidencia exponencialmente decreciente a través del tiempo, lo cual, esquemáticamente dentro de la gráfica Profundidad-Tiempo, se ha caracterizado por una curva continua de tipo exponencial (Figs. 26 y 68).

Esto no se presenta para el caso de la sección de estudio, ya que aquí las curvas de subsidencia tectónica relacionadas a la etapa de subsidencia termotectónica, manifiestan notables variaciones respecto al patrón de comportamiento de las curvas teóricamente definidas. Aquí, característicamente se describen con atenuaciones e incrementos, y aún rompimientos ascendentes de las pendientes (Fig. 68).

Este comportamiento conduce a considerar que la historia tectónica de la etapa de subsidencia termotectónica de la región de la sección de estudio, aunque de resultado finalmente subsidente, no está asociada a un evento único de subsidencia simple exclusivamente, sino más bien a varios, con el desarrollo inclusive, de etapas de levantamiento. Esto, por lo tanto, es indicativo de que en el área de la sección, esta etapa de subsidencia termotectónica, en un cierto momento, es enmascarada o reemplazada por una historia tectónica de carácter polifásico.

De hecho, en la sección se caracterizan presentes dentro esta historia polifásica, hasta cinco eventos o fases mayores, de los cuales, el primero de ellos se relaciona con la etapa de subsidencia inicial y, los otros cuatro, con la fase de subsidencia termotectónica. El comportamiento general de cada una de estas fases, ya se ha referido de manera cuantitativa en la descripción que se hace de la subsidencia tectónica, por lo que en seguida sólo se caracterizarán conforme a su respuesta o significancia tectónica, esto en función de la

relación subsidencia tectónica - subsidencia gravitatoria en la subsidencia total (Fig 69):

El primer evento, el relacionado con la etapa de subsidencia inicial, se refiere como la **Fase de Activación**, en la cual la actividad de la subsidencia tectónica tiene un marcado predominio sobre el de la sedimentación, ya que representa alrededor del 60 % de la subsidencia total. Esta relación se caracteriza como una respuesta al adelgazamiento de la litósfera.

El segundo evento de actividad tectónica en la sección, que corresponde ya a la etapa de subsidencia termotectónica, se caracteriza como un **Periodo de Estabilidad**, en donde la actividad de la subsidencia tectónica se atenúa, disminuyendo su grado de influencia en la subsidencia total, que pasa a ser del orden del 50 %, considerándose, por lo tanto, como una etapa de relativa quietud, en la que la litósfera sufre enfriamiento.

Durante el Cretácico Medio, se marca un comportamiento muy particular en el sector suroeste de la sección, ya que aunque se describe un aumento de la cantidad de subsidencia tectónica (Fig. 66), ésta representa una proporción de la subsidencia total apenas del orden del 43 %, lo que es indicativo de una predominancia de la actividad sedimentaria sobre la actividad tectónica. Aquí, al parecer, la manifestación de la subsidencia tectónica presente, más que una respuesta a un proceso tectónico, es un resultado de la actividad sedimentaria. Esta particularidad, está estrechamente relacionada con el desarrollo del ambiente de plataforma carbonatada.

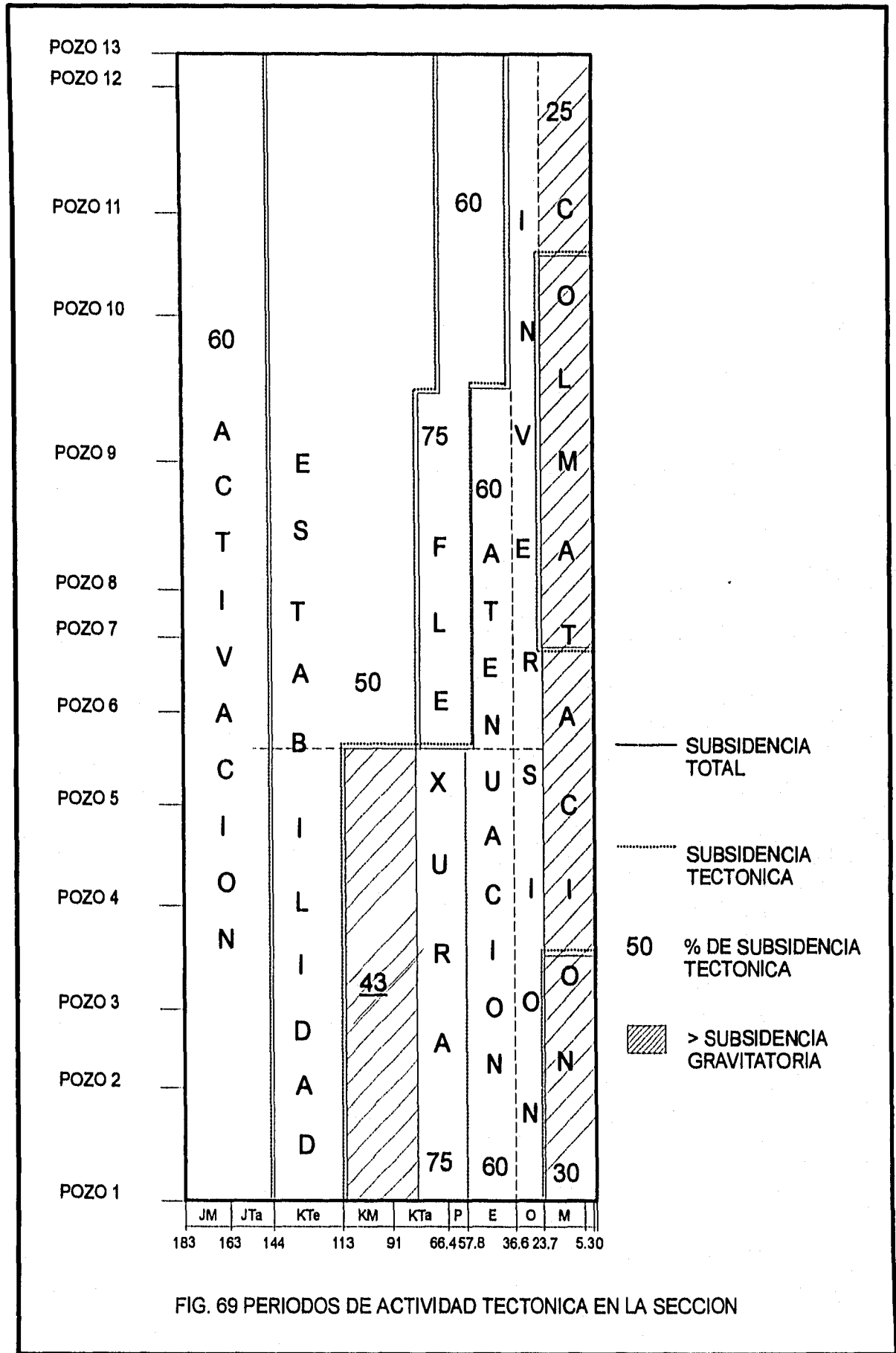


FIG. 69 PERIODOS DE ACTIVIDAD TECTONICA EN LA SECCION

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

El tercer evento tectónico, se caracteriza como un **Período de Flexura** ya que, de una manera general en la sección, la actividad de la subsidencia tectónica se incrementa notablemente, su proporción de influencia en el desarrollo de la subsidencia total, pasa a ser del orden del 75 %. Este periodo se marca bien definido durante el Cretácico Tardío y Paleoceno, y un poco más tardíamente, hasta el Eoceno, en el sector más noreste de la sección (Fig. 69). Se describe como una fase de hundimiento probablemente relacionado a deformación en áreas adyacentes a la región.

El cuarto evento tectónico en la sección, se refiere como un **Período de Atenuación-Inversión**. Se caracteriza porque la actividad de la subsidencia tectónica disminuye respecto a la de la etapa anterior, aunque se mantiene todavía relativamente alta, con valores del orden del 60 % de participación en la subsidencia total y, durante el Oligoceno, por manifestarse con carácter negativo.

Se asocia a una fase de deformación y levantamiento dentro de la cuenca, la cual no interrumpe el desarrollo de la sedimentación y, dada su homogénea manifestación a lo largo de la sección durante el Oligoceno, bien puede ser indicativo de un fenómeno de carácter regional.

A este evento se relaciona la ocurrencia de movimiento horizontal en el área de la sección, el cual pudo provocar el plegamiento y fallamiento que se identifica en la sección estructural (Fig. 10). La manifestación de subsidencia negativa, de relativamente mayor relevancia en el área de los pozos 6 al 8 de la

sección (Fig. 66), puede ser la respuesta a dicha estructuración.

El quinto y último evento tectónico reconocido en la sección, se caracteriza como un **Período de Reactivación-Colmatación**. Se individualiza como tal, en función de que la actividad de la subsidencia tectónica muestra un incremento notable con respecto a la fase anterior pero, característicamente, su grado de participación en el desarrollo de la subsidencia total disminuye de manera importante, el cual llega a ser de un orden máximo del 30 %.

Esto significa que durante esta fase se desarrolló un considerable aumento de la cantidad de subsidencia gravitatoria, lo cual fue provocado por la abundante acumulación de materiales elásticos, que como producto de un intenso aporte de ellos se tuvo para el tiempo Mioceno-Reciente, terminó por colmar la cuenca en el área de la sección. Con esto, aparentemente, la subsidencia tectónica más que una respuesta a un proceso tectónico, es debida al efecto de la carga sedimentaria.

Tomando en cuenta un resultado finalmente subsidente de la historia tectónica de la sección, con la comparación hecha entre el comportamiento de las diferentes curvas de subsidencia tectónica, de cada uno de los puntos de control de la sección, y el comportamiento de las curvas de este tipo teóricamente calculadas, para distintos valores de factor de estiramiento  $\beta$  (Fig. 68), se puede estimar el valor de éste último para el área de la sección.

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA SUBSIDENCIA

---

Las pendientes de las curvas de la sección en la etapa de subsidencia inicial, se relacionan con la curva teórica de valor promedio de factor de estiramiento de 2.0, mientras que aquéllas de la etapa de subsidencia tectónica muestran, primero, una continua transferencia hacia valores de  $\beta$  de hasta 1.5, y aún algo menores pero, después, presentan un nuevo desplazamiento hacia valores de 2.0.

En función de este comportamiento descrito, una curva de subsidencia tectónica promedio puede ser definida predominantemente entre las curvas relacionadas con los valores de entre 1.5 y 2, por lo que para el área de la sección de estudio, este factor de estiramiento  $\beta$  se considera relacionado con un valor de aproximadamente 1.8. Este valor será tomado en cuenta para la realización del modelado de la tectonicidad de la sección.

## IV. ANALISIS Y MODELADO DE LA TERMICIDAD

El modelado de la termicidad de una cuenca sedimentaria consiste, básicamente, de la evaluación cuantitativa de las temperaturas presentes espacialmente dentro de esa cuenca a través del tiempo, lo cual es referido como la Historia Térmica.

Estas temperaturas pueden ser estimadas a partir de las variaciones allí desarrolladas del flujo de calor o del gradiente geotérmico, el comportamiento de los cuales, está estrechamente relacionado con la historia tectónica que caracteriza a dicha cuenca.

En seguida, primero se expone en una forma breve, la síntesis de los principales aspectos teóricos relacionados con la termicidad y, posteriormente, se presentan los resultados obtenidos en el modelado de ésta última para la sección de estudio.

### IV.1. CONCEPTOS TEORICOS DE LA TERMICIDAD

La heterogénea distribución de temperaturas que lateral y verticalmente se manifiesta dentro del sistema terrestre, es un reflejo de la

continua, pero variable proporción de transferencia o flujo de calor que tiene lugar hacia afuera, desde el interior caliente de la tierra, hasta la superficie.

La temperatura caracteriza el estado térmico de los cuerpos mediante la medida de la cantidad de calor presente. Es proporcional a la manifestación de la energía cinética media de la translación de moléculas de una substancia (Valencia, I. J. J., 1993). La unidad de medida más utilizada en geología es el grado Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Invariablemente, a medida que se avanza hacia el interior de la corteza de la Tierra, se manifiesta una elevación de la temperatura, hecho que referido cuantitativamente, se describe como el Gradiente Geotérmico ( $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ). De aquí que, generalmente, se considere que temperatura y gradiente geotérmico, resultan ser dos parámetros térmicos estrechamente dependientes de la cantidad de dicha transferencia de calor que se da en la litósfera.

El entendimiento de la dinámica del flujo de calor, permite determinar el significado cuantitativo de la temperatura y el gradiente geotérmico, y aún del flujo de calor mismo, dentro de la litósfera, y particularmente dentro de una cuenca sedimentaria.

#### IV.1.1. Flujo de Calor

El flujo de calor se define, como la cantidad de calor que fluye o se transfiere transversalmente a una determinada superficie, durante un tiempo dado.

Las unidades con que el flujo de calor se refiere son:

- $\text{mW/m}^2$  - miliwatts por metro cuadrado
- $\text{cal/cm}^2/\text{scg}$  - calorías por centímetro cuadrado por segundo
- HFU - unidades de flujo térmico

En donde, las relaciones equivalentes que guardan estas diferentes unidades son:

$$1 \text{ HFU} = 10^{-6} \text{ cal/cm}^2/\text{scg}$$
$$1 \text{ HFU} = 41.84 \text{ mW/m}^2.$$

La proporción de transferencia o flujo de calor que tiene lugar hacia la superficie, desde el interior de la tierra, se considera que es función básicamente de las particularidades de:

- las fuentes generadoras del flujo de calor, y de
- los materiales rocosos a través de los cuales tiene lugar la difusión hacia la superficie.

El primer factor determina la cantidad de calor que se origina en el interior de la tierra, mientras que lo segundo tiene que ver con la manera en la cual se efectúa la transferencia y redistribución de ese calor dentro de la litósfera.

#### a. Fuentes de Generación

Por lo que se refiere a las fuentes generadoras, la vasta corriente ascendente de calor natural, se considera que se origina a partir de dos fuentes principales:

- como producto del calor almacenado en el interior de la tierra, dentro de la porción infrayacente a la litósfera, el cual es transferido a ésta última por los materiales de parte del manto superior. Se le denomina **Flujo Infracortical o Subcortical** (Ungerer, P. *et al.*, 1990), y se considera que varía cuantitativamente en función del ambiente tectónico al que su transferencia se encuentre asociado.

- como resultado del decaimiento de los elementos radioactivos existentes dentro de las rocas de la litósfera, principalmente a partir del Uranio (U), Torio (Th) y Potasio (K), que son los contribuyentes más significativos (McCulloh y Nacser, 1989; Armstead, H. Ch. H., 1989). Se le refiere comúnmente como **Flujo de Calor Radiogénico**.

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA TERMICIDAD

---

Se considera, generalmente, que la suma de los flujos de calor infracortical y radiogénico, viene a representar la manifestación total de las fuentes de calor en la parte superficial de la litósfera, lo cual es registrado bajo la denominación de **Flujo de Calor Superficial**.

De hecho, éste último constituye el parámetro de referencia dentro de las estimaciones respecto al flujo de calor, ya que es el valor que se obtiene mediante mediciones efectuadas sobre la superficie del terreno (Fig. 70).

A partir de estos datos, se han realizado algunas generalizaciones como las siguientes:

- que en áreas geológicamente antiguas y actualmente tectónicamente inactivas, los flujos de calor superficial que se presentan son generalmente bajos. Los valores fluctúan en promedio en alrededor de los 40 mW/m<sup>2</sup>.

- que en áreas tectónicamente activas, geológicamente jóvenes, los flujos de calor superficial son generalmente de valores altos. Estos se marcan en promedio en alrededor de los 80 mW/m<sup>2</sup>.

- que casos especiales requieren de explicaciones particulares, las cuales, la mayor parte de las veces, tienen que ver con su historia tectónica.

Aunque todavía existe mucha incertidumbre acerca de las estimaciones del flujo de calor infracortical, actualmente la mayoría de éstas, están basadas en una relación lineal

empírica desarrollada por Birch, F. *et al.* en 1968 (*in* Ungerer, P. *et al.*, 1990; BasinMod, 1992).

Esta consideración permite evaluar un "flujo de calor reducido", el cual se relaciona con el flujo infracortical, así como el espesor medio de la parte de la litósfera radioactiva, asumiendo que a una cierta profundidad (alrededor de 7-10 Km), la generación de calor radiogénico disminuye a una cantidad mínima.

Dicha relación lineal está expresada como:

$$Q_0 = Q_r + (DA)$$

en donde:

$Q_0$  = Flujo de calor superficial

$Q_r$  = Flujo de calor reducido o infracortical

A = Producción de calor radiogénico

D = Espesor medio de litósfera radioactiva

Los resultados de estas estimaciones coinciden en señalar valores de flujo de calor infracortical que varían entre los 10 y 60 mW/m<sup>2</sup>, pero considerándose presentes más típicamente valores de entre 30 y 40 mW/m<sup>2</sup> (Fig. 71).

Aunque hay que mencionar que, Ungerer, P. *et al.* (1990), por otra parte, señalan que este flujo de calor en la litósfera continental estable, se ha estimado recientemente con valores de 15 - 20 mW/m<sup>2</sup>, valores que son más bajos que los primeramente referidos.



## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA TERMICIDAD

---

En las cuencas de extensión, se ha manejado un significativo aumento del flujo de calor infracortical durante la etapa de "rift", el cual llega a superar de manera importante la contribución radiogénica, pero el que después disminuye con el transcurso del tiempo, lo que se define como un posterior relajamiento térmico progresivo (McKenzie, D., 1978).

La producción de calor radiogénico se restringe a la porción superior o más externa de la litósfera, en donde los elementos radioactivos han sido concentrados por diferenciación planetaria, aún cuando razonablemente cabría esperar que éstos hayan gravitado hacia el interior de la Tierra, dado que son de los elementos más pesados, pero entraron en combinación química con elementos más ligeros, y quedaron disueltos en las rocas de relativamente más baja densidad.

Aunque los elementos radioactivos son sólo elementos traza en la tierra, ya que ocurren en concentraciones que se miden en partes por millón, se considera que la radioactividad es una fuente de calor significativa que ha persistido por millones de años.

El decaimiento radioactivo de esos elementos pesados cambia la masa a energía, y ésta es convertida en calor, esto es, los átomos de dichos elementos se desintegran espontáneamente emitiendo partículas atómicas (núcleos de Helio y electrones), las cuales son absorbidas por el material

circundante en donde su energía de movimiento es transformada en calor (BasinMod, 1992).

La generación de calor radiogénico varía significativamente con la litología. Las rocas graníticas presentan una importante radioactividad, por lo que se les relaciona con valores altos de producción de calor radiogénico, mientras que las rocas máficas, pobres en Uranio y Torio, se asocian con bajos valores de producción. Las rocas metamórficas de alto grado, en general no contienen grandes cantidades de radioactividad.

La producción de calor radiogénico en los sedimentos, también es variable. Los valores más bajos se relacionan con evaporitas y carbonatos, los valores bajos a medios con areniscas, los altos con limolitas y lutitas, y los más altos con lutitas negras (*in* Allen y Allen, 1990).

Desde el punto de vista de una cuenca sedimentaria, también se maneja el concepto de **Flujo de Calor del Basamento o Basal**, el cual representa el flujo de calor que emana hacia arriba desde el basamento de la cuenca, a la columna de sedimentos. Este flujo, ubicado en la base de los sedimentos por lo tanto, es la suma de dos componentes, uno, el flujo de calor infracortical o reducido ubicado en la base del basamento de la cuenca y, dos, el flujo de calor radiogénico producido dentro del basamento.

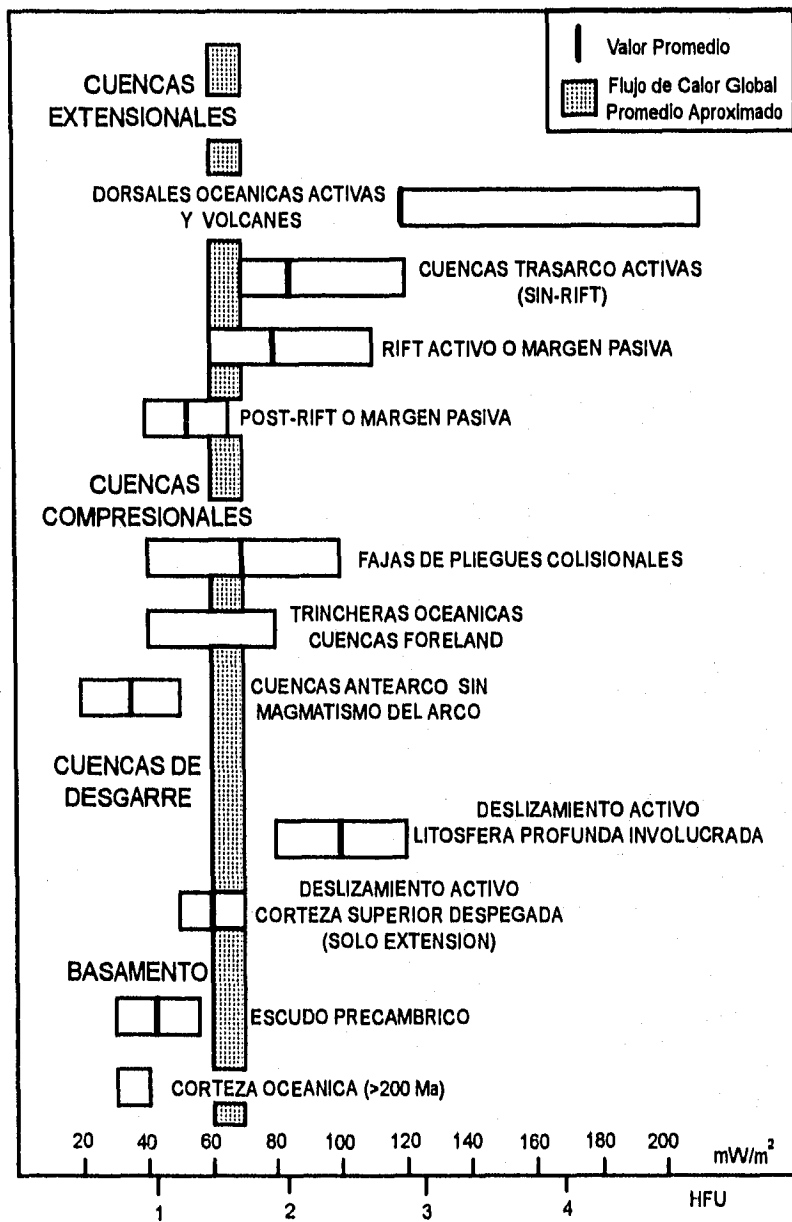


FIG. 70 VALORES DE FLUJO DE CALOR EN DIFERENTES TIPOS DE CUENCAS SEDIMENTARIAS (Mod. de Allen y Allen, 1990)

ANALISIS Y MODELADO DE LA TERMICIDAD

CONTINENTE PROVINCIA	FLUJO DE CALOR SUPERFICIAL ( $Q_0$ ) (mW/m <sup>2</sup> )	FLUJO DE CALOR REDUCIDO ( $Q_r$ ) (mW/m <sup>2</sup> )	PROFUNDIDAD CARACTERISTICA (D) (km)
NORTEAMERICA			
BASIN AND RANGE	92	59	9.4
SIERRA NEVADA	39	17	10.1
ORIENTE DE EUA	57	33	7.5
ESCUDO CANADIENSE	39	22	12.3
EUROPA		34	7.1
ESCUDO BALTICO	36	22	8.5
ESCUDO UCRANIANO	36	25	7.1
AFRICA			
NIGERIA	20	11	6
ZAMBIA	67	40	11
ASIA			
ESCUDO INDICO	64	39	14.8
AUSTRALIA		33	7.5
ESCUDO OCCIDENTAL	39	26	4.5
ESCUDO CENTRAL	83	27	11.1
AUSTRALIA ORIENTAL	72	57	11.1

FIG. 71 TABLA DE FLUJOS DE CALOR SUPERFICIAL Y REDUCIDO DE VARIAS PROVINCIAS EN EL MUNDO. (Tomada de BasinMod, 1992)

Por otro lado, se debe mencionar que existen otras fuentes internas de calor dentro de la litósfera que, si bien son de importancia relativamente secundaria, pueden llegar a proporcionar de manera particular, cantidades de calor apreciables localmente (Armstead, H. Ch. H., 1989). Estas son:

- por la cristalización o solidificación de rocas fundidas al enfriarse,
- por reacciones químicas exotérmicas que ocurren dentro de la corteza, y

- por la fricción generada en fallas, en donde la acción deslizante de grandes masas de roca provoca enormes presiones.

**b. Transmisión de Calor**

Por lo que se refiere a la manera en la cual se efectúa la transferencia y redistribución del calor dentro de la corteza, se considera que se lleva a cabo por medio de dos mecanismos principales:

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA TERMICIDAD

- por **Conducción**, un proceso de carácter difusivo en el que la energía cinética es transferida dentro del medio por colisión intermolecular. De hecho, se considera que este mecanismo constituye la manera predominante de transferencia de calor en la litósfera.

- por **Convección**, un mecanismo en el que la transferencia de calor se efectúa debido al movimiento y circulación de fluidos dentro del medio.

Cuando la transferencia de calor se realiza exclusivamente por el proceso de conducción, se encuentra expresada matemáticamente mediante la Ley de Fourier, la cual define que el Flujo de Calor (Q) en un punto determinado de la litósfera, es directamente proporcional al producto del Gradiente de Temperatura y a la Conductividad Térmica de la roca en ese punto.

Esto se representa por una ecuación de la siguiente forma (ver McCulloh y Naeser, 1989; Allen y Allen, 1990):

$$Q = -K \frac{dT}{dy}$$

en donde:

K = coeficiente de conductividad térmica

T = temperatura dentro del medio

y = coordenada en la dirección de la variación de la temperatura

En si, la relación  $dT/dy$  de esta ecuación, está representando el gradiente geotérmico, esto es,

la proporción en la cual se incrementa la temperatura de la tierra con la profundidad.

La conductividad térmica es la propiedad que expresa la habilidad o dificultad de un material, en este caso las rocas, para transmitir el calor, es decir, manifiesta la velocidad de transporte del calor por la roca.

Las unidades con que se refiere la conductividad térmica son:

W/m°C - watts por metro grado centígrado  
cal/s cm<sup>2</sup>°C - calorías por segundo centímetro cuadrado grado centígrado

Las equivalencias que guardan estos sistemas de unidades están dadas por:

$$1 \text{ W/m}^\circ\text{C} = 2.388 \times 10^{-3} \text{ cal/s cm}^2\text{C}$$
$$1 \text{ cal/s cm}^2\text{C} = 418 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

La conductividad térmica, varía dependiendo de la composición o tipo litológico de la roca, teniéndose, por tanto, un valor característico para cada uno de ellos. Varios de estos valores han sido determinados experimentalmente a partir de medidas de laboratorio sobre muestras de roca de los principales tipos litológicos (Fig.72).

Dentro de las rocas sedimentarias, se ha visto que la conductividad térmica varía con el sepultamiento. Los valores de ésta se incrementan en los primeros 3000 m de profundidad debido al efecto de la compactación, hecho que es más marcado en las areniscas (Fig. 73).

