

Campos gigantes de finales de los 80 asociados con subducción tipo "A" en Suramérica

Bernard Duval¹, Carlos Cramez¹ y Gustavo Valdés²

¹Total S.A.

Centro Profesional Eurobiling Piso 8, Oficina 8-G Urb. Chuao Caracas 160, Venezuela

²Petroleos de Venezuela S.A.

Apartado Postal 169, Caracas 1010-A, Venezuela

Resumen

Los cuatro campos petrolíferos gigantes, Caño Limón-Guafita, Ceuta-Tomoporo, El Furrial y Cusiana, descubiertos a finales de los 80 en la región norte de Suramérica, son reconocidos como alimentados por la misma roca madre (sedimentos arcilloso-calcáreos transgresivos asociados con la superficie basal de progradación del ciclo eustático de 1er. orden post-Pangea). Aún cuando el contexto actual de estos campos aparenta ser de antefosa, los sistemas petrolíferos más importantes de tres de ellos (Caño Limón-Guafita, Ceuta-Tomoporo y Cusiana) están asociados con un contexto geológico de cuencas antiguas detrás del arco, mientras que El Furrial está asociado a un antiguo margen divergente. Para los primeros, la existencia de fallas antiguas de ángulo alto reactivadas y la proximidad de altos estructurales viejos, constituyen los factores claves para una exploración exitosa, mientras que los altos estructurales recientes, los sellos sobrepresurizados y las rampas laterales eficientes son los factores claves en el área de El Furrial.

Abstract

The Caño Limón, Guafita, Ceuta-Tomoporo, El Furrial y Cusiana giant fields were discovered in the northern region of South America at the end of 80's. It has been proved that all hydrocarbon accumulated in those fields was generated by the same source rock (shaly-calcareous transgressive sediments associated to the prograded basal surface of the post-Pangea first order eustatic cycle).

Although the present context for these fields is associated to a foredeep, the petroliferous systems of Caño Limón, Guafita, Ceuta-Tomoporo and Cusiana are associated to a geological environment of ancient basins inside the arc while El Furrial is associated to an ancient divergent margin. For the first three mentioned fields the most promising features for a successful exploratory campaign are the presence of reactivated ancient faults of high angle and the

proximity to ancient structural highs. In the case of El Furrial, the overpressured seals, the efficient lateral ramps and the recent structural highs are the key features.

Introducción

Al momento de la nacionalización de la industria petrolera venezolana en 1976, el potencial hidrocarburífero remanente era de muy poca cuantía, puesto que la mayoría de las trampas más obvias habían sido ya perforadas. El descubrimiento de cuatro campos gigantes en la región norte de Suramérica, en los últimos diez años, ha probado cuán equivocado estuvo tal juicio (Fig. 1):

1. El campo de Caño Limón-Guafita fue descubierto por Occidental-Corpoven /1983-1984.
2. El campo Ceuta-Tomoporo fue descubierto por Maraven y está hoy anexado al antiguo campo de Ceuta/1984-1986.
3. El campo El Furrial fue descubierto por Lagoven y extendido hacia el oeste en los campos Carito y Tejero, por Corpoven/1985-1986.
4. El campo de Cusiana fue descubierto por un consorcio internacional conformado por las empresas BP, TOTAL y TRITON/1988-1990.

Se nota que todos estos campos están situados en la parte más al norte de la gran subducción regional de tipo "A" que subraya el límite oriental de la cordillera Suramericana (Fig. 1).