LITOLOGIA	ALLEN & ALLEN (1990) W/m °K	JESSOP, A. M. (1990) W/m °K	GENEX. (1991) W/m °K	BASINMOD (1991) W/m °C
ARENISCA	1.5 - 4.2	3.72	3.5	4.4
LIMOLITA			2.0	2.0
LUTITA	1.2 - 3	2.9	1.9	1.5
CALIZA	2 - 3.4	2.01 - 3.44	3.0	2.9
DOLOMIA	3.2 - 5	4.68	3.3	4.8
SAL	5.4 - 7.2		5.8	5.4
BASALTO	1.3 - 2.9	1.69 - 1.96		2.9
ANDESITA	2.28			
RIOLITA		2.57		
GRANODIORITA	2.8 - 3.5	2.63		
GRANITO	2.4 - 3.8	3.5		
GNEIS	2.1 - 4.2			
AGUA			0.60	

FIG. 72 TABLA DE VALORES DE CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LITOLOGIAS TIPO

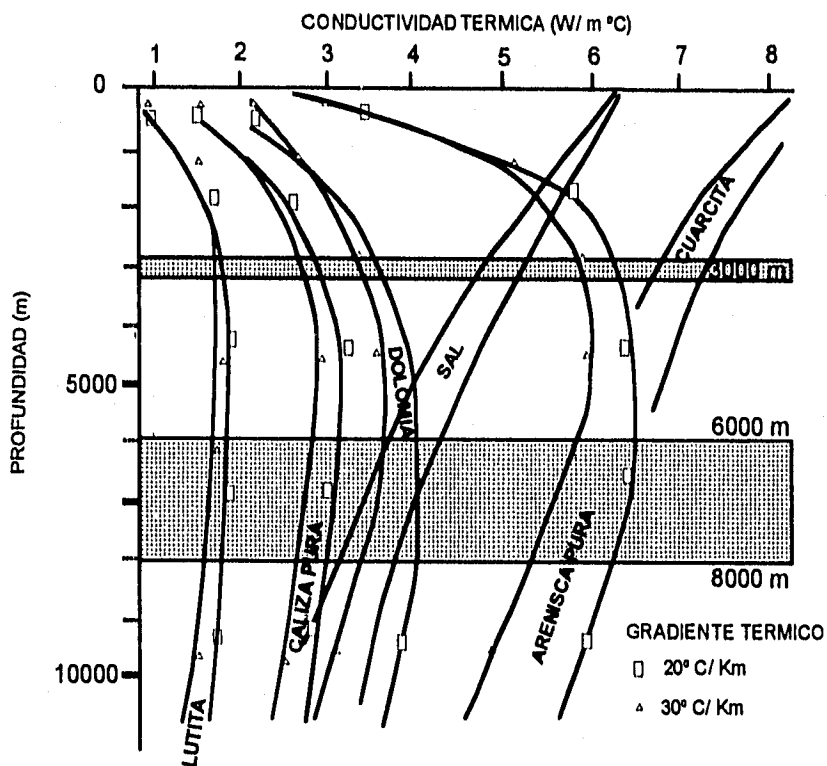


FIG. 73 COMPORTAMIENTO DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA EN LITOLOGIAS TIPO CON RESPECTO A LA PROFUNDIDAD CON DOS GRADIENTES TERMICOS DISTINTOS (de Ungerer, P., 1990).

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA TERMICIDAD

---

Entre los 3 000 y 6 000 m, dichos valores tienden a estabilizarse y a conservarse sin muchos cambios, lo cual se relaciona con un balance de la compactación y la temperatura, pero, para después de los 6 000 m de profundidad, la temperatura controla la conductividad, y sus valores comienzan a disminuir paulatinamente. La influencia de la temperatura en la conductividad es significativa después de los 150 °C (GENEX, 1991).

La sal difiere de este patrón de comportamiento. Es una roca altamente conductiva, y aún cuando con el sepultamiento disminuyen sus valores apreciablemente, éstos característicamente, se siguen manteniendo relativamente más altos, que los de los otros tipos de rocas sedimentarias.

De lo anteriormente mencionado, se puede ver que, con el sepultamiento, la conductividad térmica de las rocas sedimentarias es particularmente sensible a la presencia de niveles evaporíticos, a la relación arcilla-arena y a la compactación.

Dado que éstos dos últimos factores se encuentran estrechamente relacionados con la porosidad, la conductividad térmica puede ser visualizada en relación a la evolución de esta porosidad con el sepultamiento, y a la matriz de la roca. Un análisis de una manera muy similar al que se realiza con la compactación.

Lerche, I. (1990), describe que en un medio idealizado que tuviera un 100% de porosidad,

la conductividad térmica total de ese medio estaría representada por la conductividad del fluido que estuviera allí contenido, lo cual muy a menudo, viene a ser la del agua; mientras que, en una roca totalmente compactada, la conductividad térmica estaría expresada por la conductividad de la matriz constituyente de la roca.

En un medio real, se puede decir que la conductividad térmica se encuentra variando entre estos dos valores extremos mencionados.

En atención a lo anterior, se ha reportado una expresión matemática propuesta por Lewis y Rose en 1970 (*in* Lerche, I., 1990), la cual puede ser usada para el establecimiento de la conductividad térmica total de una roca en función de su porosidad (GENEX, 1991):

$$K_s = K_r \left( \frac{K_w}{K_r} \right)^\phi$$

en donde:

$K_s$  = conductividad térmica total de la roca

$K_w$  = conductividad térmica del agua

$K_r$  = conductividad térmica de la matriz de roca

$\phi$  = porosidad

Ungerer, P. *et al.* (1991), siguiendo estas consideraciones, describen otra forma de expresión para obtener la conductividad térmica total de una roca, la cual básicamente es la misma que la ecuación anterior, aunque con una diferente denominación de los

## ANALISIS Y MODELADO DE LA TERMICIDAD

---

términos involucrados, pero con los mismos resultados. Aquí la conductividad térmica total o global de la roca, referida como  $L$ , la describen por:

$$L = l_w \phi + l_m (1-\phi)$$

en donde:

$\phi$  = porosidad

$l_w$  = conductividad térmica del agua

$l_m$  = conductividad térmica de la matriz de roca

La conductividad térmica de la matriz de roca depende de la naturaleza, proporciones y distribución de los constituyentes del tipo de roca que se trate. Esta composición, por lo tanto, puede variar desde una litología pura, a combinaciones de varias de ellas.

El flujo de calor conductivo se lleva a cabo generalmente de manera vertical, es decir, con un movimiento de abajo hacia arriba, del interior de la tierra a la superficie. Pero, también se pueden tener movimientos de componente lateral de cierta importancia, debido a variaciones laterales en conductividad, por ejemplo, con la ocurrencia de domos salinos o de bloques cristalinos.

Por lo que se refiere al flujo de calor producto del proceso de convección, dado que el principal agente de transferencia lo constituye el movimiento o flujo de fluidos dentro del medio, esencialmente del agua, implica que este flujo de calor se efectúe dentro de las

zonas permeables de la litósfera, esto es, en la parte más externa.

En el caso de una cuenca sedimentaria, este fenómeno de movimiento de fluidos se registra dentro de los sedimentos mismos, el cual se considera que puede ser producido básicamente por tres tipos de procesos que son:

- Compactación
- Convección térmica natural
- Hidrodinamismo regional

El flujo de agua por compactación, se encuentra estrechamente relacionado con el sepultamiento y la consecuente disminución de la porosidad en los sedimentos. Por esto, su intensidad depende eminentemente de la proporción de sedimentación y del espesor de capas sedimentarias en vías de compactación. Sus efectos sobre la transferencia de calor generalmente se estiman de poca consideración, y sólo de importancia local, cuando el flujo del agua esté concentrado específicamente sobre algunas zonas estrechas (Ungerer, P. *et al.*, 1990).

El flujo del fluido por convección térmica natural, es el resultado de la dilatación térmica que puede experimentar el fluido, lo cual provoca un movimiento que se estructura en celdas de convección, cuya duración de movimiento se estima en periodos de 1 000 a 100 000 años, antes de pasar a un estado estacionario.

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA TERMICIDAD

---

Este efecto se considera también de carácter relativamente local, razón por la cual, su influencia sobre la transferencia de calor dentro de una cuenca sedimentaria viene a ser de poca magnitud, y sólo de cierta importancia, en áreas con una alta permeabilidad.

El flujo de fluidos por hidrodinamismo regional se refiere a la circulación de agua debida a la existencia de un desnivel topográfico dentro de las unidades de la cuenca, lo cual puede provocar un flujo de fluidos subterráneo bajo el dominio de la gravedad. Es un fenómeno que se llega a manifestar entre las zonas de carga y descarga del fluido, en distancias que a menudo van de los 10 a los 100 Km de separación.

La amplitud de la zona sometida a la influencia de este agente de transferencia de calor, es bastante variable, ya que está en función del tiempo que dure la circulación, así como de la difusión térmica del medio.

De esto último, se desprende que el aporte a la transferencia de calor del hidrodinamismo regional, puede llegar a ser de cierta importancia en algunas ocasiones, como lo han señalado Person y Garven (1992) y Ungerer, P. *et al.* (1990).

La común heterogeneidad de los materiales constituyentes de las varias unidades formacionales de una cuenca, representados

térmicamente por una conductividad variable, la manifestación local de transferencia de calor convectivo, así como la ocurrencia de fuentes de calor secundarias, influyen en el desarrollo de un característico **flujo de calor variable** a través de la columna sedimentaria de la cuenca. Aunque, desde un punto de vista general, en algunas ocasiones este flujo puede ser considerado como un **flujo de calor uniforme o constante**, cuando la participación de los factores antes mencionados es de grado muy bajo, o no participan en el desarrollo del flujo.

Empíricamente, se considera que ésta situación puede manejarse, cuando el espesor de la columna sedimentaria no sea demasiado grueso (< 6 000 m), y su relleno se haya desarrollado con la predominancia de proporciones de sedimentación relativamente bajas (< 100 m/Ma) (GENEX, 1991).

Con una proporción de sedimentación relativamente alta, se tiene una marcada variación del flujo de calor. Esto es debido a que, con la entrada de una importante cantidad de sedimentos a la cuenca, los cuales están térmicamente fríos, éstos no estarán en equilibrio térmico con el basamento y sedimentos ya existentes, y provocan un decrecimiento brusco del flujo de calor hacia la superficie. Este efecto perdura hasta que los nuevos materiales alcanzan el régimen de equilibrio, y es comúnmente referido bajo la denominación del efecto "blanketing" (Ungerer, P. *et al.*, 1990; GENEX, 1991)



Por el contrario, cuando se lleva a cabo una erosión importante, se tiene la manifestación de un incremento del flujo de calor en la superficie, dado que los sedimentos calientes son acercados hacia la superficie.

En el caso de tomar en cuenta un flujo de calor uniforme o constante dentro de una cuenca, la conductividad térmica y el gradiente geotérmico vienen a ser factores inversamente proporcionales (ver ecuación de Ley de Fourier).

Así, dentro de formaciones altamente conductivas (sal, dolomía), el gradiente geotérmico tenderá a decrecer, mientras que, dentro de capas pobremente conductivas (lutitas), por el contrario, el gradiente geotérmico tenderá a incrementarse.

El resultado que se obtiene de esto, es que el gradiente geotérmico, en lugar de definirse con un comportamiento lineal como comúnmente se considera, se describirá con cambios abruptos. Este comportamiento se refiere como de tipo "dogleg" (GENEX, 1991), dada la característica forma quebrada de la curva, con que el gradiente geotérmico se muestra en una gráfica Temperatura/Profundidad.

### IV.2. Historia Térmica

La determinación de la distribución que espacialmente ha guardado la temperatura dentro de una cuenca sedimentaria a través del tiempo, es la finalidad del establecimiento de la historia térmica de esa cuenca. En otras palabras, implica considerar cuánto y cómo ha cambiado la temperatura de una región en particular.

Dado que la temperatura es dependiente del flujo de calor, el establecimiento en la región de la cuenca del comportamiento a través del tiempo de éste último, esto es, la historia de su comportamiento, determina la historia térmica.

Las variaciones del flujo de calor en el pasado, pueden ser determinadas de dos maneras posibles:

- una, aplicando por analogía, a partir del conocimiento de la evolución dinámica de la cuenca, los valores actuales de flujo de calor considerados en los diferentes ambientes tectónicos.

- otra, tomando en consideración la evolución de los varios indicadores térmicos existentes dentro de una cuenca sedimentaria como son: materia orgánica (destaca la vitrinita), arcillas, trazas de fisión en apatitas, diagénesis, isótopos de oxígeno, inclusiones fluidas, entre otros.

La historia de comportamiento del flujo de calor de una región en particular, para ser aceptable, debe tener el mejor ajuste posible con el estado térmico actual. Este estado es establecido, a partir de los datos actuales disponibles de temperatura, gradiente geotérmico o flujo de calor.

Los datos de temperatura actual pueden ser obtenidos a partir de mediciones directas en pozos (BHT), las cuales, después de la aplicación de una corrección, son utilizadas en la determinación del gradiente geotérmico o del flujo de calor. También se encuentran disponibles como datos actuales, algunas mediciones superficiales de éste último.

Dentro del marco de las cuencas asociadas a extensión, varios modelos de flujo de calor han sido desarrollados: el de estiramiento uniforme de McKenzie, D. (1978), el de intrusión de diques de Royden, L. *et al.* (1980), el de extensión finita de Jarvis y McKenzie (1980), el de metamorfismo cortical profundo de Falvey y Middleton (1981), por mencionar unos pocos. Todos estos modelos parecen concurrir en el involucramiento de dos fases principales:

- una, la primera, caracterizada por un incremento del flujo de calor debido al adelgazamiento de la corteza y ascenso de la astenósfera. La Fase "Rift" de estiramiento, adelgazamiento y fallamiento de la corteza.

- otra, la segunda, caracterizada por un decaimiento térmico exponencial debido al restablecimiento del equilibrio térmico del manto litosférico y la astenósfera. La fase post-"rift" o de subsidencia térmica.

Este escenario extensional, se considera que se desarrolla variando entre dos maneras extremas (BasinMod, 1992):

- Por un lado, con una fase "rift" instantánea, de corto tiempo de duración, en donde se caracteriza un repentino incremento del flujo de calor hasta un máximo, el cual es seguido por un decaimiento de tipo exponencial (curva A en Fig. 74).

- Por otro, con una fase "rift" de largo período de tiempo, en donde el calor es disipado, y el pico de flujo de calor a la terminación de la fase, es marcadamente menor que en la manera anterior, y la posterior curva de decaimiento térmico, por lo tanto, se define con un comportamiento más cercano al lineal que al exponencial (curva B en Fig. 74).

Independientemente, de hacia cual de los dos extremos se carga la historia de flujo de calor determinada para una región particular, dentro este modelo extensional, su desarrollo se considera como de carácter variable con respecto al tiempo, lo cual permite referirla comúnmente como una historia de **Flujo de Calor Variable**.

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA TERMICIDAD

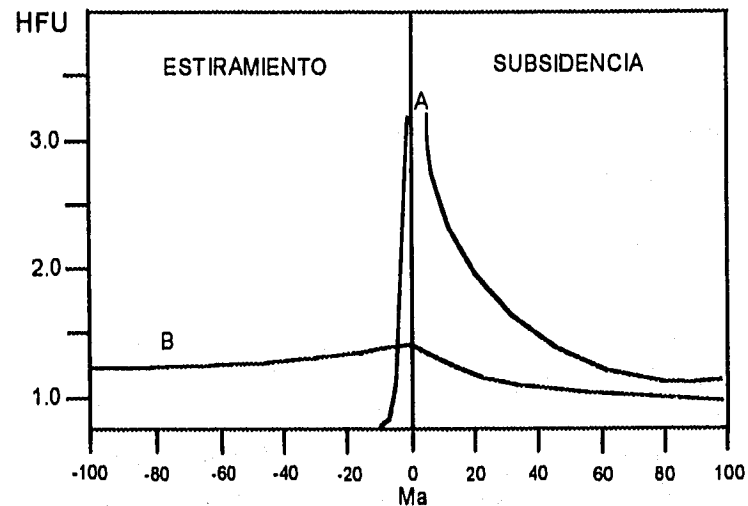


FIG. 74 FLUJO DE CALOR COMO UNA FUNCIÓN DEL TIEMPO EN UNA CUENCA EXTENSIONAL (de BasinMod, 1992)

Un flujo de calor variable, tomando en consideración exclusivamente un proceso de transferencia de calor por conducción a través del tiempo, y asumiendo que se lleva a cabo solamente en dirección vertical, es decir, unidimensionalmente (1D), se encuentra expresado por medio de una ecuación que resulta de la combinación de la de la Ley de Fourier y la de la Ley de la Conservación de la Energía (BasinMod, 1992):

$$\frac{d\left(K \frac{dT}{dy} + Q\right)}{dy} = c \frac{dT}{dt}$$

en donde:

- T = temperatura (°K)
- c = capacidad calorífica
- K = conductividad térmica
- t = tiempo
- Q = flujo de calor
- y = profundidad

Como se puede observar, en esta ecuación se toma en cuenta un parámetro térmico más de las rocas, la **capacidad calorífica**, que es la propiedad que éstas últimas tienen de liberar o almacenar calor cuando se ven sujetas a cambios bruscos o rápidos de temperatura, y está dada por la cantidad de calor requerida para incrementar un grado centígrado la temperatura de una unidad de volumen de roca (Joules/m<sup>3</sup>/°C).

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA TERMICIDAD

---

Algunos valores experimentales promedio en MegaJoule/m<sup>3</sup>/°K son:

Arenisca	- 2.90
Limolita	- 2.80
Lutita	- 2.30
Marga	- 2.75
Caliza	- 2.70
Dolomita	- 2.70
Sal	- 2.00

Por otro lado, GENEX (1991), tomando en cuenta también la transferencia de calor convectivo por flujo de fluidos de manera vertical, así como la generación de calor radiogénico dentro de los sedimentos, describe el flujo de calor variable a través del tiempo expresado por la siguiente ecuación:

$$\rho c \frac{dT}{dt} = \frac{d\left(K \frac{dT}{dy}\right)}{dy} - (\rho c V_s + \rho_w C_w u) \frac{dT}{dy} + A$$

en donde:

- T = temperatura (°K)
- C<sub>w</sub> = capacidad calorífica del agua
- K = conductividad térmica
- u = velocidad de filtración del agua
- ρc = capacidad calorífica de sedimentos
- A = calor radiogénico
- V<sub>s</sub> = velocidad de sepultamiento
- t = tiempo
- ρ<sub>w</sub> = densidad del agua
- y = profundidad

En esta ecuación, el parámetro conductivo se encuentra expresado en el primer término, el segundo de éstos representa el proceso convectivo, mientras que el tercero implica la fuente radiogénica de calor.

Por otro lado, una simplificación para el establecimiento de la historia de flujo de calor para una región determinada se obtiene considerando a éste último, con un comportamiento constante a través del tiempo, lo cual se refiere como una historia de **Flujo de Calor Constante**. El valor que generalmente se toma en cuenta para este caso, lo constituye el flujo de calor actual.

Otra manera de establecer la historia térmica de una cuenca, es a partir de la consideración del gradiente geotérmico, ya que la temperatura se obtiene de la relación:

$$Gr = \frac{dT}{dy}$$

en donde:

- T = temperatura
- y = profundidad

Aquí, de la misma manera que se hace para el flujo de calor, su historia de comportamiento puede considerarse con un **Gradiente Geotérmico Variable** o un **Gradiente Geotérmico Constante**, esto es, con cambios

y sin cambios de la magnitud de éste a través del tiempo, respectivamente, los cuales son establecidos empíricamente en función del modelo de evolución geológica de la región.

La desventaja que estas últimas dos opciones de estimación presentan, es que, aún cuando se puedan reconstruir los gradientes geotérmicos hacia el pasado con cierta confianza, las temperaturas obtenidas no toman en cuenta la variable de la conductividad térmica de las rocas, mientras que la de flujo de calor sí.

Independientemente de cual de las formas anteriores sea considerada en el establecimiento de la historia térmica de una región, ésta queda representada esquemáticamente en una gráfica Tiempo-Profundidad, por medio de una serie de curvas isotermas (Fig. 75). Comúnmente, éstas se acompañan de las curvas de sepultamiento del análisis geohistórico, a manera de tener un patrón de comparación con las diferentes unidades estratigráficas de la cubierta sedimentaria.

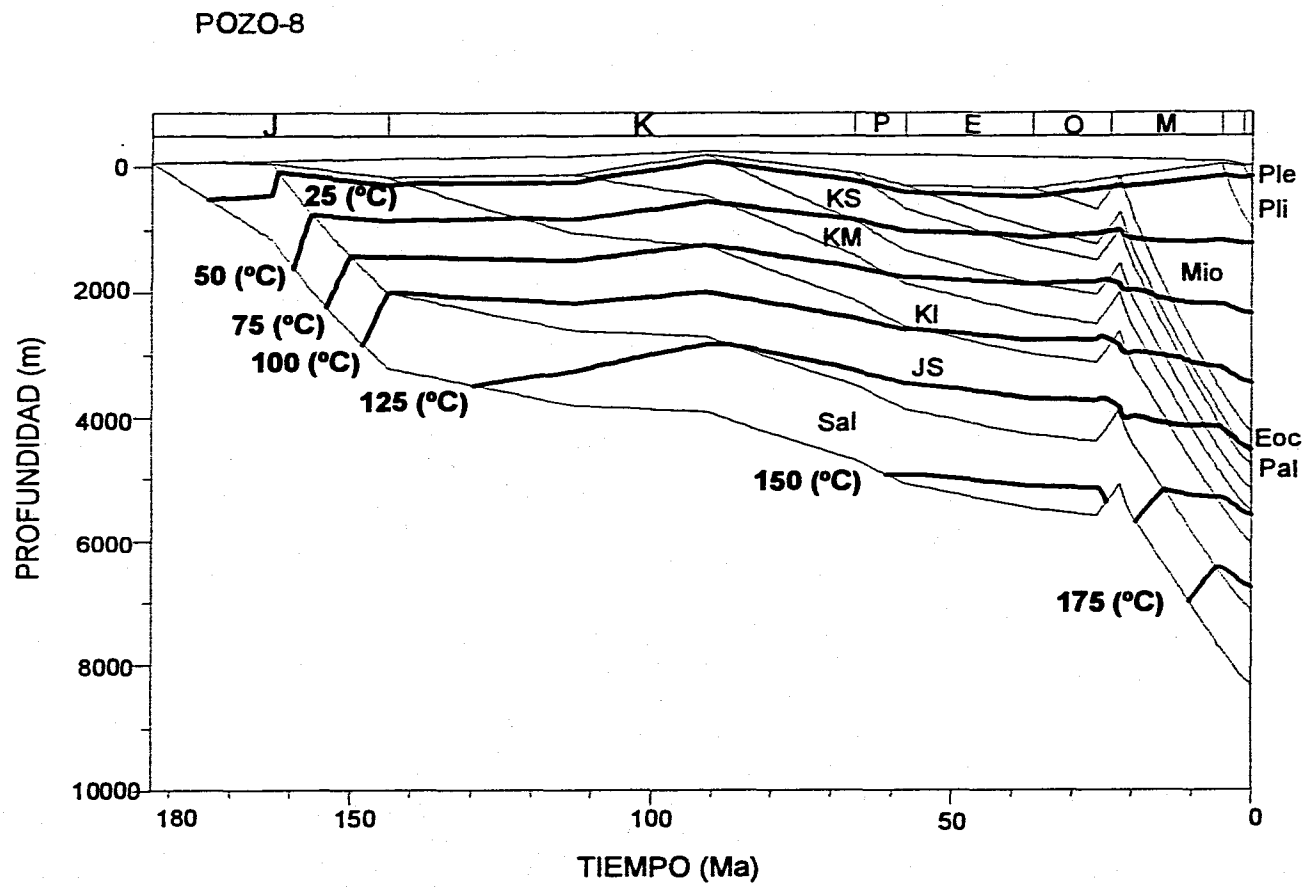
### IV.2. ANÁLISIS TÉRMICO DE LA SECCIÓN

El modelado de la termicidad de la sección de estudio, permite estimar el marco cuantitativo de la distribución de temperaturas en ella presente a través del tiempo, como parte de la evolución de la cuenca en la que se encuentra. Caracteriza, particularmente, el rango de temperatura al que cada una de las diferentes unidades estratigráficas de la cubierta sedimentaria se ha visto sometida conforme el desarrollo de su sepultamiento, y con esto, el de los materiales en ellas contenidos.

Esto último, constituye un aspecto de interés desde el punto de vista de la exploración petrolera, dado que permite seguir y analizar la trayectoria evolutiva de la maduración de la materia orgánica presente en esas unidades.

#### IV.2.1. Historia de Flujo de Calor

Tomando en cuenta las varias maneras que se refieren para la realización del modelado de la historia térmica de una región determinada, las cuales se describieron en el inciso anterior, particularmente para la sección de estudio, ésta se llevó a cabo considerando un flujo de calor de comportamiento variable.



**FIG.75 GRAFICA DE HISTORIA DE SEPULTAMIENTO E HISTORIA TERMICA**

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA TERMICIDAD

---

Para el establecimiento de este comportamiento variable se toma en cuenta que el desarrollo de la cuenca en la que la sección se encuentra, se asocia con un modelo de evolución de carácter extensional, que como ya se ha discutido en el análisis de subsidencia, implica dos fases mayores que son la etapa "rift" y la etapa post-"rift".

La estimación de los valores de flujo de calor considerados para la determinación de esta historia térmica, de una manera simplificada para el modelo de evolución anteriormente mencionado, se realizó básicamente en función del establecimiento de los parámetros límites que se tienen al inicio y final de la primera etapa ("rift"), así como del dato de flujo de calor actual.

Para esto se tomaron en cuenta principalmente, la relación gráfica establecida por McKenzie, D. (1978) entre el Factor de Estiramiento  $\beta$  de la cuenca y el flujo de calor (Fig. 76), por un lado y, por otro, los valores actuales que de éste último se obtienen en el área de la sección.

En cuanto a lo segundo, es decir, la obtención del marco cuantitativo del flujo de calor actual, éste se establece en función de considerar los datos de mediciones directas de temperatura de subsuelo (BHT) que se han obtenido en los diferentes pozos de control de la sección (Fig. 77) y, la ecuación de la Ley de Fourier (ver inciso anterior), en donde también se toman en cuenta, las distintas conductividades que caracterizan a las diferentes unidades estratigráficas de la cubierta sedimentaria, las cuales son función

de las proporciones litológicas que las constituyen.

Es conveniente mencionar aquí, que los correspondientes estimaciones de flujo de calor actual para los pozos 10, 11 y 13, dado que no tuvieron datos de BHT de ellos, se establecieron por extrapolación con los datos de temperatura de los pozos inmediatamente adyacentes.

También conviene señalar que, para la estimación del marco cuantitativo del flujo de calor actual, es necesario tomar en consideración un parámetro de temperatura límite en la superficie de cada una de las localidades de control de la sección, esto es, la temperatura superficial, la cual, para este caso de la sección de estudio es marcada con un valor promedio de alrededor de 20°C.

Se debe tener en cuenta que con la caracterización de las temperaturas de subsuelo y la temperatura superficial en los distintos puntos de control de la sección, se está definiendo dentro de la ecuación de Fourier lo que corresponde al gradiente geotérmico

Los valores de flujo de calor así estimados en los diferentes puntos de control de la sección, se describen separadamente como el flujo de calor del basamento y el flujo de calor superficial. La diferencia entre ambos, define el comportamiento vertical que dicho flujo guarda dentro de la cubierta sedimentaria de la sección, en cada una de dichas localidades de control.

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA TERMICIDAD

---

En la Figura 78 se muestran gráficamente estos valores estimados de flujo de calor, los cuales, como se puede observar, se manifiestan como lateralmente variables a lo largo de la sección, indicando, con esto, una heterogeneidad de comportamiento térmico dentro de ésta última. De una manera general, los valores de flujo de calor se pueden ubicar en promedio en alrededor de los 35-36 mW/m<sup>2</sup>.

Llama la atención aquí, que esta heterogeneidad térmica tiende a ser más marcada hacia las localidades de la porción más nororiental de la sección, esto es, en la zona de los pozos 10 al 13, en donde se tiene la concentración de los valores estimados de flujo de calor más altos.

En estos pozos también, aunque con excepción del Pozo 11, se observa que el comportamiento vertical que sigue el flujo de calor dentro de la cubierta sedimentaria, se define con un marcado descenso de sus valores (Fig. 78), lo que describe, un comportamiento característicamente diferente al que se presenta en los demás puntos de control de la sección, en donde dicha disminución se lleva a cabo de una manera más atenuada.

Esto último sugiere la actual ocurrencia de un desequilibrio térmico en dicha porción nororiental de la sección, lo cual al parecer tiene que ver, con la presencia en esta zona de los mayores espesores de la serie Pleistoceno

(Figs. 12 y 13), un depósito muy joven que comenzó hace 1.6 Ma y que se desarrolló bajo una alta tasa de sedimentación, el cual todavía no alcanza la armonía térmica en la región.

Este desequilibrio térmico se caracteriza por el desarrollo de un gradiente geotérmico sensiblemente mayor en el sector noreste de la sección, y, por lo tanto, por la ocurrencia de las mayores temperaturas de subsuelo. Aquí, a una profundidad de alrededor de los 7 000 m, ya se presentan temperaturas cercanas a los 200°C en los pozos 12 y 13 (Fig. 79), mientras que en los restantes puntos de control, estas temperaturas se alcanzan a profundidades algo mayores.

Por otro lado, en cuanto a lo que se refiere al establecimiento en la zona de la sección, de la variación a través del tiempo del marco cuantitativo del flujo de calor que proviene del basamento, el valor considerado de éste a la finalización de la etapa "rift", la cual se ha marcado para el tiempo de los 144 Ma en la sección de estudio (ver análisis de subsidencia), se establece tomando en cuenta la correspondencia que guarda el flujo de calor con el valor de 1.8 del factor de estiramiento  $\beta$  estimado para la evolución de la cuenca en la gráfica de relación de ambos parámetros de McKenzie, D. (Fig. 76). De esto resulta la consideración para este tiempo de un flujo de calor de aproximadamente 1.4  $\mu\text{cal}/\text{cm}^2/\text{seg}$  o UHF, lo cual representa un valor de 58 mW/m<sup>2</sup>.



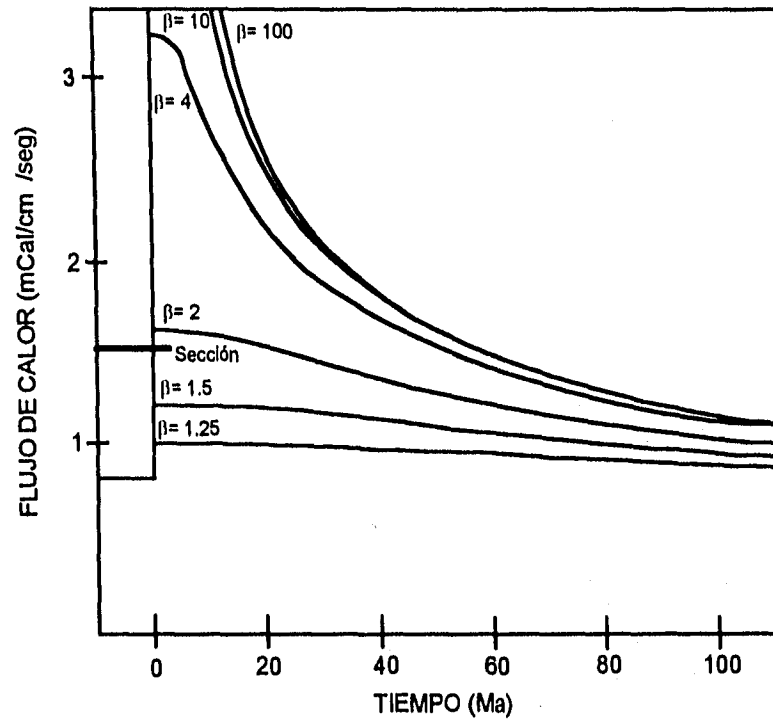
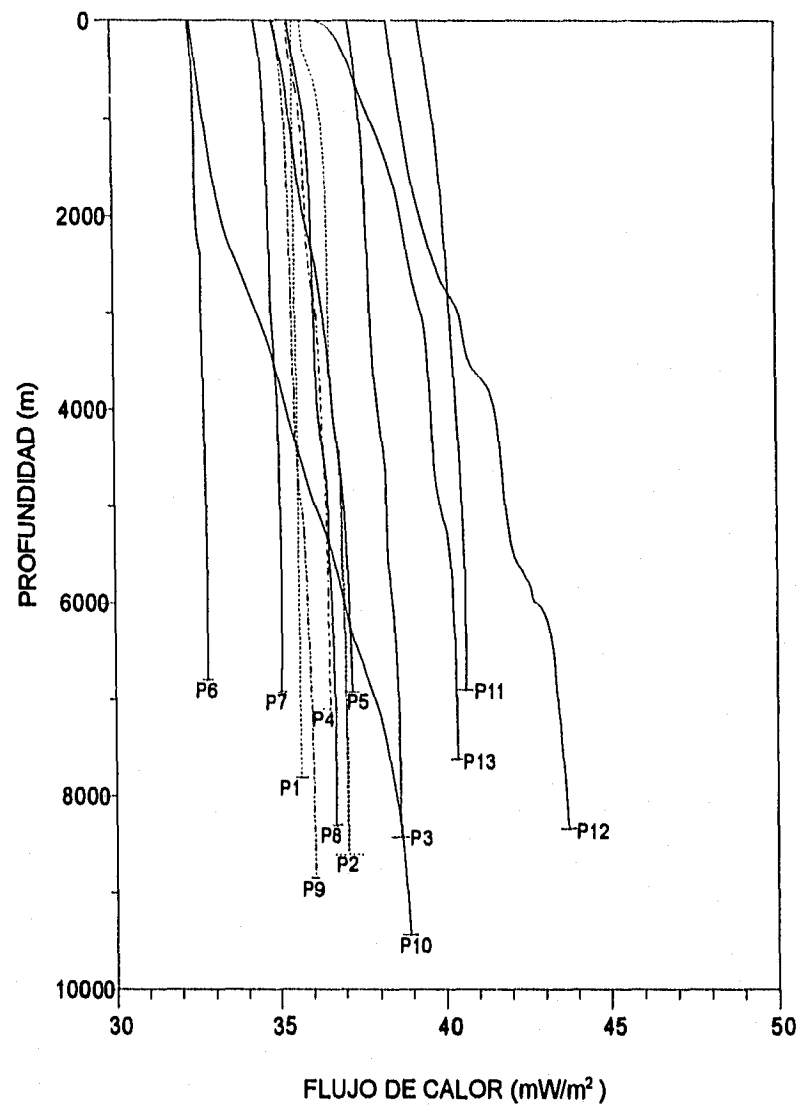


FIG. 76 RELACION ENTRE EL FACTOR DE ESTIRAMIENTO  $\beta$  Y EL FLUJO DE CALOR A TRAVES DEL TIEMPO (Mod. de McKenzie, D., 1978)

POZO 1		POZO 2		POZO 3		POZO 4	
Prof.	T(°C)	Prof.	T(°C)	Prof.	T(°C)	Prof.	T(°C)
3703	111	4540	89	950	54	502	49
4769	133	4614	146	4662	129	3319	100
5250	138	4735	140	4800	132	3645	99
5264	138	4750	136	4939	137	4815	127
		4950	147			5204	131
POZO 5		POZO 6		POZO 7		POZO 8	
4638	124	4005	118	3071	78	3475	93
		4500	115	3930	111	4475	121
		5200	123	4200	119	4800	138
		5394	143	4550	126	5325	145
		5610	143	4997	137		
				5164	143		
POZO 9				POZO 12			
3071	78	5725	152	700	47	5414	154
3324	83	5910	161	1005	54	5750	161
3800	109			2100	71	6334	180
4815	133			2477	73	6714	193
5369	148			4412	132		

FIG. 77 DATOS DE TEMPERATURA DE POZO (BHT) EN LA SECCION



POZO	F.C.BASAMENTO	F.C.SUPERFICIAL
1	35.7	35.6
2	37.1	35.8
3	38.8	37.3
4	36.6	35.4
5	37.4	35.0
6	32.9	32.4
7	35.3	34.6
8	36.8	35.6
9	36.1	35.3
10	39.1	32.8
11	40.8	39.5
12	44.1	38.5
13	40.5	37.2

FIG.78 FLUJO DE CALOR CALCULADO ACTUAL DENTRO DE LA CUBIERTA SEDIMENTARIA EN CADA UNO DE LOS POZOS DE CONTROL DE LA SECCION

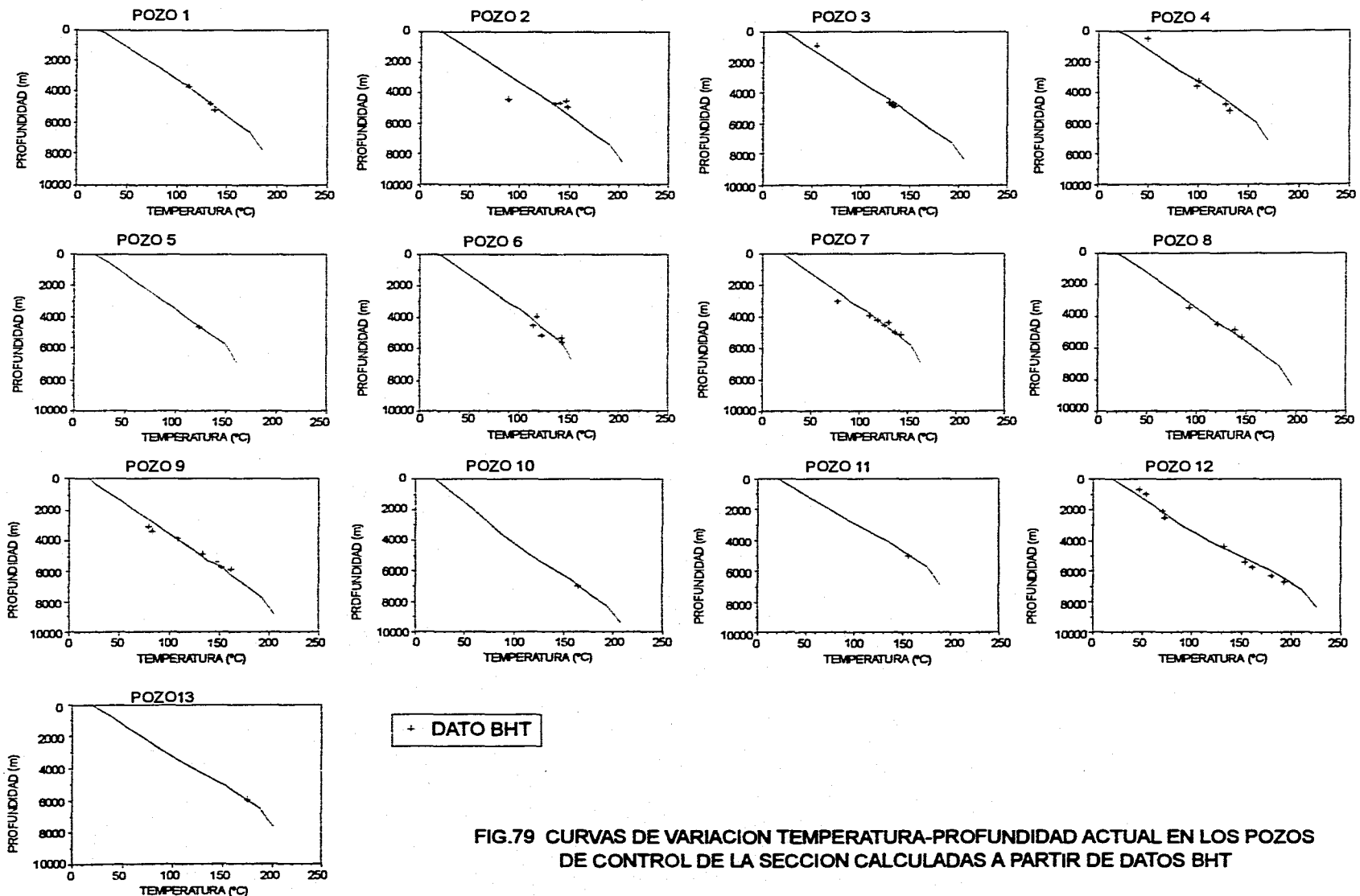


FIG.79 CURVAS DE VARIACION TEMPERATURA-PROFUNDIDAD ACTUAL EN LOS POZOS DE CONTROL DE LA SECCION CALCULADAS A PARTIR DE DATOS BHT

Por lo que se refiere al flujo de calor de basamento prevaleciente durante la parte inicial de la etapa de estiramiento, la que se marca en la zona de la sección para el tiempo de los 183 Ma, dado que éste debió haber sido sustancialmente menor que el alcanzado en su período de finalización, se considera un valor de  $35 \text{ mW/m}^2$ . Este constituye un valor promedio para zonas estables, y representa también el valor promedio actual de la región de la sección.

Ahora, por lo que respecta a la cantidad de flujo de calor que se toma en cuenta en el modelado durante la fase post-"rift", éste se marca variando entre el valor máximo establecido para la finalización de la fase "rift", y el valor calculado actual estimado en cada uno de los puntos de control de la sección. Esta consideración describe, por lo tanto, un flujo de calor con un comportamiento caracterizado por una lenta pero paulatina disminución en su valor, lo cual, permite simular el decaimiento térmico con que se define el desarrollo de dicha fase tectónica post-"rift".

Es conveniente aclarar, que bajo este modelo de comportamiento simplificado del flujo de calor variable en la sección, las varias etapas de subsidencia reconocidas dentro de esta fase post-"rift", se considera que no influyen de manera importante sobre la fuente de flujo de calor y, que por lo tanto, no se tienen incrementos sustanciales de éste último.

Otra consideración dentro de esta historia de flujo de calor tomada en cuenta para la

realización del modelado de la sección, se refiere al parámetro de temperatura superficial a manejar a través del tiempo, el cual puede variar según las diferentes condiciones prevalecientes durante el depósito de las diversas unidades de la cubierta sedimentaria. En el caso que nos ocupa, de manera generalizada, se consideró como de carácter constante con un valor de  $20^\circ\text{C}$ .

### IV.2.2. Historia Térmica

La historia térmica de la sección, esto es, el marco de temperatura estimado allí presente a través del tiempo, determinada a partir del modelado térmico unidimensional de cada una de las localidades de control considerando la precedente historia de flujo de calor propuesta, de manera descriptiva en el presente trabajo, se visualiza a la finalización de la etapa de depósito de cada una de las diferentes series estratigráficas de la sección, y se describe sintetizado esquemáticamente por medio del comportamiento que guardan las curvas isotermas distribuidas a lo largo de la cubierta sedimentaria, las cuales se muestran con un espaciamiento entre sí de  $25^\circ\text{C}$ .

Tomando en cuenta que desde el punto de vista de la exploración petrolera, una de las principales aplicaciones del conocimiento de la historia térmica de una región se da en la evaluación de cómo y cuánto beneficia o afecta la evolución de una roca con posibilidades de generar hidrocarburos, dentro de la historia térmica modelada de la sección, se describe el

comportamiento que sigue la serie Jurásico Superior, la cual se ha establecido que presenta las mejores características de roca generadora en la región de estudio, sobre todo el Tithoniano (ver inciso de Trabajos Previos).

Dicha descripción del comportamiento de la serie Jurásico Superior dentro del marco térmico estimado se realiza tomando en consideración la escala de temperatura que, en términos generales y desde el punto de vista exclusivamente de éste parámetro, se ha establecido en relación a la generación de hidrocarburos (Hunt, J. M., 1977; Perrodon, A., 1983; Bertrand, C. C., 1987; Allen y Allen, 1990), la cual se sintetiza como:

- |             |  |
|-------------|--|
| < 60°C      | - formación de gas biogénico o nada                  |
| 60 - 90°C   | - formación principalmente de gas húmedo             |
| 90 - 135°C  | - formación principalmente de hidrocarburos líquidos |
| 135 - 200°C | - formación principalmente de gas seco               |
| > 200°C     | - nada   |

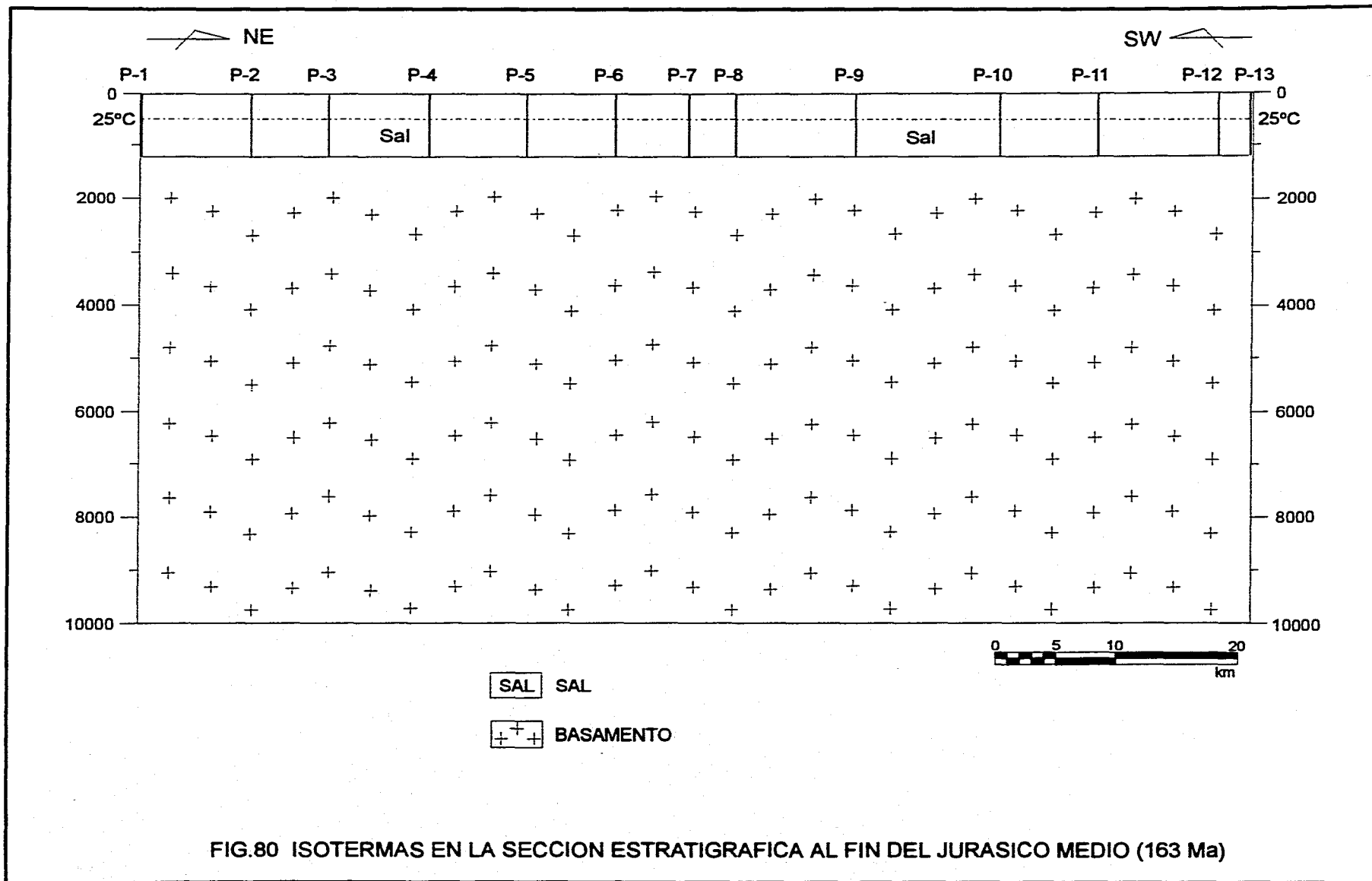
Estos valores térmicos límites se visualizan esquemáticamente a lo largo de la sección como curvas isotermas de control y, los intervalos de temperatura que delimitan constituyen sólo un parámetro térmico de referencia para la serie Jurásico Superior, ya que, la estimación real del momento específico en el cual se da inicio la generación de hidrocarburos, requiere de tomar en cuenta tanto el tiempo que la unidad estratigráfica permanece dentro de los rangos favorables de

temperatura, así como, el tipo de materia orgánica que en ella se encuentra contenida, análisis que no fue abordado en el desarrollo del presente trabajo, ya que se debe tener en cuenta también, que esta historia térmica requiere todavía de una etapa de calibración y validación a partir de la consideración de algunos indicadores térmicos (vitrinita, arcillas, isótopos, etc.) y con el tipo de hidrocarburos presentes en la región.

### Jurásico Medio

A la finalización del depósito de la unidad Sal (Fig. 80), el marco de temperatura presente en la sección se caracteriza con una sola isoterma de control de 25°C dentro de la serie, sobrepasándose apenas los 32°C a la base de la cubierta sedimentaria. Dado el comportamiento con que se distribuye dicha isoterma de control a lo largo de la sección, lateral y verticalmente, el marco de temperatura se describe como de carácter homogéneo.

Tomando en cuenta que la unidad presenta un espesor de 1 200 m, el gradiente geotérmico que se define prevalece para ese tiempo, resulta de aproximadamente 10°C/Km, un valor marcadamente inferior al promedio actual. En esto tiene mucho que ver la composición litológica de la unidad, que es típicamente de halita, una roca de alta conductividad térmica, que provoca que el calor no se preserve en la unidad y que éste continúe su paso, con lo que la temperatura no manifiesta incrementos importantes.



### Jurásico Tardío

A la finalización del Jurásico Tardío, con la acumulación de la serie Jurásico Superior (Fig. 81), el marco de temperatura a la base de la cubierta sedimentaria de la sección, alcanza poco más de los 120°C. Las isotermas de control continúan mostrando un comportamiento lateralmente homogéneo, lo cual tiene que ver con la consideración de un espesor de depósito uniforme de la serie. Pero, por el contrario, el comportamiento vertical de la temperatura en la sección, se manifiesta como de carácter heterogéneo, ya que se marca desarrollado de diferente manera en cada una de las dos unidades estratigráficas que para ese tiempo componen la cubierta sedimentaria.

La unidad Sal, dentro de la que no se define la presencia de ninguna isoterma de control, pasa a ubicarse dentro de un rango de temperatura que va de aproximadamente 100°C en su cima, a alrededor de los ya mencionados 120°C hacia su base. Esto caracteriza ahora a la unidad con un gradiente geotérmico de alrededor de 17°C/Km, dados los 1 200 m de espesor de que consta.

Este incremento del gradiente con respecto al prevaleciente en la etapa anterior, está influenciado de manera importante, por la mayor cantidad de flujo de calor que se marca para la finalización de la etapa "rift", la cual se considera acaecida durante este tiempo.

Por lo que respecta a la serie Jurásico Superior, su base se encuentra hasta una

temperatura de alrededor de los 100°C, y dado el estrecho espaciamiento con que dentro de ella se describen las curvas isotermas de control, a diferencia de la serie anterior, le implica el desarrollo de un gradiente geotérmico todavía más alto. Tomando en cuenta el espesor de depósito de 1 800 m de la serie, se promedia un gradiente de aproximadamente 44°C/Km.

La diferencia de gradientes geotérmicos existente en estas dos unidades estratigráficas, lo cual está estrechamente relacionado a la distinta conductividad térmica de cada una de ellas, caracteriza la manifestación de un comportamiento de tipo "dog-leg" del gradiente, verticalmente dentro de la cubierta sedimentaria de la sección (ver inciso de transmisión de calor). En el caso específico de estas dos unidades, el alto contraste de conductividades hace bastante notorio dicho comportamiento.

Bajo este marco de temperatura de la sección, la parte media-inferior de la serie Jurásico Superior se llega a ubicar dentro del intervalo de 60-90°C (Fig. 81), delimitado como favorable para la formación de gas húmedo, mientras que la parte más basal de la serie, se encuentra localizada en poco más de los 90°C, en los inicios del intervalo de temperaturas propicias para la formación de hidrocarburos líquidos. La porción correspondiente al Tithoniano, la parte de mayor interés petrolero, se ubica en temperaturas inferiores a los 50°C, dentro del intervalo propio de la formación de gas biogénico.

### Cretácico Temprano

Para la finalización del Cretácico Temprano, con el depósito de la serie Cretácico Inferior, el cual se lleva a cabo con un espesor variable a lo largo de la sección, el marco de temperatura resultante dentro de ésta última, lateralmente manifiesta algunas heterogeneidades de comportamiento, lo cual es más evidente dentro de la unidad Sal, según la distribución que guarda la isoterma de control de 125°C allí definida (Fig. 82).

Este marco de temperaturas se delimita, en alrededor de los 135°C a la base de la cubierta sedimentaria en la mayor parte de la sección, esto es, en la porción de los pozos 1 al 10 y, hacia la porción noreste de ésta, en la zona de los pozos 11 al 13, tiende a disminuir paulatinamente hasta poco menos de los 125°C.

La serie Jurásico Superior, dado el sepultamiento que experimenta, se llega a encontrar en la mayor parte de la sección dentro de un rango de temperaturas que van de los 60 a los 120°C, en donde, dado el más amplio espaciamiento que manifiestan las curvas isotermas de control presentes, comparativamente con el definido para la etapa anterior, se caracteriza con un gradiente geotérmico de alrededor de 37°C/Km, esto con un espesor promedio de 1 600 m. En la porción nororiental de la sección, en la zona de los pozos 12-13, donde no se manifiesta la presencia de la serie Cretácico

Inferior, el Jurásico Superior se encuentra dentro de un rango de temperatura sensiblemente menor, en donde su base no excede los 100°C.