Las reservas de esos campos son confiden-

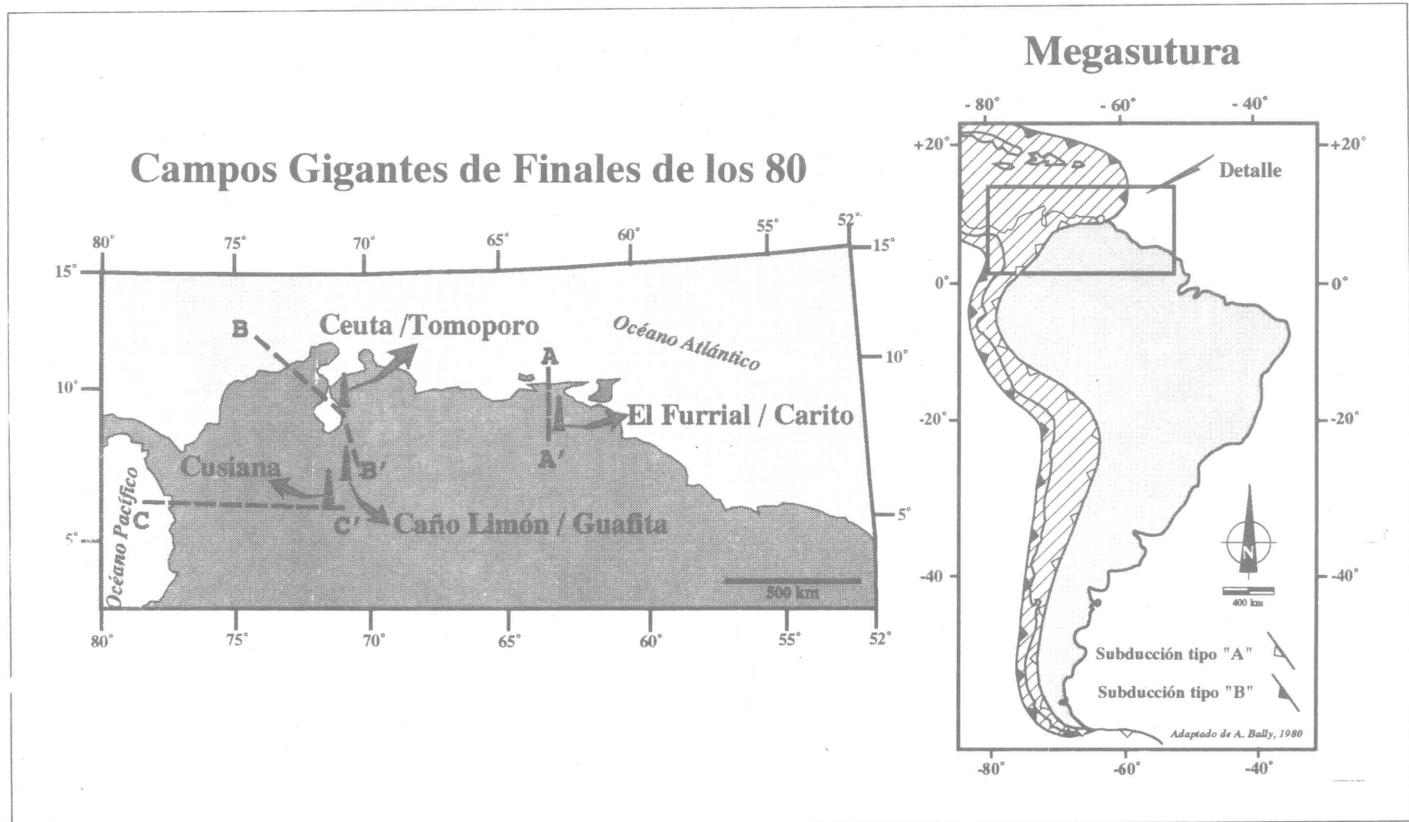


Figura 1.

En el margen norte de América del Sur fueron descubiertos cuatro campos gigantes, en el transcurso de los últimos 10 años: El Furrial-Carito, Ceuta-Tomoporo, Caño Limón-Guafita y Cusiana. Los dos primeros están localizados en territorio venezolano mientras que Caño Limón-Guafita se presenta a ambos lados de la frontera (Río Arauca) y Cusiana está situado en Colombia. Estos descubrimientos están asociados con la formación de la megasutura Meso-Cenozoica, en particular con la zona de subducción tipo "A".

Para un mejor entendimiento del contexto geológico global, se presentan 3 cortes geológicos: (i) A-A' que atraviesa El Furrial, comienza en la Faja del Orinoco y termina en el Arco de La Blanquilla; (ii) B-B' que comienza al Este de Barinas, atraviesa el campo de Ceuta-Tomoporo y termina en la cuenca "delante del arco", al norte del complejo de Santa Bárbara; (iii) C-C' que atraviesa el campo de Cusiana, comienza en los Llanos Colombianos, cruza las diferentes cordilleras y termina en la cuenca *delante del arco* actual.