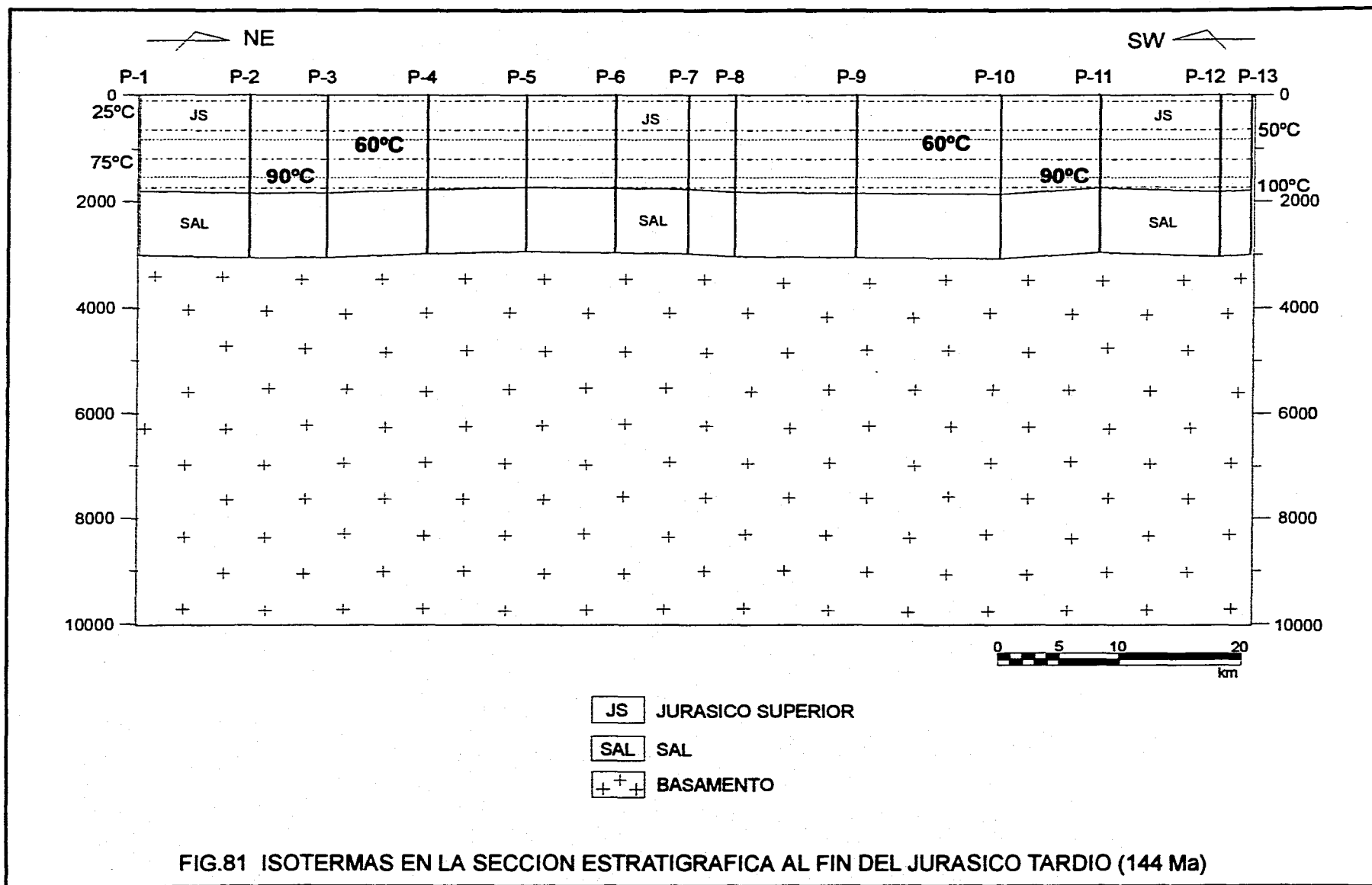
Bajo este marco térmico de referencia, la mitad inferior de la serie Jurásico Superior en la mayor parte de la sección, llega a ubicarse a temperaturas de más de los 90°C, dentro del intervalo propicio para la formación de hidrocarburos líquidos (Fig. 82), excepto en la zona de los pozos 12-13, en donde se mantiene entre los 60 y 90°C, dentro del intervalo favorable para la formación de gas húmedo.

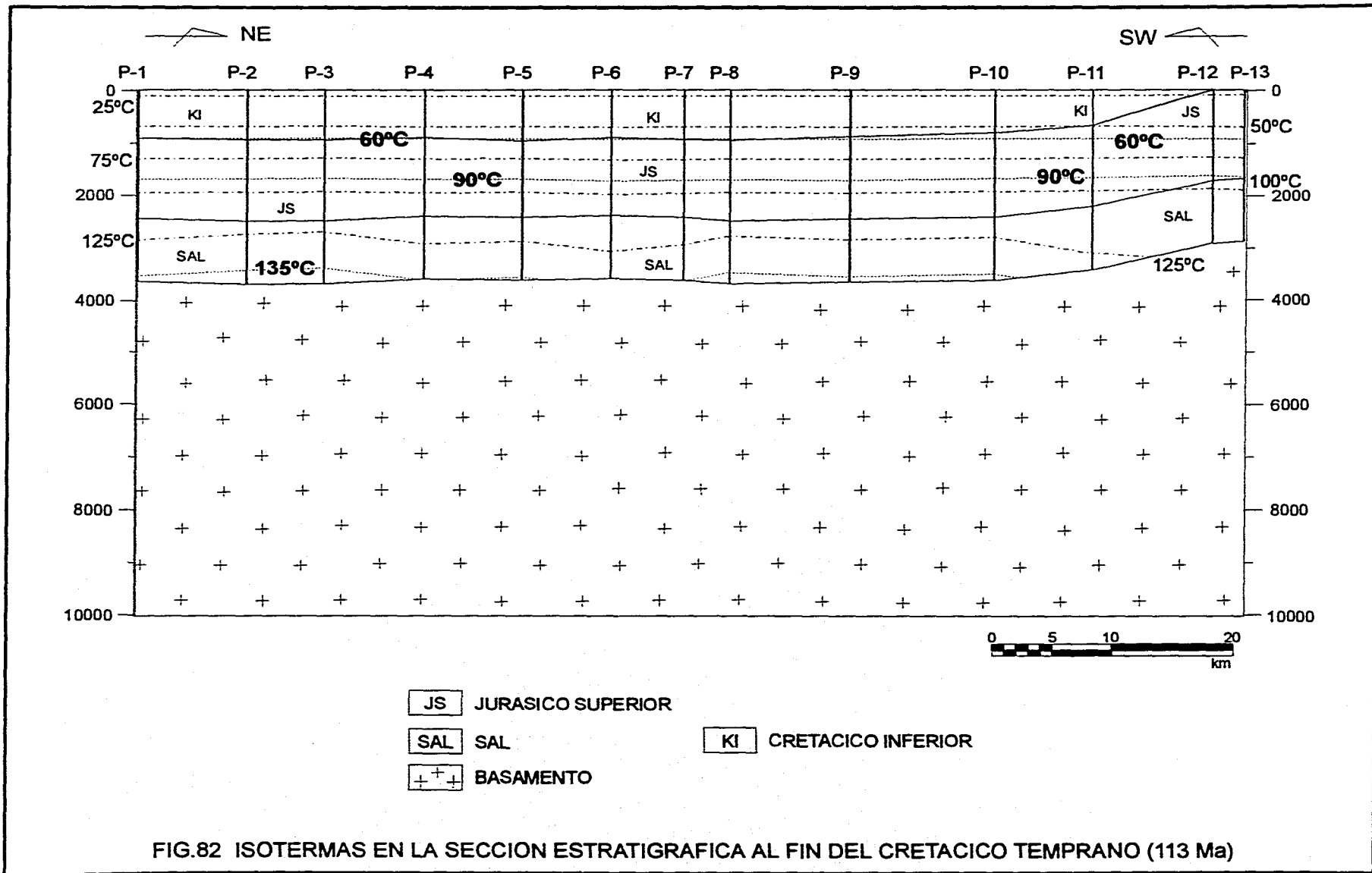
La parte superior de la serie, específicamente el Tithoniano, también en la mayor parte de la sección, pasa a localizarse dentro de este último intervalo de 60-90°C de gas húmedo, y, en el extremo noreste de la sección, continúa bajo temperaturas inferiores a los 60°C, dentro del intervalo de formación de gas biogénico.

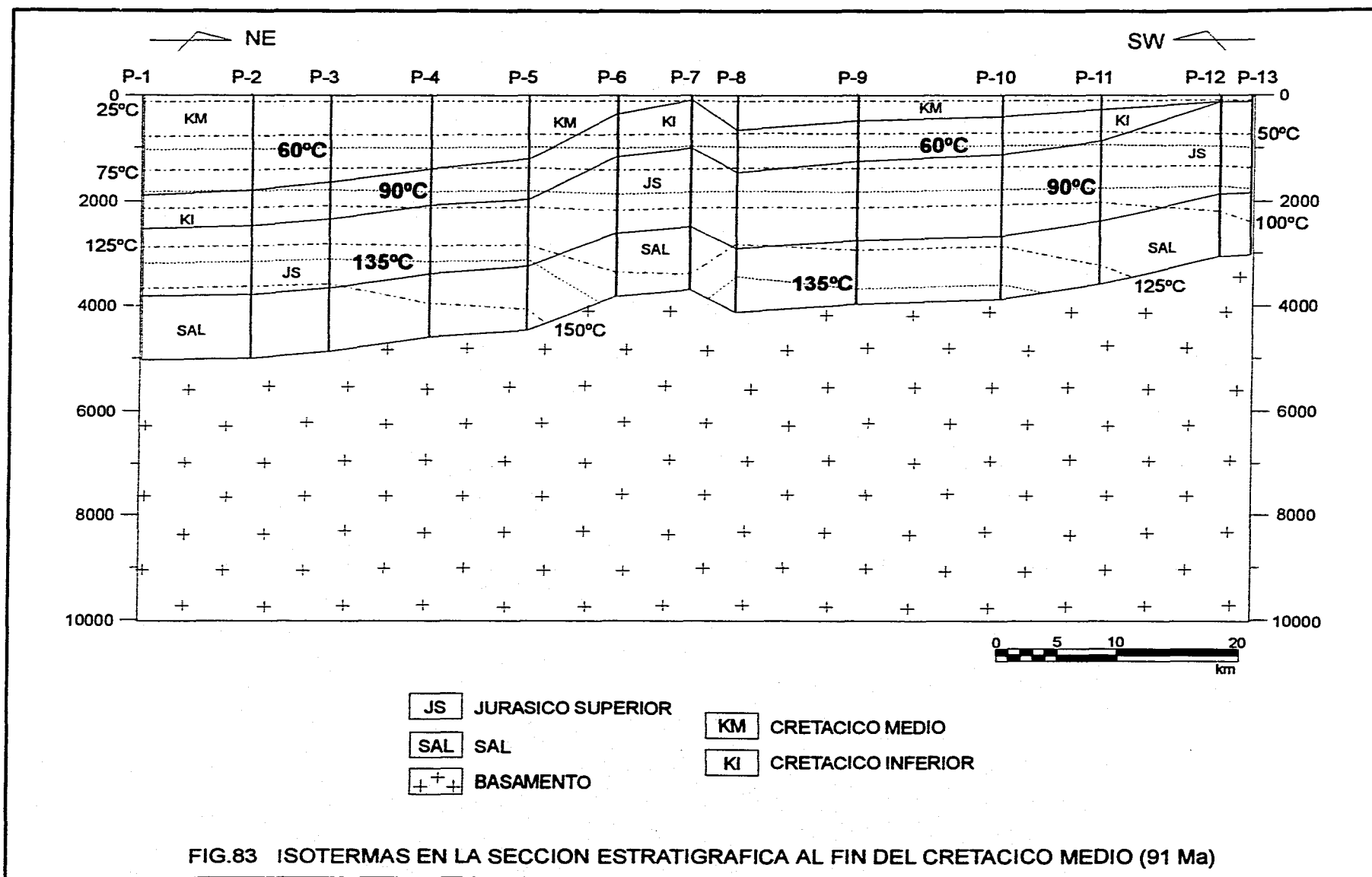
### Cretácico Medio

Para el final del Cretácico Medio, a los 91 Ma aproximadamente, con el depósito de un espesor lateralmente heterogéneo de la serie Cretácico Medio, el marco de temperatura en el que se encuentran las ahora ya cuatro diferentes unidades de la cubierta sedimentaria, varía a lo largo de la sección (Fig. 83).









En la parte suroeste de la sección, el marco de temperatura a la base de la cubierta sedimentaria se manifiesta hasta de poco más de los 170°C (en la zona del Pozo 1). Éste se reduce a alrededor de los 130°C en el área de los pozos 6-7, luego, de aquí se incrementa nuevamente a algo más de los 140°C en la porción del Pozo 8, y desciende por último, hasta los 110°C hacia el extremo noreste de la sección.

El comportamiento que definen las curvas isotermas de control a lo largo de la sección, se mantiene con un carácter más o menos homogéneo cuando se distribuyen exclusivamente dentro de las unidades suprayacentes a la serie Sal. Pero, su comportamiento es notoriamente heterogéneo, cuando lateralmente se distribuyen también dentro de esta última serie, como sucede en las zonas de los pozos 5 al 8 y 10 al 13, en donde las curvas isotermas experimentan un brusco incremento en el espaciamiento que guardan entre sí.

Esto último se debe a que los cambios de unidad a unidad en la cubierta sedimentaria de la sección, y, por lo tanto, de conductividad térmica, además de llevarse a cabo verticalmente como es la manera normal, se manifiestan también de forma lateral, debido a las diferentes posiciones espaciales que éstas unidades guardan, dado el sepultamiento diferencial que han experimentado.

En los dos últimos sectores de la sección que se acaban de mencionar, las zonas de los pozos 5-8 y 10-13, el hecho de que la serie Sal

se encuentre en una posición más somera con respecto a las series estratigráficamente más jóvenes, las que se distribuyen más profundamente sepultadas a los lados de dichas zonas, particularmente hacia la parte sur de éstas, redundan en un drástico incremento de forma lateral de la conductividad térmica, y de ahí el brusco aumento en el espaciamiento de las curvas isotermas. Una respuesta inversa se produce cuando se tiene un descenso lateral abrupto de la conductividad, como en la zona de los pozos 7-8 (Fig. 83), en donde el espaciamiento de las curvas se reduce abruptamente.

Dentro de este marco de referencia, varias curvas isotermas se manifiestan distribuidas de manera discontinua dentro de la serie Jurásico Superior, lo que señala que ésta última se encontraba bajo diferentes temperaturas, según el distinto grado de sepultamiento que ha experimentado.

En la porción suroeste de la sección, la zona de mayor sepultamiento de la serie, ésta se encuentra sometida a las mayores temperaturas, las cuales se definen con un rango que va de 112 a 155°C. Hacia la zona central, el área de los pozos 6 al 8, se presenta dentro de valores menores, los cuales varían de 65 a 115°C y, en la parte noreste, todavía bajo temperaturas aún menores, en un intervalo de 26 a 90°C.

El gradiente geotérmico que caracteriza a la serie Jurásico Superior, en las dos primeras porciones de la sección es de aproximadamente 33°C/Km, mientras que, hacia el extremo

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA TERMICIDAD

---

noreste de la misma, es un poco mayor con 37°C/Km.

El paulatino descenso que a través del tiempo, de una manera general, se registra en los valores de gradiente geotérmico de esta serie, se relaciona con el aumento de la conductividad que ésta última experimenta, debido a la reducción de la porosidad conforme se lleva a cabo su sepultamiento, así como, a la paulatina disminución de los valores de flujo de calor que se considera aconteció durante la etapa post-"rift".

Dentro de este marco de temperatura, en la porción suroccidental de la sección, la zona de los pozos 1 al 5, la parte inferior de la serie Jurásico Superior llega a ubicarse a poco más de los 135°C, dentro del intervalo de temperatura propio de la formación de gas seco, mientras que, el Tithoniano, pasa a encontrarse dentro de las temperaturas de formación de hidrocarburos líquidos entre los 90 y 135°C (Fig. 83).

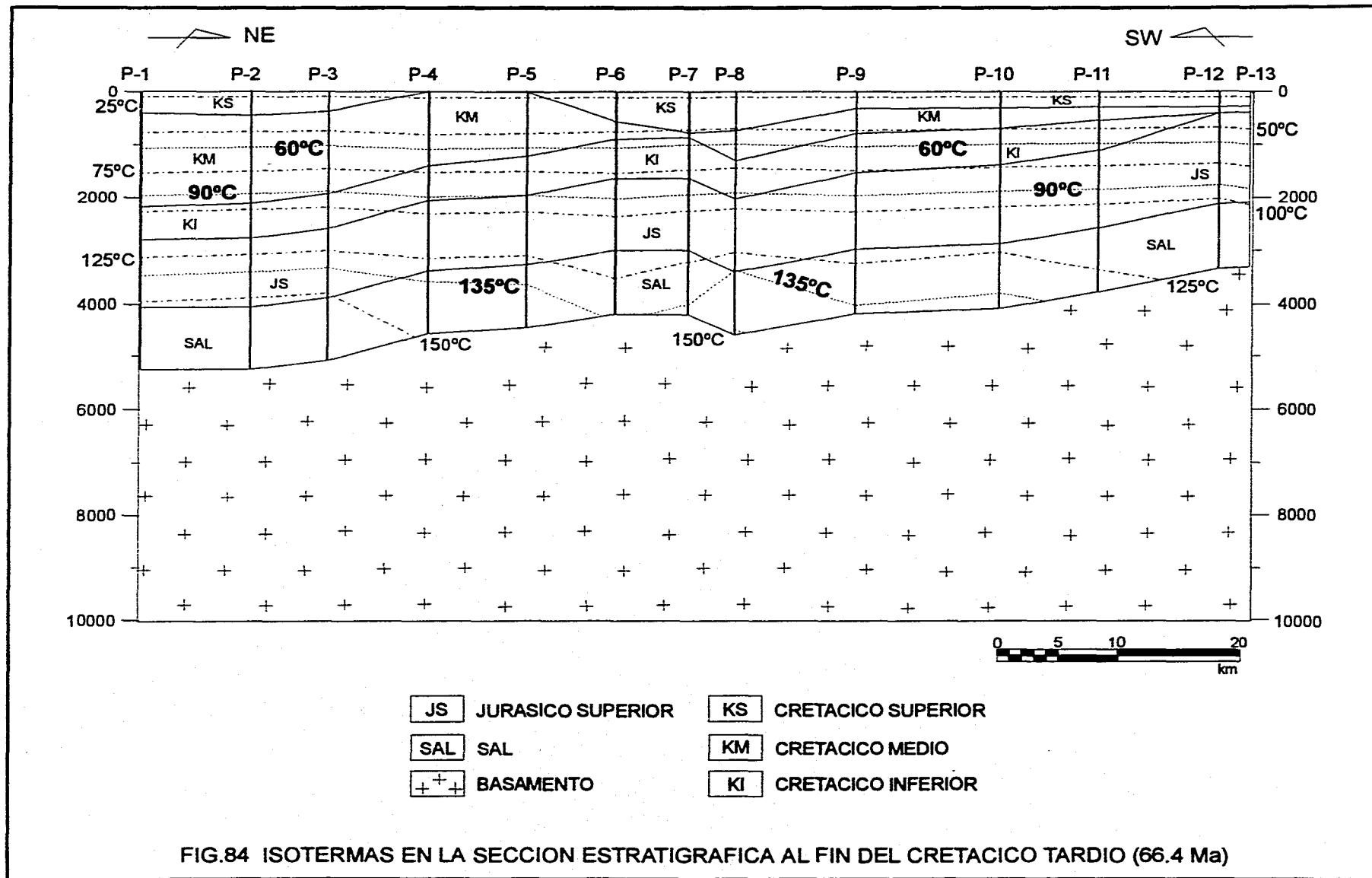
En la zona de los pozos 6 al 11, es la parte inferior de la serie la que se localiza dentro de este último intervalo de temperaturas de formación de hidrocarburos líquidos, manteniéndose de hecho prácticamente en la misma ubicación desde la etapa anterior. La porción del Tithoniano en esta zona por su parte, también como en la etapa anterior, se sigue manteniendo dentro del intervalo de 60 - 90°C, bajo las condiciones de temperatura de formación de gas húmedo.

De la misma manera, hacia el extremo nororiental de la sección, en la porción de los pozos 12-13, la serie Jurásico Superior continúa bajo condiciones térmicas similares a las prevalecientes al final del Cretácico Temprano, la porción inferior de la serie se encuentra dentro del intervalo de temperatura de 60 - 90°C propio de la formación de gas húmedo y, la parte del Tithoniano a temperaturas menores a los 50°C, en el intervalo de formación de gas biogénico.

### Cretácico Tardío

A la finalización del Cretácico Tardío, el marco de temperatura de la sección manifiesta ligeras modificaciones con respecto al marco definido para la etapa anterior. En la porción suroccidental, la base de la cubierta sedimentaria se mantiene en alrededor de los 170°C, en la zona central, el área de los pozos 6 al 8, llega a ubicarse en los 137°C y, hacia el extremo nororiental, se encuentra en aproximadamente 115°C (Fig. 84).

Las curvas isotermas de control a lo largo de la sección, muestran algunas heterogeneidades de comportamiento, lo que indica, que el marco de temperatura varía lateralmente a lo largo de ésta. Dichas variaciones se describen de manera más notoria hacia la zona de los pozos 4 y 5, y en el extremo noreste de la sección.



## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA TERMICIDAD

---

En la serie Jurásico Superior, se distribuyen hasta cinco curvas isotermas a lo largo de la sección, lo que indica, que se encuentra dentro de varios niveles de temperatura. Esta serie se presenta dentro de los valores más altos en la zona en donde alcanza el mayor sepultamiento, esto es, en la porción suroeste de la sección, en donde se ubica dentro del intervalo de los 117 a 155°C.

Hacia la porción central, en la zona de los pozos 6 y 7, la serie se ubica dentro de un rango de temperatura menor, esto es, entre 80 y 120°C, mientras que, en el área en donde se encuentra distribuida más someramente, en el extremo nororiental de la sección, se tiene dentro de 40 a 100°C.

El gradiente geotérmico que ahora se manifiesta presente en la serie, en la mayor parte de la sección se promedia en 30°C/Km, aunque, para el extremo noreste, se marca con un carácter sensiblemente más alto, 36°C/Km.

Bajo este marco térmico, la parte inferior de la serie Jurásico Superior se mantiene dentro del intervalo de temperatura de formación de gas seco sólo en la zona de los pozos 1 al 3, a poco más de 135°C, ya que, en la porción de los pozos 4 y 5 se sale de este intervalo, al que había ingresado en la etapa anterior, y regresa al de temperatura de 90 - 135°C. La parte del Tithoniano en estas dos zonas mencionadas, se mantiene dentro de este último intervalo de temperatura de formación de hidrocarburos líquidos.

En la zona de los pozos 6 al 11, la misma parte inferior de la serie, también continúa dentro de las temperaturas de 90 - 135°C de formación de hidrocarburos líquidos, intervalo al cual ingresa la parte del Tithoniano en la zona del Pozo 8 y, la parte basal del Jurásico Superior en la porción de los pozos 12 y 13.

La parte del Tithoniano en las zonas de los pozos 6 -7 y 9 - 11, así como la parte media de la serie Jurásico Superior en la porción de los pozos 12 - 13, se mantienen dentro del intervalo de 60 - 90°C de formación de gas húmedo. El Tithoniano en esta última porción, continúa ubicada a menos de 60°C, dentro del rango de temperatura de formación de gas biogénico.

### Paleoceno

Con el depósito de la serie Paleoceno, el marco de temperatura presente en la sección a los 57.8 Ma (Fig. 85), comparativamente con el marco prevaliente al final del Cretácico Tardío, se modifica de manera ligeramente más apreciable, sólo prácticamente hacia la porción nororiental de la sección, en la zona de los pozos 6 al 13, que es el área en la que se registrar el mayor espesor acumulado de la serie.

Así, en la porción suroccidental de la sección, la base de la cubierta sedimentaria se ubica dentro de una temperatura de poco más de los 170°C. En la zona entre los pozos 4 al 10 se

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA TERMICIDAD

---

encuentra en alrededor de los 150°C, marcándose una temperatura mínima de 142°C en la localidad del Pozo 5 y una máxima de 155°C en el Pozo 8. Hacia la porción noreste de la sección por su parte, se presenta dentro de una temperatura todavía menor, la cual es de aproximadamente 128°C.

El comportamiento de las curvas isotermas de control a lo largo de la sección, es de carácter sensiblemente heterogéneo, observándose el desarrollo de ligeros incrementos del espaciamiento que entre ellas se guarda, en la porción de los pozos 3 al 6, así como en la zona de los pozos 12 y 13.

La serie Jurásico Superior continúa estando ubicada dentro diferentes valores de temperatura a lo largo de la sección. En la parte suroeste de ésta, se encuentra dentro del rango más alto, este es de 120 a 150°C; en la porción central, de los pozos 4 al 11, se presenta dentro de un rango menor que va en promedio de 90 a 130°C y, en el extremo noreste en las temperaturas más bajas, entre 65 y 115°C.

Los gradientes geotérmicos que se caracterizan presentes dentro de la serie, se promedian en 30°C/Km en la parte suroeste y media de la sección, y de 33°C/Km en la porción noreste, que es la zona de ocurrencia más somera de la serie y de menor compactación por sepultamiento.

Bajo este marco de temperatura, la serie Jurásico Superior, en la porción suroccidental de la sección, la zona de los pozos 1 al 4,

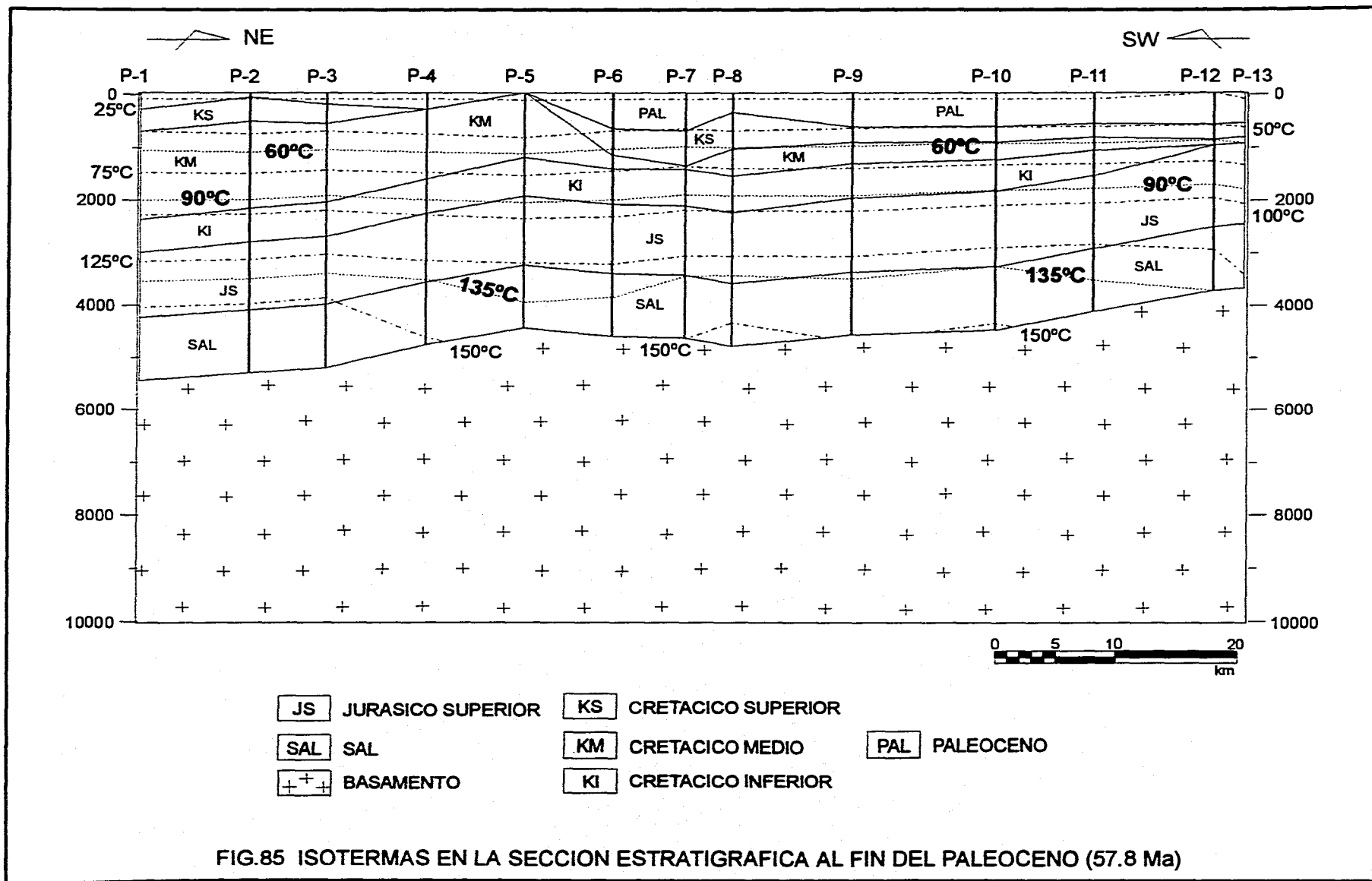
prácticamente se mantiene bajo la misma situación que al finalizar el Cretácico Tardío, es decir, la porción inferior, dentro del intervalo de temperatura que excede los 135°C propicio para la formación de gas seco, y la porción superior, incluyendo el Tithoniano, dentro de los 90 - 135°C propicios para la formación de los hidrocarburos líquidos (Fig. 85). En el área de los pozos 4 al 10, el Tithoniano se integra a este último intervalo de temperatura, quedando solamente un pequeño remanente de éste dentro del rango de temperatura de formación de gas húmedo en la porción del Pozo 5.

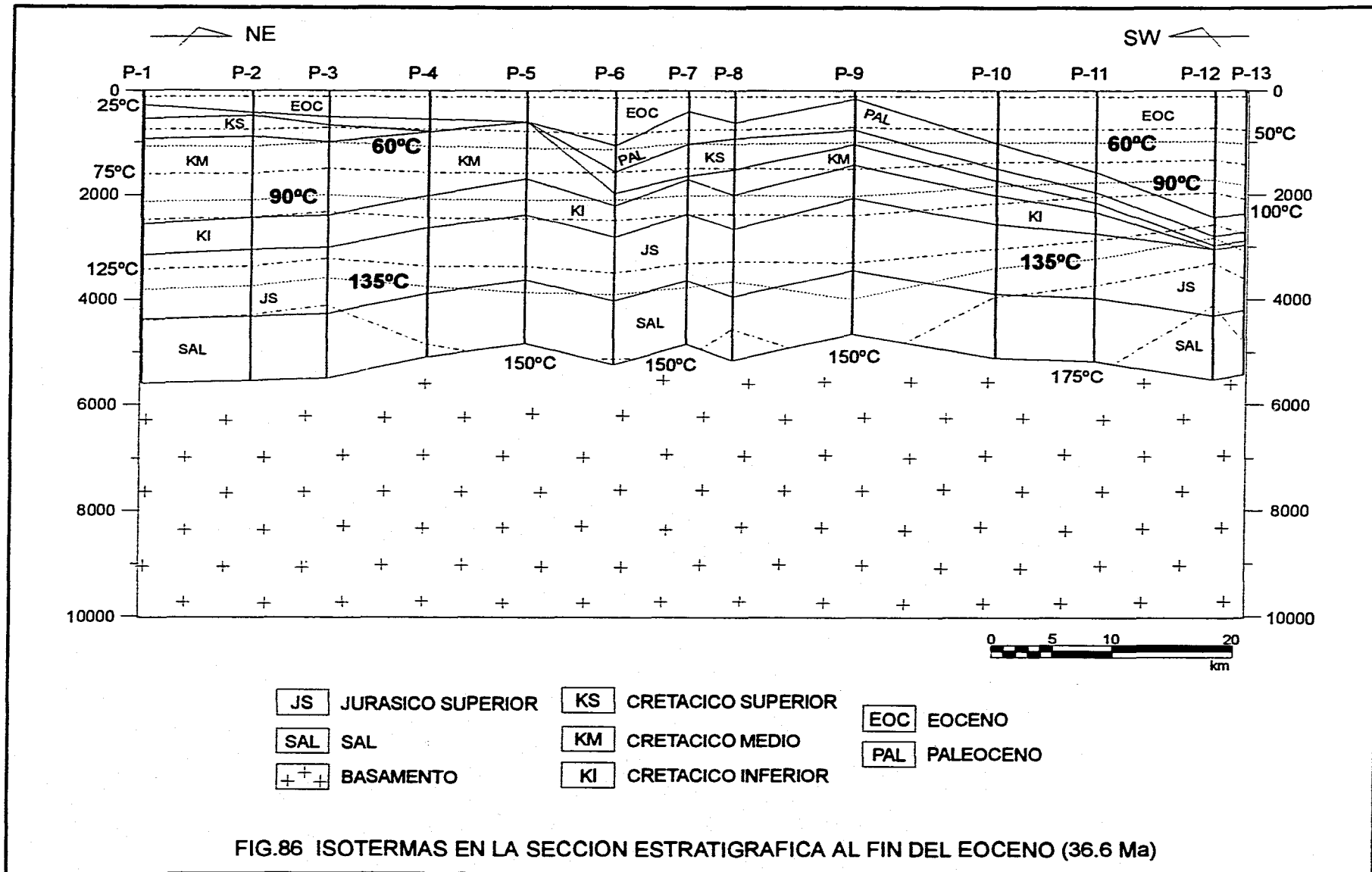
En el extremo nororiental de la sección, en el área de los pozos 11 al 13, la parte media de la serie pasa también a ubicarse dentro del intervalo de temperatura de formación de hidrocarburos líquidos, mientras que la parte del Tithoniano queda por completo dentro del rango de los 60 - 90°C de gas húmedo.

### Eoceno

Para la finalización del Eoceno a los 36.6 Ma, dados los espesores de depósito de la serie Eoceno, el marco de temperatura de la sección, respecto al del Paleoceno, se modifica considerablemente en su porción nororiental, en donde se manifiesta un notable incremento del rango de temperatura dentro del cual se llega a encontrar la cubierta sedimentaria (Fig. 86).







En las porciones suroccidental y central de la sección, por su parte, aunque prácticamente no se manifiestan modificaciones de importancia, sí, de una manera general, se puede calificar que registran un ligero descenso de la temperatura límite a la base de la cubierta sedimentaria respecto a la prevaleciente al finalizar la etapa anterior. Particularmente, en la primera de estas dos porciones, en la zona de los pozos 1 al 3, en donde se marca una temperatura de aproximadamente 163°C, mientras que, en la segunda, en la parte comprendida entre los pozos 4 al 9, ésta oscila en alrededor de los 150°C.

En el sector nororiental de la sección, delimitado a partir del Pozo 10 y hasta el extremo final de la misma, el marco de temperatura se incrementa notablemente, llegando a alcanzar poco más de los 195°C en la zona del Pozo 12. Los valores en esta última zona, representan una ampliación del rango de temperatura del orden de los 60°C, con respecto a las condiciones allí prevalecientes durante el Paleoceno.

El comportamiento de las curvas isotermas de control a lo largo de la sección es de carácter sensiblemente heterogéneo. De manera general, desde ambos extremos de la sección hacia la zona de central de ésta, la porción de los pozos 4 al 6 y 9, se les caracteriza con el desarrollo de un ligero aumento del espaciamiento que se guarda entre ellas. Esto es más evidente desde la parte nororiental, ya que ahí, dicho espaciamiento es relativamente más apretado, indicativo del área de la sección con un mayor gradiente geotérmico.

Dentro de este marco térmico de referencia, la serie Jurásico Superior se encuentra en el rango de temperatura relativamente más frío en la porción central de la sección, la zona de los pozos 5 al 9, con valores entre 93 y 140°C. En la parte suroccidental, se ubica dentro de una temperatura que varía de 117 a 150°C y, en la zona noreste, bajo una temperatura cada vez mayor, cuyo intervalo más alto se define en la localidad del Pozo 12, con valores entre 140 y 176°C.

El gradiente geotérmico que así manifiesta en esta serie, en los dos primeros sectores anteriores se promedia en alrededor de 26°C/Km, mientras que en la porción nororiental, éste alcanza hasta un valor de aproximadamente 30°C/Km.

Bajo este marco térmico de referencia, en la porción central de la sección, en el área de los pozos 4 al 9, prácticamente la totalidad de la serie Jurásico Superior, se sigue manifestando dentro del intervalo de temperatura de 90-135°C de formación de hidrocarburos líquidos, con la parte más basal de la serie dentro de temperaturas de formación de gas seco en los pozos 4, 6 y 8 (Fig. 86).

En el sector suroccidental de la sección, la zona de los pozos 1 al 3, la parte inferior de la serie es la que se encuentra dentro de éstas últimas temperaturas de formación de gas seco, mientras que la parte del Tithoniano se ubica en las del intervalo de formación de hidrocarburos líquidos.

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA TERMICIDAD

---

En la porción nororiental, por su parte, la porción inferior de la serie Jurásico Superior, en el área de los pozos 10 al 11, y la totalidad de ésta serie en la zona de los pozos 12 al 13, pasan a ubicarse bruscamente dentro del intervalo térmico de condiciones de formación de gas seco.

### Oligoceno

Con el depósito de la serie Oligoceno, el marco de temperatura de la cubierta sedimentaria de la sección experimenta pocos cambios con respecto al de la etapa anterior. De una manera general, su rango aumenta ligeramente unos pocos grados, aunque en la zona central, la zona de los pozos 6 al 8, se manifiesta un fenómeno contrario, ya que disminuye (Fig. 87).

En la porción suroeste de la sección, de los pozos 1 al 3, la base de la columna sedimentaria se ubica en alrededor de los 165°C, a partir del Pozo 4 y hasta el Pozo 7, se localiza dentro de una temperatura cada vez menor, encontrándose en esta última localidad hasta en 136°C. Desde aquí y hasta el Pozo 12, el marco de temperatura se amplía hasta aproximadamente los 200°C.

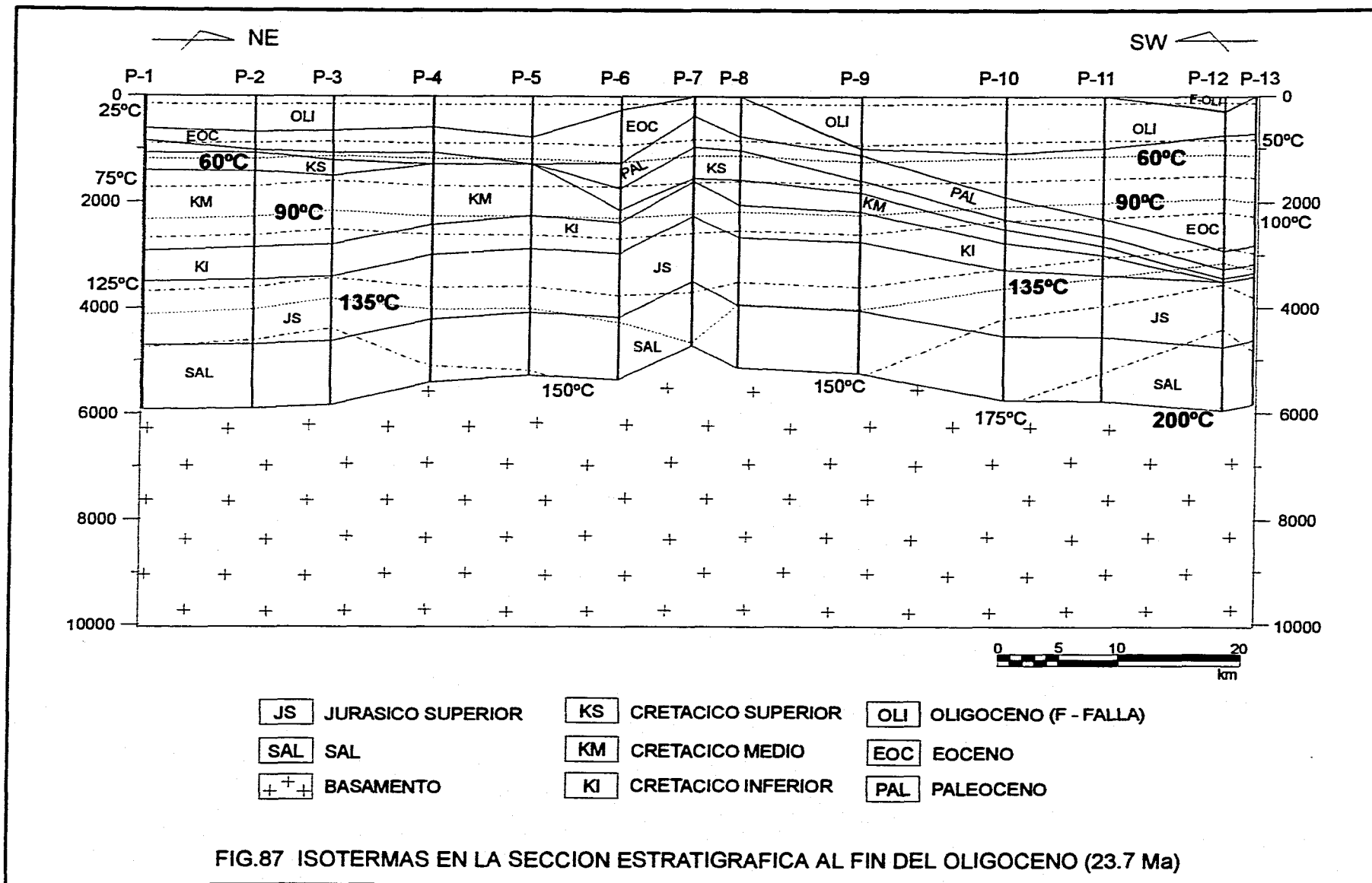
De una manera general, las curvas isotermas de control que se esquematizan en la sección, muestran un comportamiento marcadamente más espaciado en las partes suroeste y central

(la zona comprendida entre los pozos 1 al 10), que en la porción nororiental. Este comportamiento caracteriza a ésta última parte, como la zona de la sección con un mayor gradiente geotérmico; por el contrario, la región de menor gradiente se delimita en la porción de los pozos 4 al 7.

Dentro de este marco de referencia, la serie Jurásico Superior se ubica entre 120 y 150°C en la zona de los pozos 1 al 3. De este punto y hasta el Pozo 7, se encuentra dentro de un rango cada vez menor, que en esta última localidad se marca de 90 a 120°C. De aquí y hasta el Pozo 12, nuevamente se presenta dentro de temperaturas cada vez más altas, siendo el rango máximo de 150 a 180°C.

El gradiente geotérmico en dicha serie, se promedia en alrededor de 25°C/Km hasta el Pozo 10, y después de éste punto, en el sector noreste de la sección, con un valor promedio de 30°C/Km.

Bajo este marco térmico, en la porción central de la sección, la zona de los pozos 5 al 9, toda la serie Jurásico Superior continúa ubicada dentro del intervalo de 90-135°C de formación de hidrocarburos líquidos, de hecho la parte basal de la serie en los pozos 6 y 8, reingresan a este rango después de haber estado en la etapa anterior dentro de las temperaturas de formación de gas seco (ver Figs. 86 y 87). La parte del Tithoniano en las zonas de los pozos 1 al 4 y 10, permanece también dentro de este mismo intervalo térmico.



En estas zonas de los pozos 1 al 4 y 10, la porción inferior de la serie se mantiene ubicada dentro del rango mayor a los 135°C en las condiciones de formación de gas seco. Bajo esta misma situación, pero la totalidad de la serie, se encuentra en el área de los pozos 11 al 13.

### Mioceno

Para el tiempo de los 5.3 Ma, a la finalización de la acumulación de la serie Mioceno, el marco de temperatura de la sección se modifica ostensiblemente con respecto al prevaleciente en la etapa anterior.

En la zona de los pozos 2 y 3, la base de la cubierta sedimentaria de la sección se ubica en los 200°C (Fig. 88), de aquí a la zona del Pozo 5, pasa a una temperatura de 150°C, luego, hacia la porción del Pozo 9, nuevamente se ubica en alrededor de los 200°C, temperatura alrededor de la cual se mantiene hasta el extremo noreste de la sección.

En esta última porción, llama la atención el hecho de que este marco térmico de alta temperatura se desarrolla aún cuando esta parte constituye una de las porciones relativamente más someras de la sección, lo que la caracteriza como la zona con mayor gradiente geotérmico, como lo indica el relativamente menor espaciamiento que guardan entre sí las curvas isotermas, comparativamente con el que se manifiesta

en la porción restante. Los gradientes geotérmicos más bajos, ocurren en la zona de los pozos 4 al 7.

Así, en la porción suroccidental de la sección, de los pozos 1 al 3, la serie Jurásico Superior se ubica dentro de un rango máximo de temperatura de 163 a 186°C; de aquí y hacia la localidad del Pozo 5, se encuentra cada vez dentro de un intervalo menor, el cual culmina en este último punto entre 110 y 135°C. En dirección al Pozo 9 nuevamente se presenta en un rango de temperatura cada vez mayor, que allí se marca entre 168 y 187°C; luego, hacia el Pozo 11 este rango disminuye hasta 143-171°C. En el Pozo 12 se ubica dentro del intervalo de temperatura mayor de la sección, que se cuantifica de 165 a 196°C.

El gradiente geotérmico promedio con que se caracteriza la serie en la sección, del Pozo 1 hasta el Pozo 10, es de 21°C/Km, mientras que, en el extremo nororiental, de los pozos 11 al 13, éste se promedia sensiblemente más alto, en 24°C/Km.

Así, en las áreas de los pozos 1 al 3 y del 8 al 13, toda la serie Jurásico Superior se encuentra ubicada dentro del intervalo de temperatura de formación de gas seco entre 135 - 200°C (Fig.88). Por otro lado, en el área de los pozos 4 al 6, la parte del Tithoniano, permanece dentro del intervalo de 90 - 135°C de formación de hidrocarburos líquidos, mientras que, la porción inferior ingresa a las temperaturas de condiciones de formación de gas seco al sobrepasar los 135°C.

## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA TERMICIDAD

---

### Plioceno

Al final del depósito de la serie Plioceno, el marco de temperatura de la cubierta sedimentaria de la sección se incrementa ligeramente a todo lo largo de ésta última de manera más o menos homogénea, respecto a la de etapa anterior.

En el sector suroccidental, se extiende hasta una temperatura un poco mayor a los 200°C; y de aquí hacia los pozos 5 y 6, se reduce paulatinamente hasta aproximadamente los 155°C (Fig. 89). Hacia el sector de los pozos 9 y 10, la base de la cubierta sedimentaria se ubica nuevamente dentro de una temperatura algo mayor a los 200°C, pasando a un nivel un poco menor en la zona del Pozo 11, para después, hacia el Pozo 12, volver a ubicarse en algo más de los 200°C.

La distribución que guardan las curvas isotermas de control en la sección, es de carácter heterogéneo, y señala a la zona de los pozos 4 al 7 como la región con un menor gradiente geotérmico, dado el mayor espaciamiento que entre ellas se define. En la porción noreste de la sección, por el contrario, este espaciamiento es más reducido, lo que la califica como el sector con un mayor gradiente geotérmico.

Con esto, para el tiempo de hace 1.6 Ma, la serie Jurásico Superior se distribuye a lo largo de la sección dentro de distintos niveles de temperatura. En la porción de los pozos 1 al 3 se ubica en un intervalo máximo de entre

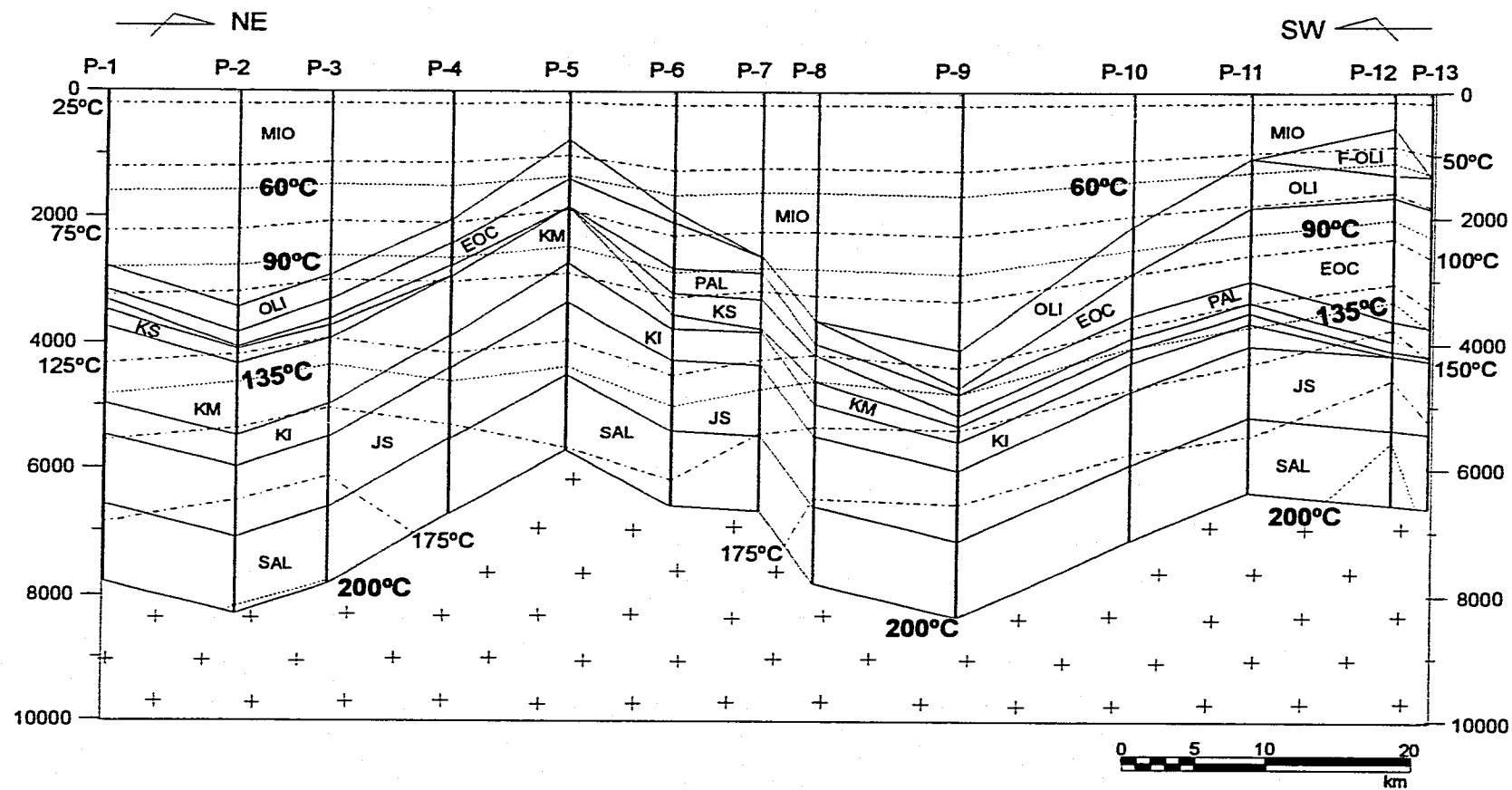
165 a 190°C, de aquí pasa al rango menor en el que se encuentra, en la zona de los pozos 4 al 7, con 121 a 142°C en el Pozo 5. Hacia la porción de los pozos 8 al 10, nuevamente pasa a un rango de mayor temperatura, el cual, en el Pozo 9 es de entre 168 a 191°C; luego, disminuye ligeramente en la zona del Pozo 11 de 146-172°C, para después, en el Pozo 12, ubicarse en el rango máximo de 173-201°C.

El gradiente geotérmico con que se caracteriza individualmente a dicha serie Jurásico Superior dentro de la cubierta sedimentaria, se promedia en alrededor de 18°C/Km en el sector de los pozos 1 al 10, mientras que, en la porción restante de la sección, se estima en 22°C/Km.

Bajo este marco térmico, de manera bastante similar a la etapa anterior, una gran parte de la serie se encuentra ubicada dentro del intervalo de 135 - 200°C de formación de gas seco, y, sólo la parte del Tithoniano en el área de los pozos 4 al 7, se mantiene dentro del rango de 90 - 135°C de formación de hidrocarburos líquidos.