Tamaño Relativo de los Campos Gigantes

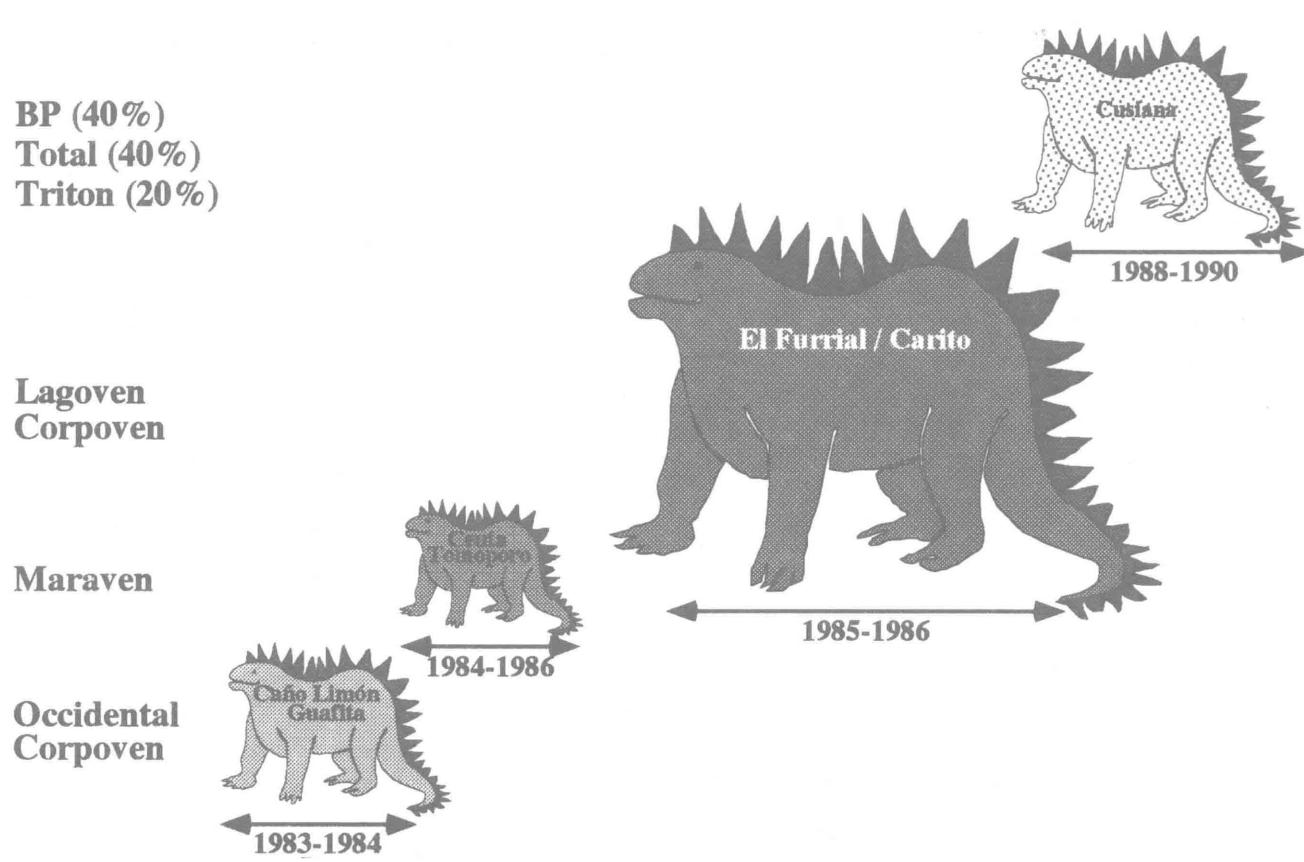


Figura 2

Las reservas de los últimos cuatro campos gigantes descubiertos en el norte de Suramérica, son confidenciales o bien están en evaluación. El tamaño de los dinosaurios representa de forma comparativa las dimensiones de las reservas. Estos descubrimientos han demostrado la invalidez de las bajas predicciones del potencial remanente de petróleo, hechas por ciertas empresas petroleras al momento de la nacionalización de la industria venezolana (1976).

ciales o no están completamente definidas. Sin embargo, los tamaños relativos de los dinosaurios en la figura 2, pretenden mostrar su importancia en dimensión. El objetivo de este trabajo es ilustrar nuestra visión, de como los estudios regionales pueden ayudar a:

- Entender los sistemas petrolíferos,
- Establecer semejanzas y diferencias entre los mismos, y
- Explicar el porqué de la ocurrencia de los campos gigantes.

A tal efecto, primero se analizan los sistemas en cada región considerada: Venezuela Oriental, Venezuela Occidental, Piedemonte Colombiano y áreas relacionadas. Después se estudian sus

semejanzas y diferencias. Finalmente, como conclusión, se resumen los factores petrolíferos claves y se describen las aplicaciones prácticas para la exploración.

Venezuela Oriental

La sección A-A' está localizada en Venezuela Oriental (Fig. 3), a través del campo El Furrial-Carito. La misma muestra que el ciclo estratigráfico de 1er. orden post-Pangea (Duval et al. 1992), está compuesto en tiempo y espacio por el apilamiento de varias cuencas sedimentarias que controlan los sistemas petrolíferos. Estas cuencas son de más antigua a más joven:

- Cuenca de tipo rift de edad Triásico-Jurásico.
- Un craton y un margen continental divergente del tipo Atlántico de edad Cretácico Temprano-Neogeno.
- Una cuenca de antefosa al norte del área de Oficina, activa desde el Neogeno.
- Una cadena plegada al norte del área de Morichito que tuvo su origen a partir del Mioceno Tardío/Plioceno.

Es importante notar que las fallas normales originadas durante la extensión de la corteza continental, como muestra la interpretación de la línea sísmica de la figura 3, estuvieron activas solamente durante la formación de la cuenca rift.

Sin embargo, las fallas inversas de Pirital y Turiquimire son consideradas más jóvenes que la falla El Furrial (Roure et al. 1994). Ellas son interpretadas como una reactivación plio-pleistocena de las fallas normales del Jurásico, como respuesta a una importante pérdida de la presión geostática, consecuencia de la erosión de la Serranía del Interior de Venezuela Oriental.