### Época Actual

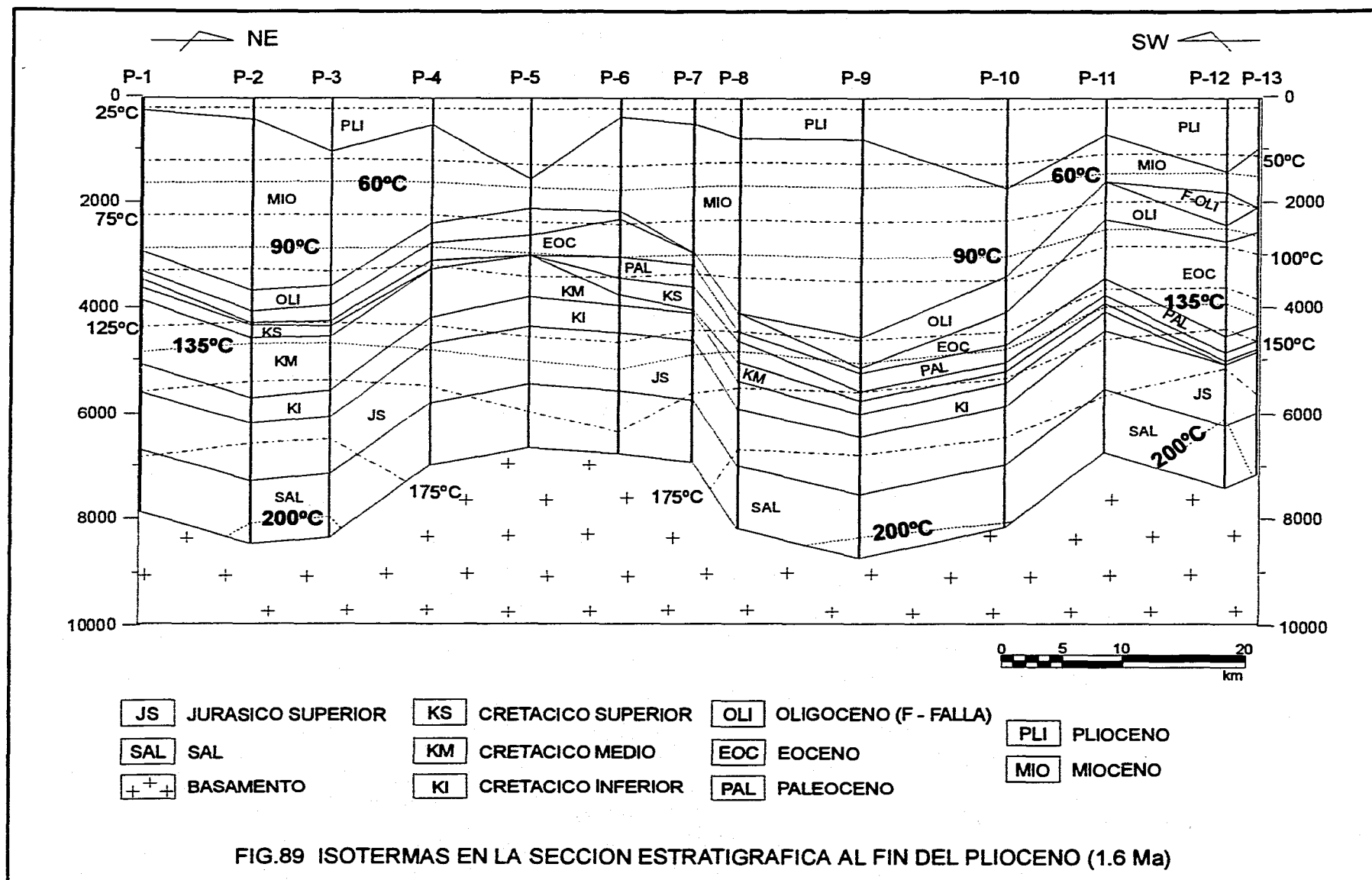
En la época actual, ya con el depósito de la serie Pleistoceno, el marco de temperatura de la cubierta sedimentaria de la sección se modifica un poco más notoriamente con respecto al de la etapa anterior, hacia la porción noreste, en la zona de los pozos 10 y 12, que es donde se registra el mayor espesor de la serie (Fig. 90).

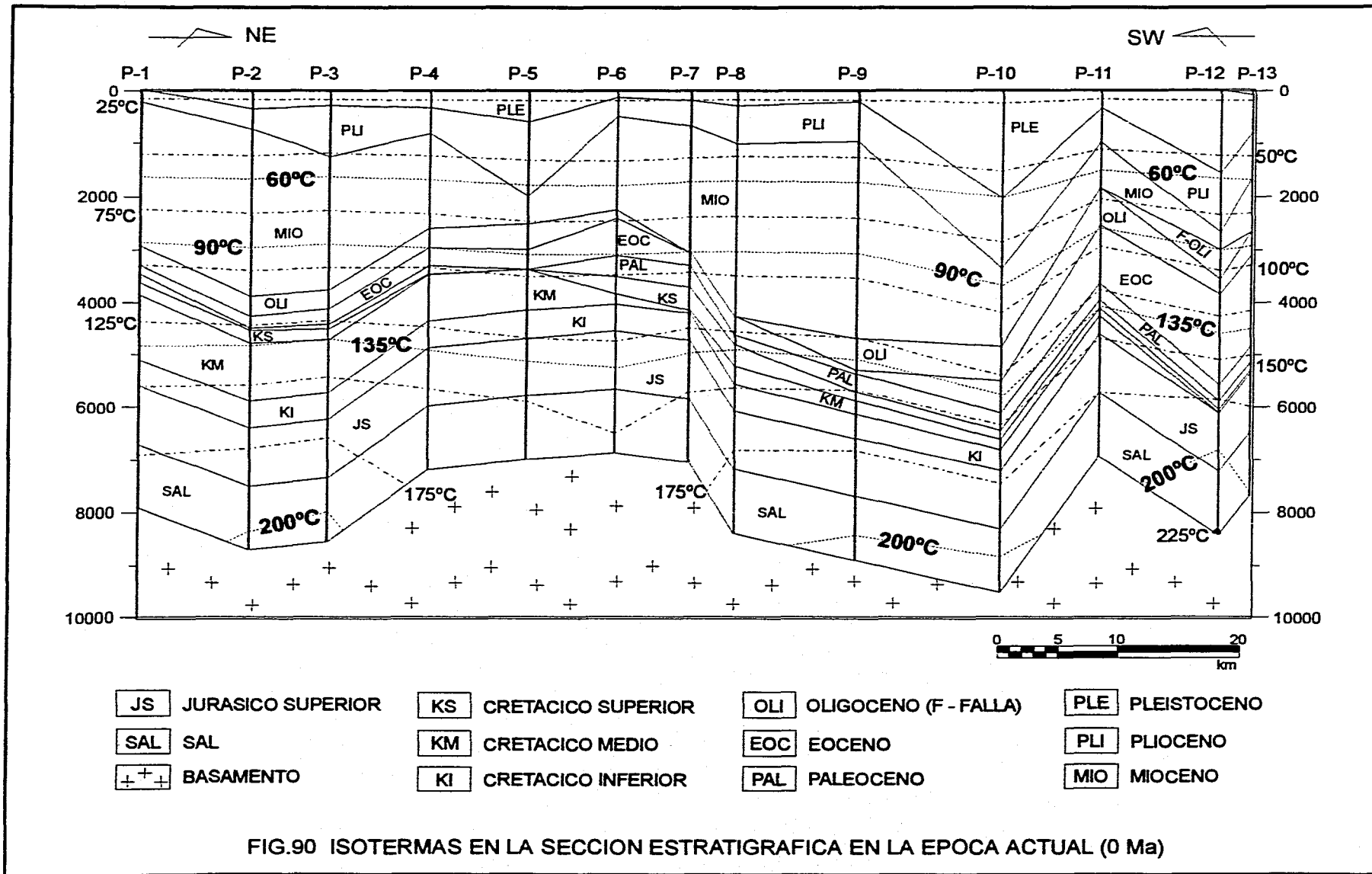


- |     |                   |    |                    |     |                       |
|-----|-------------------|----|--------------------|-----|-----------------------|
| JS  | JURASICO SUPERIOR | KS | CRETACICO SUPERIOR | OLI | OLIGOCENO (F - FALLA) |
| SAL | SAL               | KM | CRETACICO MEDIO    | EOC | EOCENO                |
| +   | BASAMENTO         | KI | CRETACICO INFERIOR | PAL | PALEOCENO             |
|     |                   |    |                    | MIO | MIOCENO               |

FIG.88 ISOTERMAS EN LA SECCION ESTRATIGRAFICA AL FIN DEL MIOCENO (5.3 Ma)







## ANÁLISIS Y MODELADO DE LA TERMICIDAD

---

En tres zonas de la sección, la base de la cubierta sedimentaria se encuentra localizada dentro de una temperatura mayor a los 200°C, éstas son, las áreas de los pozos 2 a 3, 9 a 10 y 12. En las dos primeras se marca ubicada a alrededor de los 205°C, mientras que en la última se tiene presente hasta los 225°C, siendo con esto el lugar de rango más amplio del marco de temperatura de la sección. En la zona de los pozos 4 al 7, la base de la cubierta sedimentaria se encuentra dentro de la menor temperatura, que en la localidad del Pozo 6 se marca en 159°C.

La distribución de las curvas isotermas dentro de la sección, guardan un comportamiento lateralmente heterogéneo, ya que se describen con un mayor espaciamiento entre ellas en las zonas de los pozos 5 al 7 y 9 al 10, definiendo, por lo tanto, las porciones de la sección con un menor gradiente geotérmico. Con un espaciamiento más angosto, se presentan en el área de los pozos 11 al 13, calificándola como la región con un mayor gradiente geotérmico.

Bajo este marco de referencia, la serie Jurásico Superior se ubica en varios niveles de temperatura dentro de la sección. En la zona del Pozo 1 se presenta entre los 150-172°C, hacia la porción de los pozos 2 al 3 pasa a un rango mayor de 167-190°C. De aquí al área de los pozos 5 al 6 tiende a distribuirse dentro de una menor temperatura, que en esos puntos se marca particularmente entre 122 y 142°C. Hacia la zona de los pozos 9 al 10, la serie vuelve a ubicarse en un rango de temperatura relativamente más alto, que se marca entre

169 y 191°C. En el área del Pozo 12, se localiza en el intervalo de temperatura más alto de la sección, entre 183 y 210°C.

El gradiente geotérmico con que se caracteriza particularmente la serie, prácticamente se mantiene sin cambio respecto a la etapa anterior. En la zona de los pozos 1 al 10 se promedia en alrededor de los 18°C/Km, mientras que en la porción restante de la sección, el sector noreste, se promedia en aproximadamente 22°C/Km.

Bajo este marco térmico, de manera muy similar a la etapa anterior, la mayor parte de la serie Jurásico Superior se ubica dentro del intervalo de 135 - 200°C de formación de gas seco, y sólo la porción más basal de ésta, en el área del Pozo 12, se encuentra en los inicios de las condiciones desfavorables a este respecto al sobrepasarse los 200°C (Fig. 90). En el área de los pozos 4 al 7, la parte del Tithoniano sigue dentro del intervalo de 90 - 135°C de formación de hidrocarburos líquidos.

En las Figuras 91 a 94, de una manera resumida se muestran las temperaturas dentro de las que se ha ubicado la serie Jurásico Superior a lo largo de la sección a través del tiempo bajo el marco de la historia térmica aquí considerada. En las dos primeras figuras se encuentran referidas, tanto en planta como en tercera dimensión, respectivamente, las temperaturas que se alcanzan hacia la base de la serie (Figs. 91 y 92), mientras que, en las dos figuras siguientes, de la misma manera, se muestran las temperaturas presentes en la cima de la serie (Figs. 93 y 94).

## ANALISIS Y MODELADO DE LA TERMICIDAD

---

De aquí se puede ver que, de una manera generalizada, la base de la serie Jurásico Superior ingresa al rango de temperatura de 60 a 90°C de formación de gas húmedo, antes de que termine de depositarse y, para cuando esto último acontece, pasa ya al intervalo de 90 a 135°C de formación de hidrocarburos líquidos. Por su parte, la cima de la serie, y por lo tanto, la parte del Tithoniano, ingresa a estos intervalos de temperatura de forma diacrónica, es decir, en diferentes tiempos; al intervalo de temperatura de 60 a 90°C primero ingresa el sector de los pozos 1 al 10 a la finalización del Cretácico Temprano y, después, el de los pozos 10 al 13 durante el Cretácico Tardío, mientras que, al intervalo de temperatura de 90 a 135°C lo hace primero el sector de los pozos 1 al 5 durante el Cretácico Medio y, el de los pozos 6 al 13 durante el Paleoceno.

De esta manera, el Tithoniano permanece dentro del intervalo de temperatura de 90 a 135°C hasta el Eoceno Temprano en el sector de los pozos 12 al 13 y, hasta el Mioceno Medio en los sectores de los pozos 1 al 3 y del 8 al 11, cuando ingresa al intervalo de más de 135°C de formación de gas seco en donde se encuentra en la actualidad. La zona de los pozos 4 al 7, en el tiempo actual, se mantiene dentro del intervalo de temperatura de formación de hidrocarburos líquidos.

Este marco térmico aquí estimado, excede de manera importante el considerado por otros autores (Sosa y Hegre, 1994 y Sosa P. A. A., 1994, entre otros), por lo que su análisis en relación a indicadores térmicos, una etapa metodológicamente subsecuente, es necesaria para realizar su calibración.

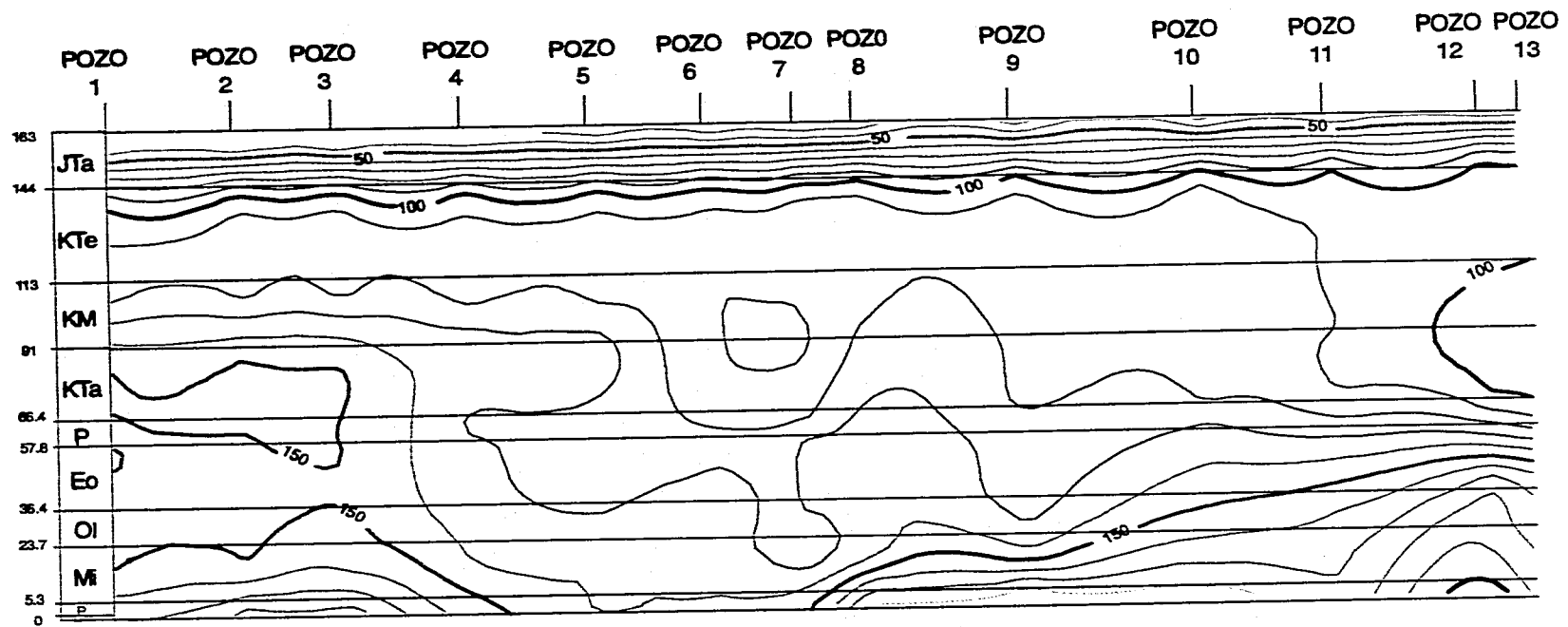
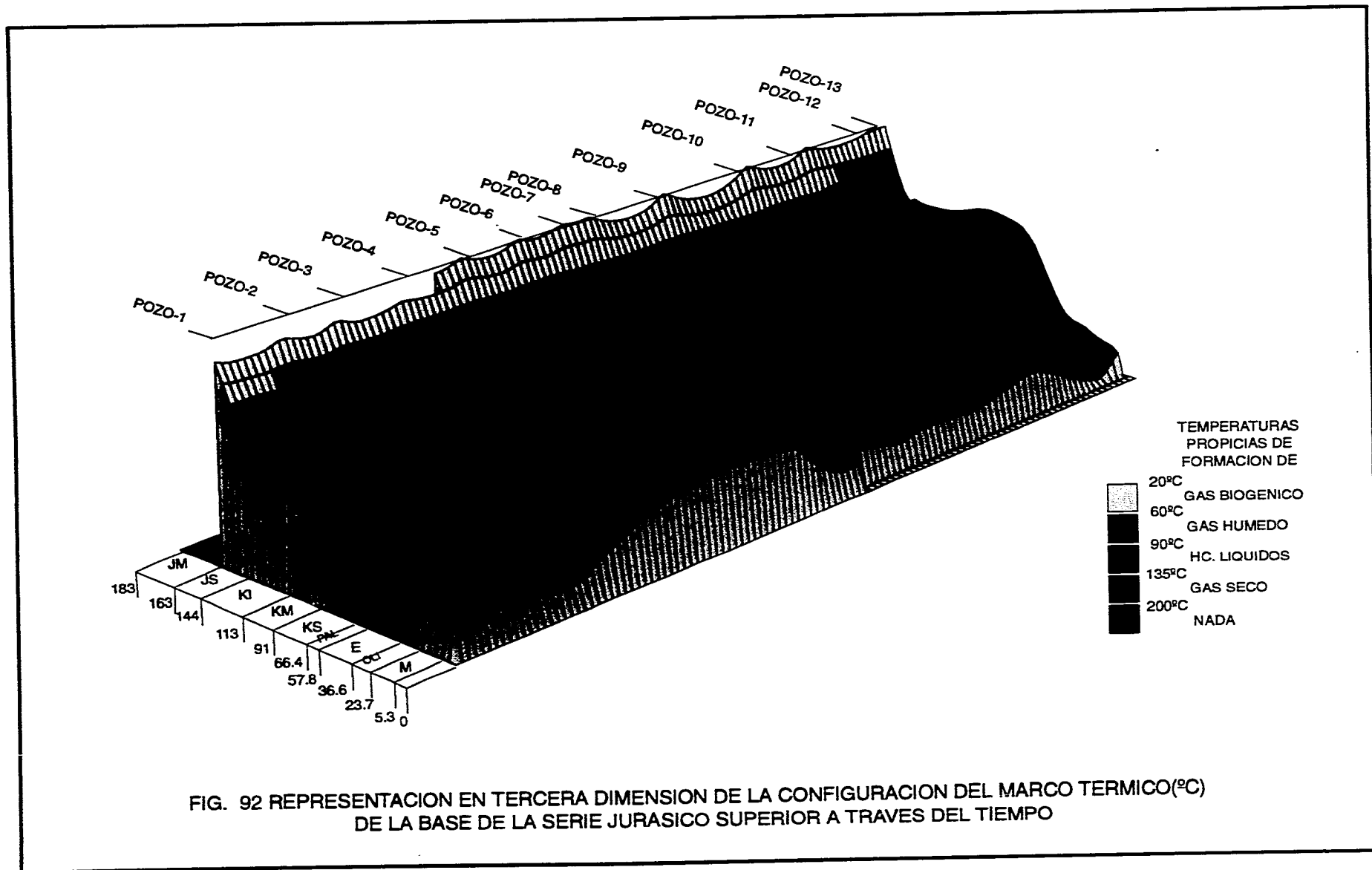


FIG. 91 CONFIGURACION DEL MARCO DE TEMPERATURA (°C) DE LA BASE DE LA SERIE JURASICO SUPERIOR EN LA SECCION A TRAVES DEL TIEMPO



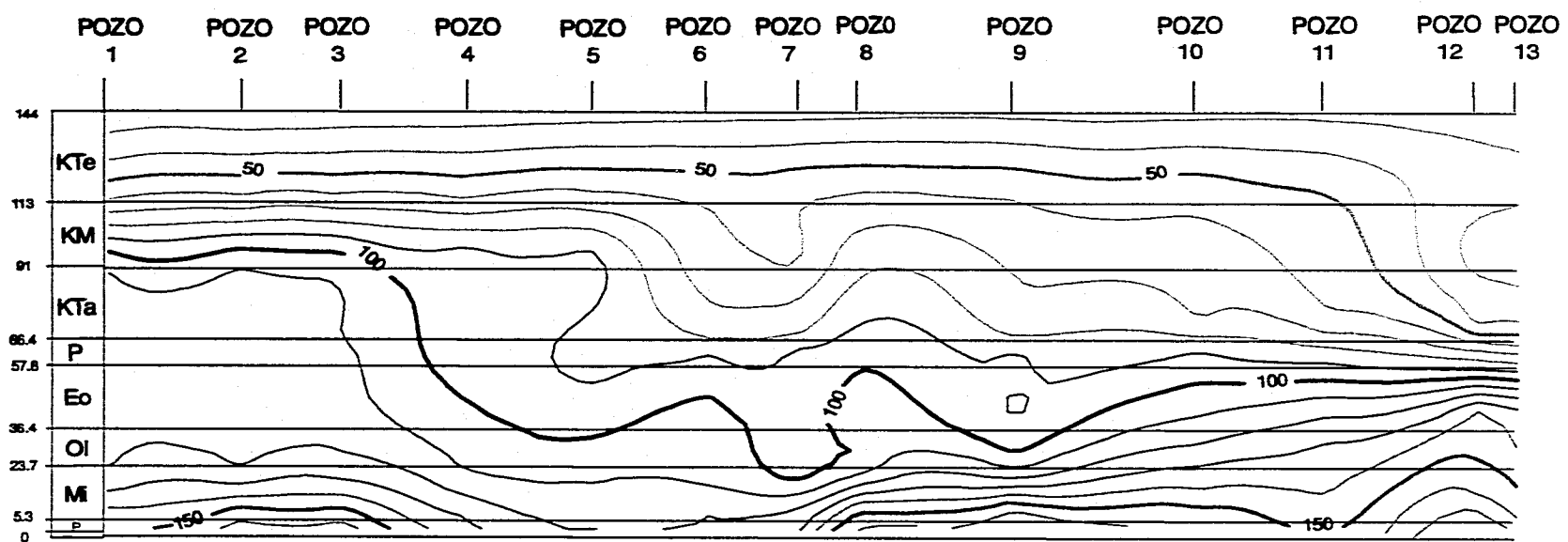


FIG. 93 CONFIGURACION DEL MARCO DE TEMPERATURA (°C) DE LA CIMA DE LA SERIE JURASICO SUPERIOR EN LA SECCION A TRAVES DEL TIEMPO

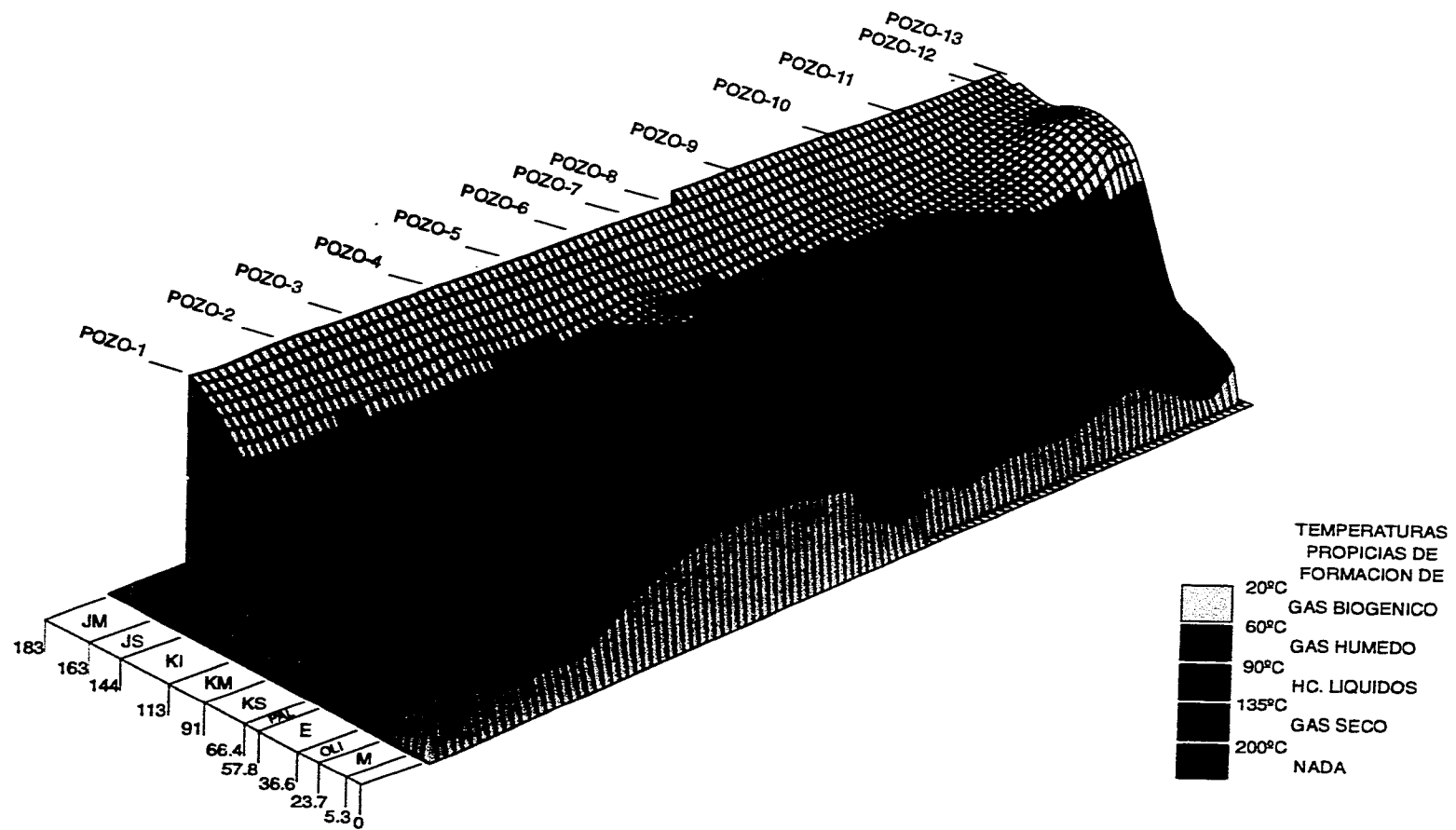


FIG. 94 REPRESENTACION EN TERCERA DIMENSION DE LA CONFIGURACION DEL MARCO TERMICO(°C) DE LA CIMA DE LA SERIE JURASICO SUPERIOR A TRAVES DEL TIEMPO



## V. SINTESIS

En la actualidad, las actividades de la exploración geológica con objetivos petroleros se han diversificado mediante la implementación de nuevas técnicas de análisis. Una de éstas lo constituye el modelado numérico de cuencas, desarrollada a fines de la década de los 80's, la que, mediante un tratamiento matemático de algunos de los principales fenómenos geológicos involucrados en la evolución de las cuencas sedimentarias, describe de una manera cuantitativa el modelo geológico conceptual con que se ha caracterizado la evolución de dichas cuencas.

En el presente estudio se incursiona en el conocimiento y en la aplicación de esta metodología de trabajo, la cual, se enfoca específicamente sobre el análisis del modelado unidimensional de la subsidencia y la termicidad a lo largo de una sección geológica que se ubica en el sureste de México, en la Provincia de las Cuencas del Sureste, particularmente en el Área Mesozoica Chiapas-Tabasco, en donde guarda una orientación general de SW-NE, con una longitud aproximada de 91 Km y se ubica ligeramente al Sur de Villahermosa, Tab.

Tres aspectos principales son abordados en el estudio de esta sección: la definición del modelo geológico conceptual, el análisis de la subsidencia y el análisis de la termicidad; de

éstos dos últimos tópicos, se realizó una síntesis de los principales conceptos teóricos involucrados.

El modelo geológico conceptual de evolución de la región caracteriza a la sección de estudio como parte de una cuenca mesozoica-cenozoica, ya que las rocas y sedimentos que la conforman tienen un rango de edad del Jurásico Medio al Reciente, desarrollada sobre un basamento de carácter continental de tipo ígneo-metamórfico de edad Paleozoico Tardío. Su origen se relaciona con la evolución de la margen divergente sur de la Cuenca del Golfo de México, en el Bloque Yucatán, como producto de la fragmentación del continente Pangea durante el Mesozoico, dentro de un modelo de extensión "rift-drift".

La secuencia estratigráfica de la sección está conformada por trece unidades incluyendo el Basamento. Las otras doce forman parte de la cubierta sedimentaria y, con excepción de la Unidad Sal del Jurásico Medio, son referidas en función de sus respectivos rangos cronoestratigráficos, como:

Reciente  
Pleistoceno  
Plioceno  
Mioceno  
Oligoceno

## SINTESIS

---

Eoceno  
Paleoceno  
Cretácico Superior  
Cretácico Medio  
Cretácico Inferior  
Jurásico Superior

La distribución que cada una de ellas guarda a lo largo de la sección, se estableció en función de la correlación de la información directa aportada por trece pozos de control aquí considerados. Los espesores para la unidad Sal, que no fue alcanzada por ningún pozo, y para la Serie Jurásico Superior, que no fue perforada totalmente, se estimaron en 1200 m por correlación regional para la primera y, en 1100 m para la segunda, excediendo ligeramente los 1060 m cortados en el Pozo 6. En ciertas porciones de la sección, algunas de estas unidades estratigráficas no se presentan, ya que fueron removidas total o parcialmente por erosión, como es el caso de la Serie Cretácico Superior en la zona de los pozos 4 y 5, y del Oligoceno en la de los pozos 7 y 8, o no fueron depositadas, como el Paleoceno en la porción del pozo 7.

Cada una de las series sedimentarias de la sección fue caracterizada tanto por su composición litológica porcentual, como por un parámetro paleobatimétrico de depósito. La composición fue estimada de manera generalizada sin considerar variaciones laterales a lo largo de la sección, a partir de las descripciones litológicas de los pozos y de los planos de interpretación de distribución de litofacies de la zona. El parámetro paleobatimétrico fue estimado en función del

ambiente de depósito al que se ha relacionado la serie, el que a menudo es referido de manera muy general como plataforma y cuenca, en donde se consideraron los valores mínimos de los rangos que caracterizan esas condiciones ambientales. Estos dos parámetros se muestran sintetizados en la tabla de la Figura 95.

### Subsidencia

En el modelado de la subsidencia se estimaron las porosidades iniciales de depósito de cada una de las series estratigráficas de la cubierta sedimentaria de la sección, mediante la interpolación proporcional de los valores promedio de porosidad inicial de las litologías puras presentes en cada una de dichas series, obteniéndose los siguientes resultados:

Pleistoceno	51 %
Plioceno	52 %
Mioceno	54 %
Oligoceno	54 %
Eoceno	55 %
Paleoceno	57 %
Cretácico Superior	60 %
Cretácico Medio	60 %
Cretácico Inferior	60 %
Jurásico Superior	58 %
Sal	3 %

La litología compuesta de cada una de estas unidades, determina la manera en la que ellas se compactan como una respuesta a la sobrecarga por sepultamiento, la cual queda representada en su curva de compactación. Esta indica el grado de disminución de la porosidad con el sepultamiento (curva

## SINTESIS

Unidad o Serie	Proporción Litológica (%)	Paleobatimetría (m)
Pleistoceno	arenisca 60 lutita 60	transicional 10
Plioceno	arenisca 45 lutita 45 marga 5 toba 5	plataforma 50
Mioceno	lutita 50 arenisca 35 marga 10 toba 5	cuena 300
Oligoceno	lutita 60 arenisca 20 marga 15 toba 5	cuena 500
Eoceno	lutita 70 marga 15 arenisca 10 toba 5	cuena 500
Paleoceno	lutita 77 marga 15 caliza 3 toba 5	cuena 500
Cretácico Superior	caliza 50 marga 30 lutita 20	- plataforma ahogada (pozos 1 - 3) - 50 - zona de erosión (pozos 4 - 5) - 0 - cuena (pozos 6-13) - 300
Cretácico Medio	caliza 82 dolomía 10 lutita 8	- plataforma (pozos 1 - 5) - 20 - transición (pozos 6 - 7) - 50 - cuena (pozos 8-13) - 300
Cretácico Inferior	caliza 75 dolomía 10 lutita 15	- plataforma (pozos 1 - 4) - 20 - transición (pozos 5 - 6) - 50 - cuena (pozos 7-13) - 300
Jurásico Superior	caliza 58 lutita 32 arenisca 10	Titho. - 100 Oxf.-Kim. - 20
Sal	sal 95 arcilla 5	0

FIG. 95 SINTESIS DE LOS DATOS DE PROPORCION LITOLOGICA Y PALEOBATIMETRIA CONSIDERADOS EN LAS UNIDADES DE LA CUBIERTA SEDIMENTARIA DE LA SECCION

porosidad-profundidad) sin tomar en cuenta la compactación producto de la presurización de fluidos, la cementación o la diagénesis, es decir, considerando exclusivamente la compactación mecánica. El análisis del comportamiento de las curvas de compactación entre las diferentes series estratigráficas de la sección las califica relativamente como:

- No compactable - La unidad Sal, que define una línea recta.
- Compactación lenta - Las Series Cretácico Inferior y Cretácico Medio, que presentan las

curvas con las pendientes relativamente más suaves.

- Compactación intermedia - Jurásico Superior y Cretácico Superior, que son caracterizadas por las curvas con una pendiente relativamente más pronunciada que las de las series anteriores.

- Compactación rápida - las seis series cenozoicas, que manifiestan las curvas con las pendientes relativamente más pronunciadas.

En función de estas curvas de compactación se realizó la estimación de los espesores

## SINTESIS

---

descompactados o de depósito de cada unidad sedimentaria. Con éstos, se describió la geometría de evolución de la historia de relleno o de sepultamiento de la cuenca a lo largo de la sección, para el tiempo de finalización del depósito de cada serie, para lo que se tomó en cuenta también la proporción de compactación que ellas experimentaron con el sepultamiento.

A la finalización del Jurásico Medio se manifiesta a lo largo de la sección sólo la Unidad Sal, con un espesor prácticamente sin variación respecto al que se consideró en la actualidad, esto es, con alrededor de 1200 m. La tasa de sedimentación de 60 m/Ma que se obtiene resultó ser sustancialmente menor que las tasas reportadas para condiciones actuales de más de 1000 m/Ma, lo que conlleva a tener en cuenta que el tiempo de 20 Ma (el Jurásico Medio) que se consideró para el depósito de la unidad fue demasiado extenso y debe restringirse a 5 Ma, la duración de la edad Calloviense, como algunos autores lo han referido.

Con el depósito de la Serie Jurásico Superior, la cubierta sedimentaria de la sección a la finalización del Jurásico Tardío (144 Ma) alcanzaba un grosor promedio de 3000 m, ya que, con el modelado, a esta serie se le estimó un espesor descompactado que varía entre 1733 y 1862 m, lo que representa una proporción de compactación del 37 al 41 % al tiempo actual. Los valores de porosidad final calculados en la cima de la unidad son de entre 6.3 y 14.2 % y, en la base, de entre 4.5 y 5.1 %. Estos resultados son producto de haber considerado para la serie un espesor actual

uniforme de 1100 m, por lo que, una mejor determinación de éste último, repercutirá en una estimación más real de las condiciones originales de depósito.

A la finalización del Cretácico Temprano (113 Ma), con el depósito de la Serie Cretácico Inferior con un espesor descompactado calculado que varía entre 634 y 950 m, la cubierta sedimentaria de la sección manifiesta un espesor promedio de 3600 m en la porción suroccidental (pozos 1 al 10) y de alrededor de 3000 m para la parte nororiental. La proporción de compactación que resulta con estos espesores varía entre 42 y 49 % y las porosidades actuales estimadas, en la cima de la serie se marcan entre 10.3 y 21 % y, en la base, entre 9.3 y 18.4 %.

Los espesores descompactados estimados para la Serie Cretácico Medio varían entre 1212 y 1881 m en la zona en donde se desarrolló el ambiente de plataforma (pozos 1 al 5), y entre 103 y 656 m en la zona del ambiente de cuenca (pozos 6 al 13). Con esto, el espesor de la cubierta sedimentaria en la sección a los 91 Ma se manifiesta en alrededor de los 5000 m en el primer sector y entre 3000 y 4000 m en el segundo. La proporción de compactación que se obtiene para esta serie varía también según los sectores mencionados; en la parte suroccidental de la sección se estima entre 35 y 39 % y, en la porción nororiental, entre 45 y 52 %, lo que indica que la magnitud del espesor depositado, y no sólo el grado de sepultamiento, influye también en la proporción de compactación, que es menor en espesores relativamente más gruesos que en

## SINTESIS

---

delgados. Las porosidades finales a la cima se estimaron entre 12 y 26 % y a la base entre 11 y 22 %.

Con el depósito de la Serie Cretácico Superior, la geometría de la cubierta sedimentaria, a los 66.4 Ma, no varía mucho con respecto a la de la etapa anterior y sigue manifestando un adelgazamiento de espesor de SW a NE, con poco más de 5000 m en la primera parte y hasta 3000 m en la segunda. Los espesores descompactados que se estimaron de la unidad varían entre 303 y 780 m, lo que implica una proporción de compactación entre 43 y 53 %.

A la finalización del depósito de la Serie Paleoceno a los 57.8 Ma, la geometría de la cubierta sedimentaria experimenta un mayor engrosamiento en el sector nororiental de la sección (pozos 6 al 13) que en el suroccidental (pozos 1 al 5), con lo que se hizo menos marcado el adelgazamiento SW-NE definido para la época anterior. En el primer sector se estimaron espesores descompactados entre 361 y 709 m y, en el segundo, entre 73 y 308 m. La proporción de compactación así experimentada por la serie se estimó entre el 42 y 53 % y los valores de porosidad final obtenidos son de entre 4 y 14 % para la cima, y entre 4 y 12 % para la base.

Los espesores descompactados estimados de la Serie Eoceno se conjuntan en dos grupos, uno, el de los pozos 1 al 9, relativamente más delgado, con valores de 170 a 623 m y con 1062 m en el pozo 6 y, el otro, el de los pozos 10 al 13, relativamente más grueso, con valores de 1030 a 2422 m. Con esto, la

geometría de la cubierta sedimentaria para los 36.6 Ma se enguasa de manera importante en la porción nororiental de la sección, resultando un espesor sensiblemente homogéneo de 5500 m en promedio a lo largo de ésta última, aunque con algunas irregularidades en la parte media. La proporción de compactación que se le estimó a la serie es del 40 al 50 % en el sector suroccidental y, del 27 al 33% en el nororiental; los valores de la porosidad final hacia la cima de la serie varían entre 5 y 19 % y, en la base, entre 4 y 14 %.

Para el tiempo de los 23.7 Ma, con el depósito de la Serie Oligoceno, cuyos espesores descompactados estimados varían entre 256 y 1078 m, la geometría de la cubierta sedimentaria de la sección se caracteriza ligeramente más engrosada hacia los extremos (6000 m) que hacia la porción central (de los pozos 6 al 8 con 5000 m). Esto es producto de que en ésta última zona, la serie fue removida por erosión, además de que, en la localidad del pozo 12 se llevó a cabo un engrosamiento brusco por adición de material sedimentario debido a fallamiento inverso. La proporción de compactación que experimentaron los espesores de depósito de la serie varían entre 29 y 41 % y, los valores de porosidad final estimados para la cima de ésta última se encuentran entre 7 y 25 %, mientras que los de la base, entre 5 y 20 %.

La Serie Mioceno se caracteriza con espesores descompactados estimados bastante irregulares que varían entre 539 y 4090 m y que definen el desarrollo de dos centros de subsidencia o hundimiento máximo en las zonas de los pozos

## SINTEISIS

---

1 al 4 y 7 al 10. La geometría de la cubierta sedimentaria de la sección para el tiempo de 5.3 Ma se modifica sustancialmente respecto a la de la etapa anterior; se define con dos sectores de espesor relativamente más grueso (alrededor de 8000 m) en las zonas de los pozos 1 al 3 y 8 al 10 y, con dos porciones de espesor relativamente más delgado (de 6000 a 6500 m) en las zonas de los pozos 4 al 6 y 11 al 13. La proporción de compactación que experimentaron con el sepultamiento los espesores de depósito de la serie es menor al 15 % en la zona de los pozos 1 al 9, aunque localmente en el pozo 5 se marca un 31 %, y varía entre el 19 y 38 % en la porción de los pozos 10 al 13; las porosidades finales estimadas para la cima de la unidad son de entre 14 y 44 %, y de entre 7 y 22 %, a la base.

La Serie Plioceno ya no experimentó reducción de la porosidad y compactación pronunciada, los espesores descompactados, que varían de 367 a 1724 m, experimentaron una proporción de compactación en general baja, menor al 10 %. La distribución de estos espesores a lo largo de la sección, aunque sí la aumentó en grosor, no modificó sustancialmente la geometría de la cubierta sedimentaria para el tiempo de 1.6 Ma, observándose dos sectores relativamente más gruesos, con espesores de alrededor de 8500 m, en las zonas de los pozos 1 al 3 y 8 al 10, y dos sectores relativamente más delgados, con espesores de alrededor de 7200 m, en las zonas de los pozos 4 al 7 y 11 al 13. Las porosidades finales obtenidas varían, en la cima de la serie de 25 a 49 % y, en la base, de 15 a 43 %. En la localidad del pozo 1, la serie no experimentó compactación ya que no sufrió sepultamiento y

la porosidad dentro de ella varía de 52 %, en su cima, a 47.5 %, en su base.

La Serie Pleistoceno tampoco sufrió compactación, ya que el espesor determinado en los pozos, constituye su espesor de depósito que varía de 151 a 2012 m. Los espesores más delgados se encuentran en la porción suroccidental de la sección (pozos 1 al 9) y, los más gruesos, en la nororiental, con lo que la geometría de la sección para el tiempo actual, aunque más engrosada, se manifiesta de manera muy similar a la de la etapa anterior. Se definen dos sectores relativamente más gruesos, con 8700 y 9000 m de espesor en las zonas de los pozos 1 al 3 y 8 al 10, respectivamente, y dos sectores relativamente más delgados con 7200 y 8000 m de espesor en las zonas de los pozos 4 al 7 y 11 al 13 respectivamente. La porosidad de la serie varía de la cima (51 %) hacia la base (25 a 48 %) sólo en función del espesor acumulado.

A partir de esta cuantificación de la historia de sepultamiento de la cubierta sedimentaria de la sección, se describió y analizó la historia de subsidencia total, esto es, la dinámica de evolución espacial en el sentido vertical que siguió la cima del basamento a lo largo de la sección, a través del tiempo. Esta evolución no se desarrolló de manera homogénea, sino con una serie de variaciones que redundaron en la definición de algunos sectores o bloques dentro de ella y, de cinco etapas o fases de distinto comportamiento o proporción de subsidencia.

- Primera Etapa. De acelerada tasa de subsidencia, desarrollada durante el Jurásico en toda la sección.

## SINTESIS

---

- Segunda Etapa. De tasa de subsidencia atenuada, desarrollada durante el Cretácico Temprano en toda la sección y, durante el Cretácico Medio y Tardío sólo en la porción noreste (pozos 6 al 13).

- Tercera Etapa. De acelerada tasa de subsidencia, desarrollada durante el Cretácico Medio y parte del Cretácico Tardío en el sector de los pozos 1 al 5; durante parte del Cretácico Tardío y hasta parte del Eoceno Temprano en el sector de los pozos 6 al 9 y durante el Paleoceno, y hasta aparentemente el Oligoceno, en el sector de los pozos 10 al 13.

- Cuarta Etapa. De tasa de subsidencia atenuada e, inclusive, con desarrollo de subsidencia negativa o levantamiento hacia la parte final de la etapa. Se manifiesta durante parte del Cretácico Tardío y hasta el Oligoceno en la zona de los pozos 1 al 5 y en el Eoceno-Oligoceno en la zona de los pozos 6 al 9.

- Quinta Etapa. De acelerada tasa de subsidencia, desarrollada del Mioceno al Reciente a lo largo de toda la sección, en la que se definen cuatro sectores con un comportamiento diferencial, dos con una tasa relativamente más baja (I y III), y otros dos de tasa relativamente más alta (II y IV).

Dado que la subsidencia total es el resultado acumulativo de los efectos inherentes a la acumulación de los materiales sedimentarios (subsidencia gravitatoria) más los efectos de los fenómenos tectónicos que se manifiestan en la cuenca (subsidencia tectónica), la remoción de los efectos que la gravitatoria tiene en la

total, por medio del "backstripping", permite cuantificar la tectónica. El comportamiento de la subsidencia tectónica guarda estrecha correspondencia con el de la subsidencia total, por lo que la evolución de la primera se caracterizó desarrollada también, de una manera general, bajo cinco etapas o fases del mismo tipo y duración que las de la segunda, aunque en detalle sí se tienen algunas diferencias. Con esto, se estableció el grado de participación que tiene la subsidencia tectónica en el desarrollo de la subsidencia total dentro de cada una de las etapas anteriores.

- Primera Etapa. Tiene correspondencia con la de la subsidencia total y, en ésta última, la cantidad de subsidencia tectónica representó una proporción del 60 %.

- Segunda Etapa. También guarda correspondencia con la de la total y la proporción promedio de la subsidencia tectónica en aquélla es de alrededor del 50 %.

- Tercera Etapa. La duración de esta etapa de subsidencia tectónica en el sector de los pozos 1 al 5, a diferencia de la de la subsidencia total que duró hasta la parte temprana del Cretácico Tardío, se manifestó hasta el Paleoceno. En el tiempo de correspondencia de ambas, la subsidencia tectónica representa una proporción del 43 % de la total, mientras que, cuando ya no hay correspondencia, esta influencia se incrementa hasta el 75 %. Por lo que se refiere al sector de los pozos 6 al 13, aunque existió correspondencia de las subsidencias total y tectónica, la proporción de participación de ésta última en la primera en la

## SINTESIS

---

parte de los pozos 6 al 9, fue de 75 % y, en el de los pozos 10 al 13, de 60 %.

- Cuarta Etapa. En el sector de los pozos 1 al 5 comienza en el Eoceno, con lo que nuevamente vuelve a existir concordancia entre el tipo de comportamiento de las subsidencias total y tectónica y su tiempo de duración, es decir, de carácter atenuado y hasta el Oligoceno, tiempo en el que se manifiesta subsidencia negativa o levantamiento en la mayor parte de la sección. La proporción de participación de la subsidencia tectónica en la total en esta etapa es del 60 %.

- Quinta Etapa. Tiene correspondencia con la de la subsidencia total y, en ésta última, la cantidad de subsidencia tectónica representó una proporción promedio entre el 25 y 30 %.

El patrón de comportamiento de las curvas de subsidencia tectónica de la sección, al relacionarlas con respecto al patrón de las curvas teóricamente definido para diferentes valores de factor de estiramiento ( $\beta$ ) de una cuenca de carácter extensional, así como respecto a las dos fases o etapas principales de evolución con que se caracterizan éstas últimas, permitió considerar a la primera etapa aquí definida para la sección como correspondiente a la Fase de Subsidencia Inicial (Si) y, las otras cuatro, a la Fase de Subsidencia Termotectónica (St). El tipo de depósitos sedimentarios relacionados a la Fase de Subsidencia Inicial (sal y materiales elásticos-carbonatados), aparentemente no precedidos por ningún otro depósito ni fallamiento normal, sugieren que la cuenca en el área de la sección

de estudio pudiera ser de tipo "sag" más que de tipo "rift".

El comportamiento de las curvas de subsidencia tectónica de la sección durante la Fase de Subsidencia Termotectónica, dadas las cuatro etapas aquí consideradas, al diferir sensiblemente del comportamiento exponencialmente decreciente con el que teóricamente se ha descrito desarrollada dicha etapa, condujo a caracterizar a ésta última con una historia de carácter polifásico, más que con un evento único de subsidencia simple. En función de la relación subsidencia tectónica-subsidencia gravitatoria, las cinco etapas definidas se describen como:

- Fase de Activación - La primera etapa, en donde la subsidencia tectónica predomina sobre la gravitatoria.

- Periodo de Estabilidad - La segunda etapa, en donde la actividad de la subsidencia tectónica se atenúa disminuyendo su grado de influencia en la subsidencia total e, inclusive, se llega a tener una predominancia de la subsidencia gravitatoria.

- Periodo de Flexura - La tercera etapa, en donde la subsidencia tectónica sobrepasa el grado de influencia de la gravitatoria.

- Periodo de Atenuación-Inversión - La cuarta etapa, en donde la subsidencia tectónica, aunque disminuye su grado de participación respecto al periodo anterior, éste se mantiene relativamente alto y, además, se manifiesta con subsidencia negativa o levantamiento.



## SINTESES

---

- Periodo de Reactivación-Colmatación - La quinta etapa, en donde aún cuando la subsidencia tectónica manifiesta un notable incremento, la participación de la subsidencia gravitatoria en la total es cuantitativamente mucho más importante, indicando un predominio de la actividad sedimentaria que terminó por colmatar la cuenca.

La relación del comportamiento de las curvas de subsidencia tectónica de la sección con el de las curvas teóricamente calculadas para una cuenca extensional, considerando diferentes valores del Factor de Estiramiento ( $\beta$ ), permitió considerar para la sección un valor promedio de éste último de 1.8.

### Termicidad

En el modelado de la termicidad se tomó como parámetro de referencia un flujo de calor variable, cuyo comportamiento fue caracterizado, considerando el desarrollo de la cuenca dentro de un modelo extensional, por los valores al inicio y final de la etapa "rift", así como por el valor actual. Este último, que se estimó en función de los datos de temperatura actual (BHT) y de la Ley de Fourier, varía a lo largo de la sección entre 33 y 44 mW/m<sup>2</sup>, siendo la porción de los pozos 10 al 13 en donde se concentran los valores estimados más altos, lo que la caracteriza como una zona actualmente en desequilibrio térmico. El valor del flujo de calor a la finalización de la etapa "rift" (144 Ma), considerando la gráfica de relación flujo de calor-factor de estiramiento ( $\beta$ ) y un valor de 1.8 para éste último, se estimó en 58 mW/m<sup>2</sup>. Para el tiempo del inicio de la

etapa "rift" (183 Ma), el valor de flujo de calor se estimó en 35 mW/m<sup>2</sup> considerando un valor promedio de zonas tectónicamente estables. En éstas consideraciones se tiene en cuenta un comportamiento del flujo de calor típico de cuencas extensionales, "rápidamente" ascendente durante la etapa "rift" y, con un "lento" pero paulatino descenso durante la etapa post-"rift".

Teniendo en cuenta una temperatura superficial constante de 25°C a lo largo de la sección y a través del tiempo, el marco de temperatura a la base de la cubierta sedimentaria a la finalización del depósito de la Unidad Sal (163 Ma), apenas sobrepasaba los 32°C, estimándose un gradiente geotérmico lateralmente homogéneo de 10°C/Km. Al final del Jurásico Tardío (144 Ma), dada la etapa de más alto valor de flujo térmico, el marco de temperatura se extendió hasta los 120°C y, el gradiente geotérmico, aunque lateralmente homogéneo, verticalmente guarda un comportamiento de tipo "dog-leg", 17°C/Km en la Unidad Sal y 44°C/Km en la Serie Jurásico Superior, dado el alto contraste de sus conductividades. A la base de ésta última se marea una temperatura de alrededor de 100°C.

Al final del Cretácico Temprano (113 Ma) el marco de temperatura llega a los 135°C en el sector de los pozos 1 al 10, y a 125°C en el de los pozos 11 al 13; el Tithoniano queda entre 60 y 75°C en la primera zona y a menos de 50°C en la segunda. El gradiente geotérmico a lo largo de la sección es variable y verticalmente tiene un comportamiento de tipo "dog-leg". De hecho, éstas características del gradiente térmico se mantienen hasta la actualidad.

## SINTESIS

---

A los 91 Ma (fin del Cretácico Medio), el marco de temperatura varía de 170°C en el pozo 1, a 130°C en los pozos 6 y 7, a 140°C en el pozo 8 y, a 110°C en el pozo 13; el Tithoniano se ubica entre 112 y 125°C en el primer punto, se mantiene entre 60 y 90°C en el segundo y, continúa a menos de 50°C en el tercero. La variación lateral del gradiente geotérmico es de carácter más repentino donde la Unidad Sal se ubica espacialmente más somera que las unidades que la suprayacen estratigráficamente, pero que han sido más profundamente sepultadas.

En el Cretácico Tardío (66.4 Ma) el marco de temperatura cambia muy poco respecto al definido en la etapa anterior y las condiciones térmicas en las que se encontró el Tithoniano, son también esencialmente las mismas.

En el Paleoceno (57.8 Ma) el marco de temperatura en la zona de los pozos 1 al 3 se mantiene en 170°C, en la del 5 al 6 pasa a 142°C y, en la del 12 al 13 alcanza 128°C; el Tithoniano se ubica dentro de esas zonas, entre 120 y 130°C, entre 90 y 100°C y entre 65 y 80°C respectivamente.

En el Eoceno (36.6 Ma) el marco de temperatura en el sector suroccidental de la sección manifiesta pocos cambios; en la zona de los pozos 1 al 3 desciende a 163°C y del 4 al 9 se marca en alrededor de los 150°C, mientras que, en la restante parte nororiental, sí se incrementa significativamente hasta 195°C en el pozo 12, constituyendo un brusco aumento en relación a la etapa anterior. El Tithoniano, respecto a las zonas antes mencionadas,

se ubica entre los rangos de 117 a 125°C, de 93 a 110°C y de 120 a 145°C respectivamente.

En el Oligoceno (23.7 Ma), de una manera general, el marco térmico manifiesta ligeros cambios ya que en la zona de los pozos 1 al 3 se marca en 165°C, del 4 al 7 disminuye hasta 136°C y hacia el pozo 12 pasa a los 200°C; el Tithoniano, por lo tanto, se ubica entre los 120 y 130°C en la primera porción, entre los 95 y los 110°C en la segunda y hasta el pozo 9 y, de allí al pozo 12, hasta en 150°C.

Al final del Mioceno (5.3 Ma) el marco de temperatura de la sección se incrementa notablemente; en la zona de los pozos 2 y 3 llega a 200°C, disminuye a 150°C en el pozo 5, pasa de nuevo a 200°C en el pozo 9, en donde se mantiene hasta el extremo noreste de la sección, calificando a éste último sector, como el de mayor gradiente geotérmico. El Tithoniano se ubica en temperaturas de alrededor de 165°C en el primer sector mencionado, hasta 110°C en el pozo 5 y de ahí a 165°C en el pozo 8, rango en el que se mantiene hasta el pozo 12.

Durante el Plioceno el marco de temperatura de la sección se incrementa ligeramente en alrededor de 5°C de una manera más o menos homogénea y, para la época actual, la zona de los pozos 10 al 13, es en donde se marca un incremento un poco más notorio al alcanzarse poco menos de los 225°C; el Tithoniano en el sector de los pozos 1 al 3 se encuentra entre 150 y 175°C, del 4 al 7 a menos de 135°C, del 8 al 11 a menos de 175°C y, en el 12 a poco más de éste último valor.

## VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### METODOLOGICAS

- Se incursionó en la metodología de trabajo propia del modelado numérico de cuencas sedimentarias, específicamente en la concerniente al modelado unidimensional de la subsidencia y la termicidad.