El campo de El Furrial-Carito está localizado por debajo del corrimiento de Pirital en el piedemonte soterrado de la Serranía del Interior de Venezuela Oriental (Aymard et al. 1988). La configuración estructural del principal yacimiento de El Furrial se muestra en el mapa de profundidades simplificado (Fig. 4). Los diferentes bloques fallados están individualizados por corrimientos y su rampas laterales asociadas, lo cual implica la presencia de planos de despegue someros, que separan los sedimentos deformados subyacentes. Nótese que la extensión longitudinal de este complejo estructural excede los 50 kilómetros.

La línea sísmica en dirección del buzamiento (Fig. 5, arriba) muestra las fallas miocenas de ángulo bajo horizontalizándose en la superficie de despegue, así como la falla de ángulo alto de Pirital. Las rampas laterales de los corrimientos se identifican claramente en las líneas sísmicas paralelas al rumbo de la estructura (Fig. 5, abajo). La interpretación geológica muestra las características siguientes:

1. La falla profunda de ángulo alto de Urica, correspondiente a un antiguo complejo de fallas normales que afecta al Paleozoico y al

basamento.

2. La superficie de despegue que separa los sedimentos acortados suprayacentes de los sedimentos no deformados infrayacentes.
3. Los bloques fallados y levantados de los corrimientos; ellos constituyen las trampas estructurales del alineamiento de El Furrial.
4. Las rampas laterales.
5. Las zonas "triangulares" entre las sucesivas fallas de corrimiento (Roure et al. 1994). Incidentalmente, su existencia explica la ausencia de yacimientos en algunos sectores.

Referente a los subsistemas de migración y entrampamiento podemos señalar que en Venezuela Oriental, el acortamiento es principalmente "en secuencia" (Carnevali 1988), y la gran mayoría de los puntos altos estructurales han estado siempre altos. No hay inversión tectónica antes del Plioceno, de manera que la posibilidad de varias fases de expulsión de las rocas generadoras potenciales no es en forma alguna una limitación, sino por el contrario, esto aumenta las posibilidades de grandes acumulaciones.

Si se observa cronológicamente el desarrollo de los parámetros petrolíferos poniendo de lado el acortamiento de los sedimentos, vemos lo siguiente:

- Una roca madre prolífica del Cretácico medio-Tardío, así como los yacimientos clásticos relacionados con el margen divergente. Esta roca madre tiene una extensión regional y el petróleo de los otros yacimientos que se van a descubrir luego se originó en la misma.
- Un magnífico sello, las arcillas subcompactadas de la Formación Carapita (Oligo-Mioceno), depositadas en gran parte durante la cuenca de "antefosa".
- Una fase de expulsión de hidrocarburos de la parte más profunda de la cuenca, que posiblemente ocurrió antes del acortamiento mioceno. Sin embargo, en razón de la baja impedancia del sistema (ausencia de trampas) en esa época, no hubo entrampamiento en el área de El Furrial, sino migración buzamiento arriba, hacia el sur, en el suave monocinal que se extendía hacia la región que hoy constituye la Faja del

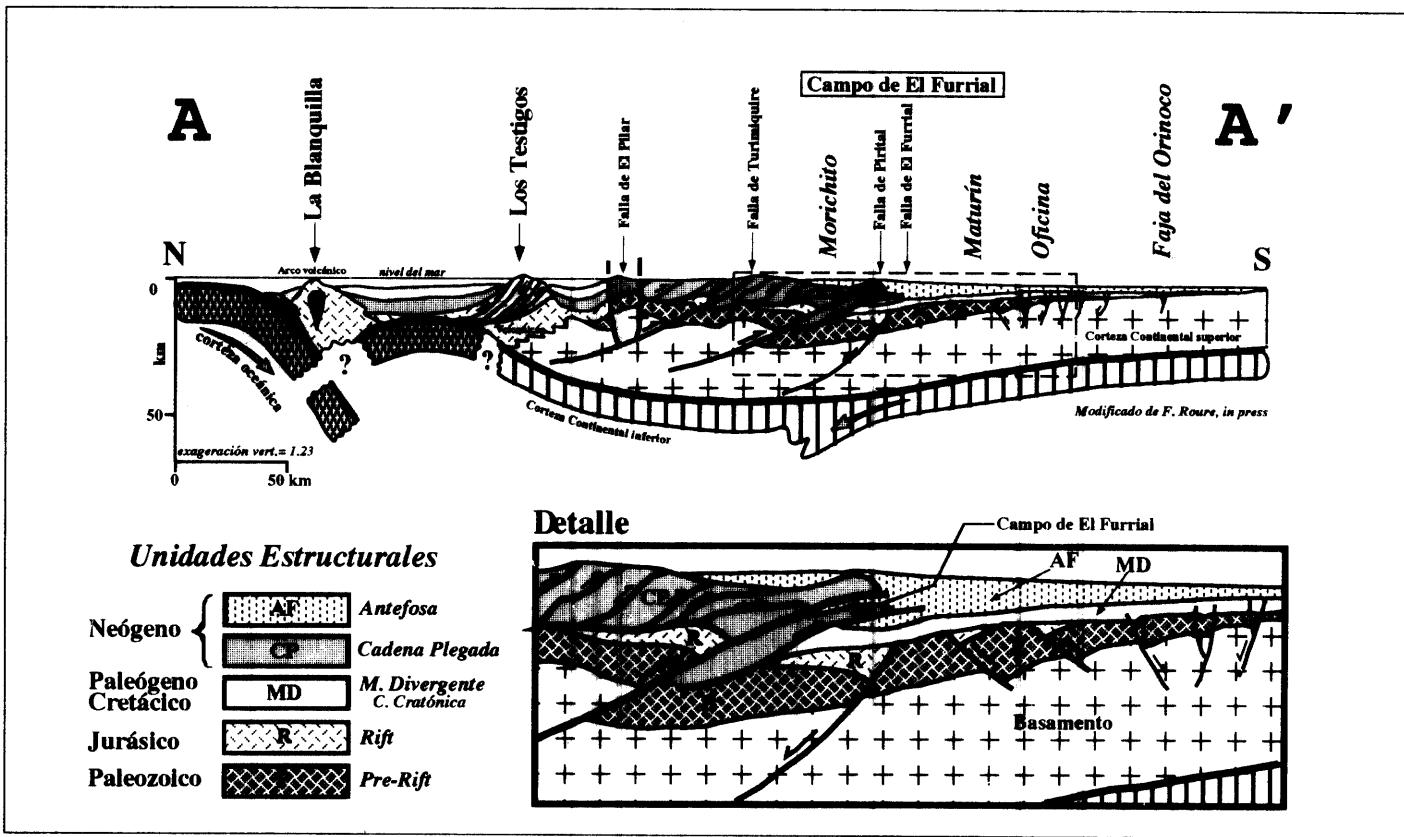


Figura 3

Este corte pone en evidencia, por encima del substrato precámbrico-paleozoico, varias cuencas sedimentarias superpuestas o apiladas en el espacio y en el tiempo. De abajo hacia arriba, reconocemos: (i) las cuencas Jurásicas de tipo Rift, (ii) una cuenca cratónica y un margen divergente tipo Atlántico de edad Cretácico-Paleógeno, (iii) una cuenca de anfetosa de edad Paleógeno-Neógeno y, (iv) una cadena plegada reciente compuesta por sedimentos de todas las edades. Nótese que: (a) los sedimentos están deformados por dos acortamientos mayores; el primero en secuencia por encima de un plano de despegue del cabalgamiento y el segundo por la reactivación de antiguas fallas normales Jurásicas, de las cuales, la falla de Pirital es el más claro ejemplo; (b) el campo de El Furrial, por debajo de la falla de Pirital, está asociado con el primer acortamiento; (c) la falla de Pirital, más reciente en su configuración actual que la falla de El Furrial, involucra el basamento y está asociada con el segundo acortamiento; (d) las fallas normales del área de Oficina están asociadas con la subsidencia flexural de la cuenca de antefosa; (e) las fallas de corrimiento del complejo de El Pilar se enraízan en las fallas inversas de la última fase de acortamiento.

Orinoco (Demaison et al. 1991).

- El acortamiento causado por el fallamiento de ángulo bajo, sin intervención del basamento, ocurrió durante el Neogeno, creando las trampas antes descritas.
- No se observa inversión tectónica y la migración lateral prevalece en la medida en que la sobrecarga de sedimentos en la antefosa reactiva la expulsión de hidrocarburos en el Neogeno tardío.

Las características generales y una propuesta cronológica simplificada son presentadas en la tabla I.

En resumen tenemos:

1. Un margen divergente y un sello sobrepresurizado.
2. Acortamiento en secuencia, de ángulo bajo y migración lateral.
3. No ocurre inversión, de manera que los altos permanecieron como tales, y la cronología de la migración tardía no es tan crítica.

Venezuela Occidental

La sección B-B'(Fig. 6) que atraviesa el campo Tomoporo, en Venezuela Occidental, muestra que el lago de Maracaibo y las áreas adyacentes realmente corresponden a la superposición de dos cuencas sedimentarias mayores:

- Una cuenca mesozoica detrás del arco suprayaciendo los sedimentos paleozoicos pre-Pangea y,
- Una cuenca de antefosa del Neogeno.

Estas cuencas son fácilmente reconocibles en las líneas sísmicas unidas en una sola línea regional e interpretadas en la figura 7, en donde se puede ver:

- a. La cuenca detrás del arco, ubicada entre las discordancias del Herciniano y del Eocene.
- b. La cuenca de antefosa, mostrando en la actualidad una geometría completamente invertida, por encima de la discordancia del Eocene (SB 39,5 Ma).
- c. Gigantescos depocentros de edad Eocene

(en el lado derecho de la línea), asociados con el régimen extensional que tuvo lugar durante el Terciario temprano.