- A partir de la consulta bibliográfica de los conceptos geológicos teóricos involucrados en el modelado numérico de cuencas sedimentarias, se integró la síntesis de aquéllos que son tomados en cuenta dentro del modelado de la subsidencia y la termicidad:

- compactación
- paleobatimetría
- eustatismo
- subsidencia (total y tectónica)
- flujo de calor-gradiente geotérmico
- transmisión del calor
- fuentes de generación de calor

- Mediante la aplicación de esta técnica de análisis del modelado numérico, se realizó la evaluación cuantitativa de la evolución a través del tiempo de la subsidencia y la termicidad desarrolladas a lo largo de la sección de estudio, a partir de las

consideraciones sintetizadas en el modelo geológico conceptual allí definido.

- Con base en la integración de la información geológica de estudios previos, en el modelo de evolución geológico conceptual del área de la sección de estudio se consideró que:

- La sección de estudio forma parte de una cuenca sedimentaria Mesozoica-Cenozoica, que experimentó de la evolución de la margen divergente sur de la Cuenca del Golfo de México, dentro de un contexto de apertura extensional de tipo "rift"- "drift".

- El basamento es de composición continental, con rocas de carácter ígneo-metamórfico de edad Paleozoico Tardío.

- La cubierta sedimentaria esta constituida por cuatro grupos litológicos mayores, Sal del Jurásico Medio (?) en la base, que es seguida por una secuencia arcillo-carbonatada del Jurásico Tardío, luego por un paquete de carbonatos del Cretácico, y por último, por una secuencia terrígena del Cenozoico. No se cuenta con evidencias de una sedimentación anterior a la Sal.

- La columna geológica de la sección tenida en cuenta para la realización del modelado se

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

caracterizó conformada por trece unidades estratigráficas:

- Basamento, Sal y las Series Jurásico Superior, Cretácico Inferior, Cretácico Medio, Cretácico Superior, Paleoceno, Eoceno, Oligoceno, Mioceno, Plioceno, Pleistoceno y Reciente.

### SUBSIDENCIA

- En función de la composición litológica de cada una de las unidades estratigráficas consideradas en la sección, exceptuando el Basamento y la Serie Reciente que sirvieron como niveles de referencia, las porosidades iniciales que se les estimaron con el modelado son respectivamente de:

3, 58, 60, 60, 60, 57, 55, 54, 54, 52 y 51 %.

- Desde el punto de vista exclusivamente de la compactación mecánica, el carácter de comportamiento con el sepultamiento de estas once unidades estratigráficas de la sección es:

- la unidad Sal, no compactable
- las Series Cretácico Inferior y Medio, de compactación lenta
- las Series Jurásico Superior y Cretácico Superior, de compactación intermedia

- las seis Series del Cenozoico, de compactación rápida.

- Por medio del método de "backstripping", se determinaron los espesores modelados de depósito de cada una de las unidades estratigráficas consideradas, a partir de los cuales, se establecieron las geometrías de acumulación de cada una de esas unidades, así como, las tasas de sedimentación a ellas correspondientes en cada uno de los puntos de control de la sección.

- Se modelaron las reducciones de espesor que experimentaron cada una de las unidades estratigráficas conforme a su sepultamiento, con lo que se describió cuantitativamente la geometría del relleno sedimentario a lo largo de la sección a la finalización del depósito de cada una de esas unidades, así como, la posición espacial que allí guardaba cada una de ellas.

- Del análisis del relleno sedimentario de la sección, se determinó que el desarrollo de la subsidencia total se llevó a cabo en cinco etapas bajo dos relativamente distintas proporciones de hundimiento principales:

- Alta tasa de subsidencia
  - Jurásico Medio - Jurásico Tardío
  - Cretácico Temprano - Cretácico Tardío
  - Cretácico Tardío - Oligoceno
- Baja tasa de subsidencia
  - Cretácico Medio - Oligoceno
  - Mioceno - Reciente

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

- Con excepción de la etapa de alta tasa de subsidencia del Jurásico Medio - Tardío, que se manifiesta de manera homogénea, las demás etapas se desarrollaron de manera diferencial a lo largo de la sección, con lo que ésta se define estructurada a través del tiempo con varios sectores o bloques.

- Se observó que el comportamiento de las curvas de subsidencia tectónica aquí obtenidas se ajusta, de una manera general, al de las dos fases de subsidencia teóricamente definidas para una cuenca de origen extensional, con lo que, para el área de la sección se determinó:

- La Fase de Estiramiento o "Rift", caracterizada por una pendiente de forma pronunciada, alcanzada durante el Jurásico Medio-Tardío.

- La Fase Termotectónica, caracterizada por una forma de pendiente atenuada, para el Cretácico Temprano-Reciente.

- En función del comportamiento de estas curvas de subsidencia tectónica, se consideró que el factor de estiramiento  $\beta$  promedio en la sección es de 1.8.

- Tomando en cuenta, que el comportamiento en detalle de las curvas de subsidencia tectónica dentro de la fase termotectónica muestra algunas variaciones con respecto al comportamiento teóricamente definido, se sugiere que definen una historia tectónica de

carácter polifásico, más que un evento de subsidencia simple durante esta fase.

- En función del grado de participación que tiene la subsidencia tectónica dentro del desarrollo de la subsidencia total en la sección, se caracterizan cinco períodos tectónicos:

- Activación, por adelgazamiento de la litósfera.

- Atenuación, una etapa de estabilidad tectónica.

- Flexural, debida probablemente a deformación fuera de la zona de estudio

- Atenuación-Inversión, por la manifestación de un evento de deformación y levantamiento dentro de la zona de estudio

- Colmatación, asociada a un importante aporte de sedimentos en la región

## TERMICIDAD

- Los valores de flujo de calor actual a lo largo de la sección son de carácter heterogéneo, manifestándose la porción más nororiental de la misma, la zona de los pozos 10 al 13, como la de mayor termicidad con valores de flujo de calor alrededor de  $40 \text{ mW/m}^2$ , por  $35 \text{ mW/m}^2$  en promedio en la porción restante.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

- La historia de flujo de calor se caracterizó con un valor de  $35 \text{ mW/m}^2$  para el tiempo de inicio de los depósitos de la cubierta sedimentaria, con  $58 \text{ mW/m}^2$  a la finalización de la etapa "rift" y con el valor actual estimado en cada punto de control para el tiempo presente.

- Se estimó el marco de temperatura de la sección prevaleciente a la finalización del depósito de cada una de las unidades de la cubierta sedimentaria, el cual a la base de ésta última, varía desde alrededor de  $32^\circ\text{C}$  en el Jurásico a poco más de  $200^\circ\text{C}$  a en la actualidad, definiéndose característicamente una zona en la porción central de la sección, con valores menores a los  $175^\circ\text{C}$ .

- La presencia de Sal en la base de la columna, influye en el desarrollo de un gradiente geotérmico lateralmente menor en las zonas en donde la unidad se va ubicando en una posición estructuralmente menos profunda durante la historia de sepultamiento.

- Dentro del marco de temperatura modelado, la Serie Jurásico Superior y, específicamente el Tithoniano, fue ingresando a rangos térmicos cada vez más altos de manera diacrónica a lo largo de la sección. Los  $60^\circ\text{C}$  los alcanzó primero la zona de los pozos 1 al 9 a la finalización del Cretácico Temprano y, después, la del 10 al 13 en el Cretácico Tardío. Los  $90^\circ\text{C}$  fueron alcanzados primero por la

zona de los pozos 1 al 5 en el Cretácico Medio y, después, por la del 6 al 13 en el Paleoceno.

## RECOMENDACIONES

- Dado que metodológicamente el modelado de la subsidencia y la termicidad constituyen las primeras etapas de análisis dentro del modelado de cuencas, a manera de tener un mejor ajuste con la evolución de la cuenca en la que se ubica la sección de estudio y el tipo de hidrocarburos allí presentes, los resultados aquí obtenidos requieren de ser calibrados y validados con datos de alguno de los indicadores térmicos contenidos en la sección (vitrinita, arcillas, isótopos, etc.), para en caso de existir alguna incongruencia, realizar la revisión y reconsideración del modelo geológico conceptual tomado en cuenta en el presente modelado.

- A menudo el trabajo de modelado se lleva a cabo utilizando parámetros promedio de las rocas establecidos a partir de información de varias localidades y laboratorios del mundo, por lo que, para la obtención de resultados más apegados a las condiciones de las cuencas mexicanas, es necesario tener en cuenta parámetros promedio de las rocas de la región en particular en la que se trabaja.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

- Se requiere de realizar una comparación de los valores de porosidad aquí obtenidos con los datos de este tipo existentes en los pozos, a fin de calibrar más óptimamente los resultados.

- Es necesario llevar a cabo una mayor integración de la información relacionada con la definición más específica de los parámetros cuantitativos de la paleobatimetría con que se caracterizan los depósitos sedimentarios.

- La tendencia a fluir que presenta característicamente la sal cuando se ve sometida a presión por sepultamiento, no ha sido tomada en cuenta en los trabajos de modelado, y dado que este comportamiento puede influir de manera importante en la estructuración de la cuenca y, específicamente en el desarrollo del mareo térmico, se recomienda considerar este aspecto, sobre todo en el modelado en 2D.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

- Se requiere de realizar una comparación de los valores de porosidad aquí obtenidos con los datos de este tipo existentes en los pozos, a fin de calibrar más óptimamente los resultados.
- Es necesario llevar a cabo una mayor integración de la información relacionada con la definición más específica de los parámetros cuantitativos de la paleobatimetría con que se caracterizan los depósitos sedimentarios.
- La tendencia a fluir que presenta característicamente la sal cuando se ve sometida a presión por sepultamiento, no ha sido tomada en cuenta en los trabajos de modelado, y dado que este comportamiento puede influir de manera importante en la estructuración de la cuenca y, específicamente en el desarrollo del marco térmico, se recomienda considerar este aspecto, sobre todo en el modelado en 2D.



## REFERENCIAS

- Allen, P. A. y Allen, J. R., 1990. Basin Analysis Principles & Applications. Blackwell Scientific Publications, 451 p.
- Alzaga, R. H., 1994. Modelado de Subsistencia de la Cuenca de Chiapas, Estado de Chiapas. UNAM, Div. Est. Postgrado Fac. Ing., Tesis Maestría, 103 p. (Inédita).
- Armstead, H. Ch. H., 1989. Energía Geotérmica. Editorial LIMUSA. 504 p.
- BasinMod, 1992. A modular Basin Modelling System. Platte River Associates, Inc.
- Bertrand, C. C., 1987. Apuntes de Geoquímica Orgánica Aplicada a la Prospección Petrolera. UNAM, Div. Est. Post. Fac. Ing., 137 p.
- Bessis, F., 1986. Some Remarks on the Study of Subsidence of Sedimentary Basins. Application to the Gulf of Lions Margin (Western Mediterranean). *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 3, pp. 37-63.
- Bond, G. C. y Kominz, M. A., 1984. Construction of Tectonic Subsidence Curves for the Early Paleozoic Miogocline, Southern Canadian Rocky Mountains: Implications for Subsidence Mechanisms, Age of Breakup, and Crustal Thinning. *Geol. Soc. of Amer. Bull.*, Vol. 95, pp. 155-173.
- Buffler, R. T.; Dobson, L. M. y Mellor, D. A., 1993. Middle Jurassic Through Early Cretaceous Evolution of the Northeastern Gulf of Mexico Basin. *GCSSEPM Foundation 13<sup>th</sup> Annual Research Conference Proceedings*, pp. 33-50.
- Dewey, J. F., 1982. Plate Tectonics and the Evolution of the British Isles. *Jour. Geol. Soc. London*, Vol. 139, pp. 371-414.
- Einsele, G., 1992. Sedimentary Basins. Evolution, Facies, and Sediment Budget. Springer-Verlag Ed., 628 p.
- Ewing, T. E., 1991. The Gulf of Mexico, Structural Framework. *Geol. Soc. of Amer., The Geology of North America*, Vol. J, pp. 31-52.
- Falvey, D. A. y Middleton, M. F., 1981. Passive Continental Margins: Evidence for a Prebreakup Deep Crustal Metamorphic Subsidence Mechanism. *Colloquium on Geology of Continental Margins, Oceanologica Acta*, Vol. 4, pp. 103-114.

REFERENCIAS

- Friedman, G. M. y Sanders, J.E., 1978. Principles of Sedimentology. John Wiley & Sons, Inc., 792 p.
- Galloway, W. E.;Bebout, D. G.;Fisher, W. L.; Dunlap, J.B.; Cabrera, C. R.; Lugo, R. J. E. y Scott, T. M., 1991. The Gulf of Mexico, Cenozoic. *Geol. Soc. of Amer.*, The Geology of North America, Vol. J, pp. 245-324.
- García, M. G., 1994. Structural Evolution of SE Mexico (Chiapas-Tabasco-Campeche) Offshore and Onshore. RICE University, Houston Texas, Ph. Doctor Thesis, 161 p.
- GENEX, 1991. 1-D Quantitative Modelling of Hydrocarbons. Generation and Expulsion. BICIP FRANLAB Petroleum Consultants, IFP. Manual. Geological Society of America, 1983. Geologic Time Scale.
- González, G. R. y Holguín, Q. N., 1992. Las Rocas Generadoras de México. *Bol. Asoc. Mex. Geol. Petrol.*, Vol. 42, No.1, pp. 9-23.
- Haq, B. U.; Hardenbol, J. y Vail, P.R., 1987. Chronology of Fluctuating Sea Levels Since the Triassic (250 Myr Ago to Present). *Science*, Vol. 235, pp. 1156-1167.
- Holguín, Q. N., 1985 (1988). Evaluación Geoquímica del Sureste de México. *Bol. Asoc. Mex. Geol. Petrol.*, Vol. 37, No.1, pp. 3-48.
- Holguín, Q. N.; Demaison, G.; Serrano, E.; Galindo, F.; Romero, A.; Sosa, A. y Martínez, G., 1994. The Generative Subsystems of the Productive Mexican Basins. First Joint AAPG/AMGP Research Conference, "Geological Aspects of Petroleum Systems", Mexico.
- Hunt, J. M., 1977. Distribution of Carbon as Hydrocarbon and Asphaltic Compounds in Sedimentary Rocks. *Am. Ass. Petrol. Geol. Bull.*, Vol. 61, No. 1, pp. 100-104.
- Jarvis, G. T. y McKenzie, D., P., 1980. Sedimentary Basin Formation with Finite Extension Rates. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 48, pp. 42-52.
- Lerche, I., 1990. Basin Analysis Quantitative Methods. Vols. 1 y 2. Academic Press, Inc.
- López, R. E., 1979. Geología de México, Tomo III. Edición Escolar. 446 p.
- Mandujano, V. J.; Vázquez, M. M. E.; Téllez, F. R. A.; Rosales, C. E.; Riba, R. A. y Adate, T., 1992. Estudio Geodinámico de las Fosas de la Sierra de Chiapas. *Inst. Mex. del Petrol.*, Proyecto CAO-3516, 488 p(Inédito).

## REFERENCIAS

- Marton, G. y Buffler, R. T., 1993. The Southeastern Gulf of Mexico in the Framework of the Opening of the Gulf of Mexico Basin. **GCSSEPM Foundation 13<sup>th</sup> Annual Research Conference Proceedings**, pp. 51-67.
- McCulloh, H. y Nacser, N. D., 1989. Thermal History of Sedimentary Basins: Introduction and Overview. En *Thermal History of Sedimentary Basins*, Springer-Verlag, pp. 1-11.
- McFarlan Jr., E. y Menes, L. S., 1991. The Gulf of Mexico, Lower Cretaceous. *Geol. Soc. of Amer., The Geology of North America*, Vol. J, pp. 181-204.
- McKenzie, D., P 1978. Some Remarks on the Development of Sedimentary Basins. *Earth And Planetary Science Letters*, Vol. 40, pp.25-32.
- Meneses, R. J. J., 1990. Marco Tectónico y Paleogeográfico del Triásico Tardío-Jurásico en el Sureste de México. *Bol. Asoc. Mex. Geol. Petrol.*, Vol. 39, No.2, pp. 3-69.
- Meneses, de G. J., 1980. Geología de la Sonda de Campeche. *Bol. Asoc. Mex. Geol. Petrol.*, Vol. 32, No.1, pp. 1-26.
- Miall, A. D., 1990. Principles of Sedimentary Basin Analysis. Springer-Verlag, 668 p.
- Nakayama, K. y Lerche, I., 1987 (a). Two-dimensional basin analysis. Migration of hydrocarbons in Sedimentary Basins, **IFP Exploration Research Conferences**, No. 45, Paris, Editions Technip, pp. 597-611.
- Nakayama, K. y Lerche, I., 1987 (b). Basin Analysis by Model Simulation: Effects of Geologic Parameters on 1-D and 2-D Fluid Flow Systems with Application to an Oil Field. *Gulf Coast Assoc. Geol. Societies Transactions.*, Vol. 37, pp. 175-184.
- PEMEX, 1985. Geología Económica Petrolera de la Zona Sureste (Inédito).
- Perrier, R. y Quiblier, J., 1974. Thickness Changes in Sedimentary Layers During Compaction History; Methods for Quantitative Evaluation. *Am. Ass. Petrol. Geol. Bull.*, Vol. 58, No. 3, pp. 507-520.
- Perrodon, A., 1983. Dynamics of Oil and Gas Accumulations. *Bulletin des Centres de Recherches Exploration-Production Elf-Aquitaine*, Mem. 5, Pau, France, 368 p..
- Person, M y Garven, G., 1992. Hydrologic Constraints on Petroleum Generation Within Continental Rift Basins: Theory and Application to the Rhine Graben. *Am. Ass. Petrol. Geol. Bull.*, Vol. 76, No. 4, pp. 468-488.
- Pindell, J. L., 1985. Alleghenian Reconstruction and Subsequent Evolution of the Gulf of Mexico, Bahamas, and proto-Caribbean. *Tectonics*, Vol. 4, pp. 1-39.

## REFERENCIAS

---

- Marton, G. y Buffler, R. T., 1993. The Southeastern Gulf of Mexico in the Framework of the Opening of the Gulf of Mexico Basin. **GCSSEPM Foundation 13<sup>th</sup> Annual Research Conference Proceedings**, pp. 51-67.
- McCulloh, H. y Naeser, N. D., 1989. Thermal History of Sedimentary Basins: Introduction and Overview. En **Thermal History of Sedimentary Basins**, Springer-Verlag, pp. 1-11.
- McFarlan Jr., E. y Menes, L. S., 1991. The Gulf of Mexico, Lower Cretaceous. **Geol. Soc. of Amer.**, The Geology of North America, Vol. J, pp. 181-204.
- McKenzie, D., P 1978. Some Remarks on the Development of Sedimentary Basins. **Earth And Planetary Science Letters**, Vol. 40, pp.25-32.
- Meneses, R. J. J., 1990. Marco Tectónico y Paleogeográfico del Triásico Tardío-Jurásico en el Sureste de México. **Bol. Asoc. Mex. Geol. Petrol.**, Vol. 39, No.2, pp. 3-69.
- Meneses, de G. J., 1980. Geología de la Sonda de Campeche. **Bol. Asoc. Mex. Geol. Petrol.**, Vol. 32, No.1, pp. 1-26.
- Miall, A. D., 1990. Principles of Sedimentary Basin Analysis. **Springer-Verlag**, 668 p.
- Nakayama, K. y Lerche, I., 1987 (a). Two-dimensional basin analysis. Migration of hydrocarbons in Sedimentary Basins, **IFP Exploration Research Conferences**, No. 45, Paris, Editions Technip, pp. 597-611.
- Nakayama, K. y Lerche, I., 1987 (b). Basin Analysis by Model Simulation: Effects of Geologic Parameters on 1-D and 2-D Fluid Flow Systems with Application to an Oil Field. **Gulf Coast Assoc. Geol. Societies Transactions.**, Vol. 37, pp. 175-184.
- PEMEX, 1985. Geología Económica Petrolera de la Zona Sureste (Inédito).
- Perrier, R. y Quiblier, J., 1974. Thickness Changes in Sedimentary Layers During Compaction History; Methods for Quantitative Evaluation. **Am. Ass. Petrol. Geol. Bull.**, Vol. 58, No. 3, pp. 507-520.
- Perrodon, A., 1983. Dynamics of Oil and Gas Accumulations. **Bulletin des Centres de Recherches Exploration-Production Elf-Aquitaine**, Mem. 5, Pau, France, 368 p..
- Person, M y Garven, G., 1992. Hydrologic Constraints on Petroleum Generation Within Continental Rift Basins: Theory and Application to the Rhine Graben. **Am. Ass. Petrol. Geol. Bull.**, Vol. 76, No. 4, pp. 468-488.
- Pindell, J. L., 1985. Alleghenian Reconstruction and Subsequent Evolution of the Gulf of Mexico, Bahamas, and proto-Caribbean. **Tectonics**, Vol. 4, pp. 1-39.

## REFERENCIAS

- Racdeke, L. D.; Holguín, Q. N.; Haack, R. C. y Dahl, J. E., 1994. Petroleum Systems of Campeche Area. **First Joint AAPG/AMGP Research Conference**, "Geological Aspects of Petroleum Systems", Mexico.
- Ross, M. I. y Scotese, C. R., 1988, A Hierarchical Tectonic Model of the Gulf of Mexico and Caribbean Regions. **Tectonophysics**, Vol 135, pp. 139-168.
- Royden, L.; Slater, J.G. y VonHerzen, P., 1980. Continental Margin Subsidence and Heat Flow: Important Parameters in Formation of Petroleum Hydrocarbons. **Am. Ass. Petrol. Geol. Bull.**, Vol. 64, No.2, pp. 173-187.
- Salvador, A., 1987. Late Triassic-Jurassic Paleogeography and Origin of Gulf of Mexico Basin. **Am. Ass. Petrol. Geol. Bull.**, Vol. 71, No.4, pp.419-451.
- Salvador, A., 1991 (a). The Gulf of Mexico, Introduction. **Geol. Soc. of Amer.**, The Geology of North America, Vol. J, pp. 1-12.
- Salvador, A., 1991 (b). The Gulf of Mexico, Triassic-Jurassic. **Geol. Soc. of Amer.**, The Geology of North America, Vol. J, pp. 131-180.
- Salmerón, U. P.; Omaña, P. L.; Salazar, M. G.; Gomez, P. J. A.; González L. S.; Lugo, R. J. E.; Díaz, P. A. y Landeros S. R., 1991. Biostratigrafía del Neógeno en la Planicie Costera y Plataforma Continental del Sudeste de México. **Inst. Mex. del Petrol.**, Proyecto CAO-5509 (Inédito).
- Santiago, A. J.; Carrillo, B. J. y Martell, A. B., 1984. Geología Petrolera de México. Evaluación de Formaciones en México, **Schlumberger**, pp.1-3 - 1-36.
- Schlager, W., 1991. Paradox of Drowned Reefs and Carbonate Platforms. **Geol. Soc. of Amer Bull.**, Vol. 92, pp. 197-211.
- Schoellkopf, N. B.; Atallah, C. A.; Friend, S. R.; Campos, M. M.; Racdeke, L. D. y Haack, C. R., 1994. Timing of Generation and Migration in Campeche Basin. **First Joint AAPG/AMGP Research Conference**, "Geological Aspects of Petroleum Systems", Mexico.
- Slater, J. G. y Christie, P. A. F., 1980. Continental Stretching: an Explication of the post-Mid Cretaceous Subsidence of the Central North Sea Basin. **Journal of Geophysical Research**, Vol. 85, pp. 3711-3739.
- Sohl, N. F.; Martínez, R. E.; Salmerón, U. P. y Soto, J. F., 1991. The Gulf of Mexico, Upperr Cretaceous. **Geol. Soc. of Amer.**, The Geology of North America, Vol. J, pp. 205-244.
- Sosa, P. A. A., 1994. Modelado de las Cuencas del Sureste de México asistido por "Software GENEX". **Sociedad Geológica Mexicana**, XII Convención Geológica Nacional, Resúmenes, pp. 174-175.
- Sosa, P. A. A. y Hegre, J., 1994. Modelado en GENEX de 36 Pozos de las Cuencas del Sureste de México. **PEMEX**, Informe, 74 p (Inédito).

REFERENCIAS

- Souquet, P., 1989. Structure et Dynamique de la lithosphère. Tectonique Globale. Volume 2. **Laboratoire de Géologie Sédimentaire et Paléontologie**, Toulouse, 200 p.
- Steckler, M. S. y Watts, A. B., 1978. Subsidence of the Atlantic-Type Continental Margin off New York. **Earth And Planetary Science Letters**, Vol. 41, pp. 1-13.
- Ungerer, P.; Burrus, J.; Doliguez, B.; Chenet, P. Y. y Bessis, F., 1990. Basin Evaluation by Integred Two-Dimensional Modeling of Heat Transfer, Fluid Flow, Hydrocarbon Generation, and Migration. **Am. Ass. Geol. Petrol. Bull.**, Vol. 74, No. 3, pp. 309-335.
- Ungerer, P.; Burrus, J.; Doliguez, B.; Chenet, P.Y. y Bessis, F., 1991. Évaluation des bassins par modélisation intégrée en deux dimensions des transferts thermiques, de lécoulement des fluides, de la genése et de la migration des hydrocarbures. **Revue de L'Institut Francais du Pétrole**, Vol. 46, No. 1, pp. 3-39.
- Vail, P. R.; Mitchum, R. M. Jr. y Thompson, S., III, 1977. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part Four: Global Cycles of the Relative Changes of Sea Level. **Am. Ass. Geol. Petrol. Memoir** 26, pp. 83-98.
- Valencia, I. J. J., 1993. Evolution Tectonique et Histoire Thermique de la Plateforme Valles San Luis Potosi (Mexique): Implications sur la Distribution des Hydrocarbures et des Gites Minéraux. **Université Paul Sabatier de Toulouse, France**. These. (Inédita).
- Van Hinte, J. E., 1978. Geohistory Analysis- Application of Micropaleontology in Exploration Geology. **Am. Ass. Geol. Petrol. Bull.**, Vol. 62, No. 2, pp. 201-222.
- Varela, S. M. M., 1995. Una Plataforma Aislada en el Sureste de México. **UNAM, Div. Est. Postgrado Fac. Ing.**, Tesis Maestría, 194 p. (Inédita).
- Viniegra, O. F., 1981. Great Carbonate Bank of Yucatan, Southern Mexico. **Jour. of Petrol. Geol.**, Vol. 3, No. 3, pp. 247-278.
- Watts, A. B. y Ryan, W. B. F., 1976. Flexure of the Lithosphere and Continental Margin Basins. **Tectonophysics**, Vol.36, pp. 25-44.
- Welte, D. H. y Yalcin, M. N., 1988. Basin Modelling- A New Comprehensive Method in Petroleum Geology. **Organic Geochemistry**, Vol. 13, Nos. 1-3, pp. 141-151.
- Welte, D. H. y Yukler, M. A., 1981. Petroleum Origin and Accumulation in Basin Evolution - a Quantitative Model. **Am. Ass. Petrol. Geol. Bull.**, Vol. 65, No. 8, pp. 1387- 1396.