- d. Las espectaculares inversiones tectónicas relacionadas con un acortamiento multifásico y creadas por la reactivación de las fallas normales de edad Jurásico y Eocene.

Como un ejemplo, nótese que los ejes de los altos estructurales del Eocene temprano, ubicados entre las fallas de Urdaneta y Pueblo Viejo, que representan la continuación hacia el norte del Arco de Mérida (Zambrano et al. 1971), se transformaron progresivamente y durante el desarrollo de la cuenca de antefosa, en zonas estructurales bajas.

El campo Ceuta-Tomoporo (Ramirez et al. 1990) es representativo del tipo de trampa estruc-

Mapa Estructural del alineamiento El Furrial-Carito

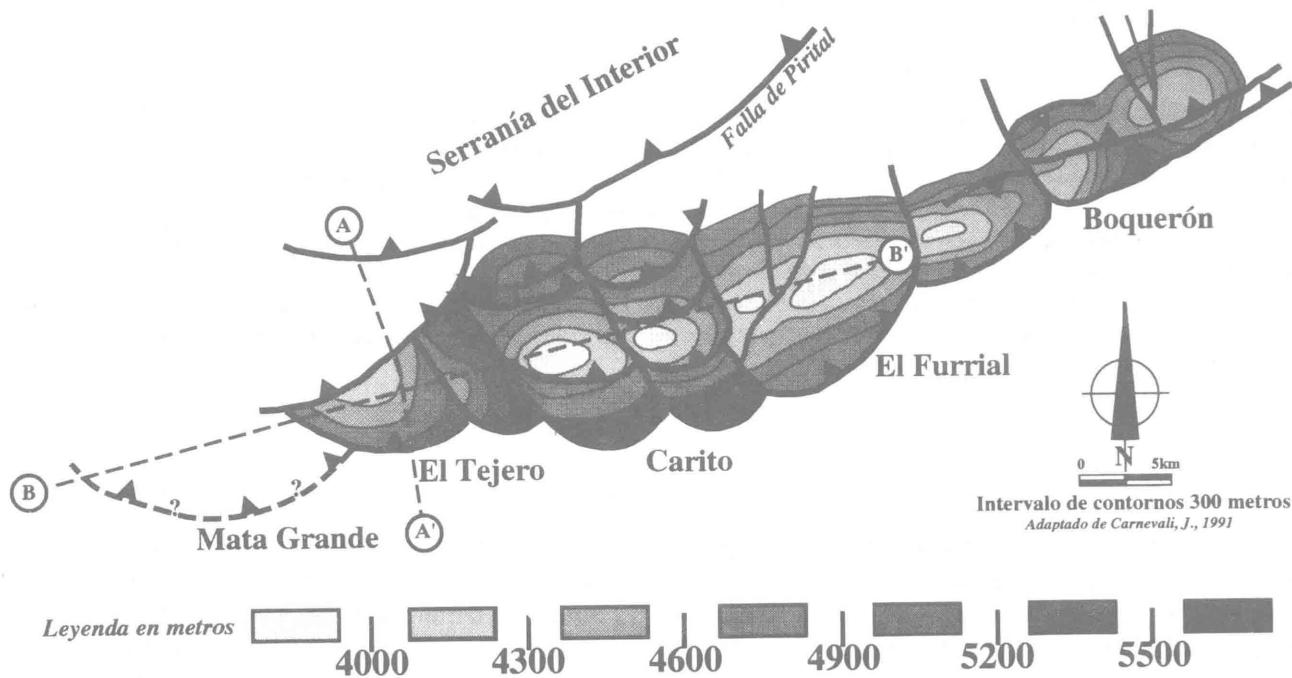


Figura 4

El mapa estructural en el tope de la Formación Merecure (SB.25.5 Ma) ilustra la complejidad tectónica del alineamiento de "El Furrial-Carito". El acortamiento, de edad Mioceno Superior (complejo del El Furrial), ocurre por fallas inversas lístricas, de ángulo muy bajo, con rampas laterales de dirección NO-SE, las cuales individualizan diferentes unidades productoras: El Furrial, Carito, El Tejeró y Boquerón. La falla de Pirital, asociada con la última fase del acortamiento (Plio-Pleistoceno), tiene una geometría menos lístrica, es decir, más rectilínea, puesto que su buzamiento y vergencia son aquellos de las antiguas fallas normales de los rifts jurásicos que fueron reactivadas. El trazo de la falla de Mata Grande es interpretativo.

Interpretación Estructural Del Alineamiento El Furrial - Carito

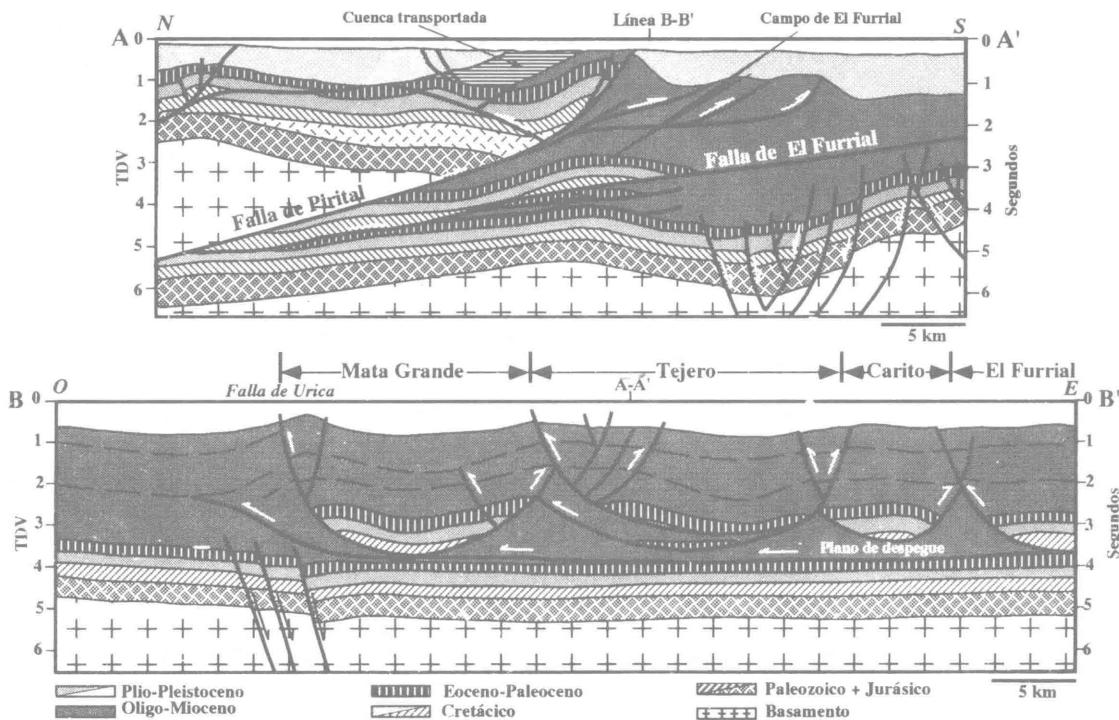


Figura 5

Interpretación geológica de las líneas sísmicas representativas del alineamiento estructural de El Furrial-Carito (ubicación en la figura 4). La línea perpendicular a la estructura de El Furrial (línea A-A') ilustra ambas fallas, la de El Furrial y la de Pirital. La primera está asociada al acortamiento en secuencia y la segunda a la reactivación plio-pleistocena de las antiguas fallas normales jurásicas contemporáneas al "rifting". El acortamiento asociado a la reactivación de las fallas jurásica afecta al Basamento; el ángulo del plano de falla en la falla de Pirital es bastante mayor que aquel de la falla de El Furrial. Nótese la cuenca transportada por encima de la falla de Pirital y las fallas normales asociadas a la subsidencia de la litósfera durante la formación de la cuenca de antefosa. La línea sísmica transversal (línea B-B') corta varios compartimientos del alineamiento.

Las rampas laterales, claramente apreciables, definen las zonas triangulares por encima del plano de despegue. Señalamos que la falla de Urica corresponde a la rampa lateral de la falla Tácata-Mata Grande; probablemente ella está asociada a una antigua zona de fallas normales profundas que se prolonga al sur del alineamiento de El Furrial.

tural que se encuentra en las cuencas detrás del arco de Suramérica. El mapa en profundidad del Paleoceno (Fig. 8), derivado de sísmica 3D, ilustra la reactivación de las fallas jurásicas N-S, así como las fallas sincrónicas de transferencia. Las fallas norte-sur pre-existentes fueron reactivadas durante los regímenes tectónicos compresivos porque ellos son perpendiculares a la dirección de máximo esfuerzo compresivo efectivo. No es el caso de las fallas de transferencia cuando ellas son de la misma dirección (o paralelas) que σ_2 , o del esfuerzo efectivo máximo (Letouze 1990).

Esta reactivación inversa es evidente en todas las líneas sísmicas orientadas este-oeste (Fig. 9, izquierda), las cuales cruzan el levantamiento estructural del campo Ceuta.

Una sección sísmica a través del campo Tomoporo (Fig. 9, derecha), ilustra la combinación de una trampa estructural extensional, fallas de transferencia orientadas este-oeste (Roberto et al. 1988) y la presencia de arenas eocenas, la cual facilitó el entrampamiento de una gruesa columna de hidrocarburos. El crudo relativamente pesado (cerca de 20° API), acumulado en niveles

estratigráficos superiores, se entrampó posiblemente después de la compresión y está relacionado con el basculamiento de la cuenca.

Resumiendo algunos de los parámetros petrolíferos de importancia tenemos:

- En el contexto de cuencas detrás del arco, es frecuente una reactivación de fallas, tal como la descrita (Bally et al. 1980). Condiciones de alta impedancia existieron antes que ocurriera la compresión en el área de Maracaibo.
- El acortamiento multifásico ocurrió más tarde, causando fuertes inversiones estructurales, que a su vez dieron origen a trampas extensionales y compresionales, con predominio de fallamiento de ángulo alto.
- La expulsión y migración, tanto vertical como lateral, fueron posibles antes y después de la compresión.

Piedemonte Colombiano y áreas relacionadas

Desafortunadamente faltan datos para incorporar adecuadamente el campo Caño Limón/Guafita a este análisis, por eso se utilizaron principalmente las publicaciones referentes al mismo (Palmer et al. 1988; Mc Collough et al. 1990).

La sección C-C' (Fig. 10) que cruza la región central de Colombia a través del campo Cusiana es similar, en ciertos rasgos, a la previamente descrita. Todo se resume a que la Cordillera Oriental, el piedemonte colombiano y el Arco de Maracaibo, corresponden a la inversión tectónica del Neogeno de la cuenca cenomesozoica, detrás del arco, mediante la reactivación de las antiguas fallas jurásicas, tales como la falla que se ilustra en la figura 11.

El campo de Cusiana (Figs. 11, 12 y 13),

Corte Geológico Regional del Occidente de Venezuela

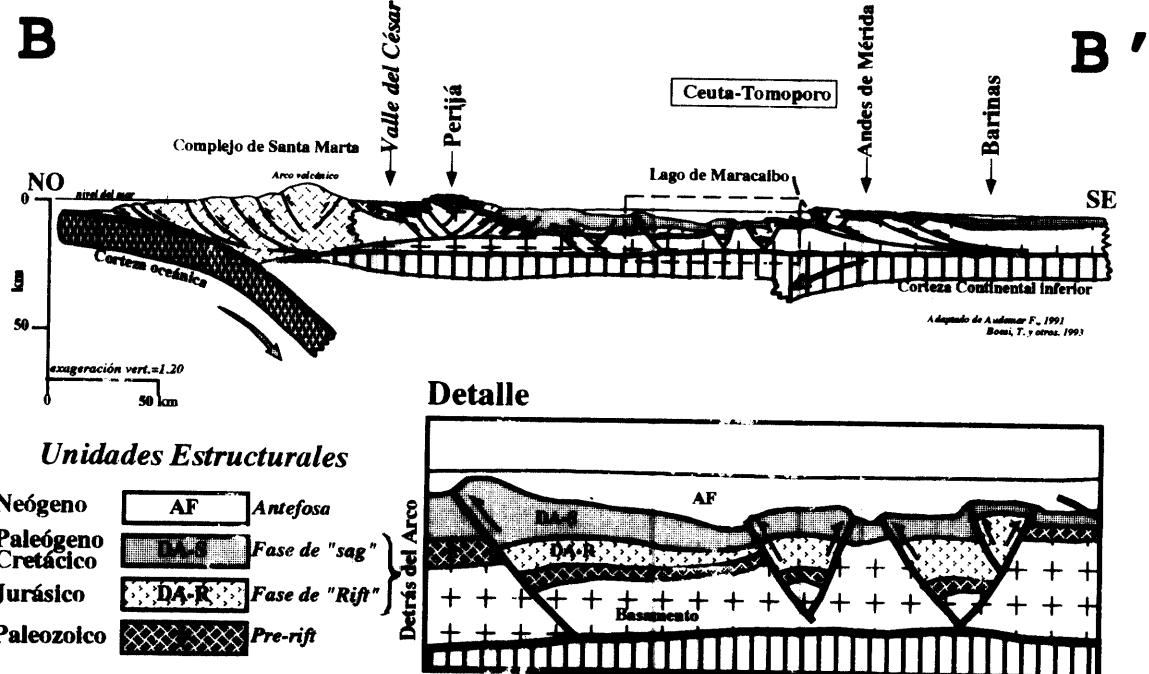


Figura 6

Este corte geológico comienza al Sureste en los Llanos de Barinas, atraviesa el campo de Ceuta-Tomoporo en el lago de Maracaibo y termina en la cuenca detrás del arco, al norte del complejo volcánico de Santa Bárbara. De abajo hacia arriba podemos distinguir: (i) una cuenca de detrás del arco y (ii) una cuenca de antefosa. Las fallas normales desarrolladas durante la fase de rift de la cuenca detrás del arco han sido reactivadas y transformadas en fallas inversas durante el tiempo de deposición de los sedimentos de antefosa, produciéndose magníficas inversiones tectónicas. Las reactivaciones de las antiguas fallas normales se producen durante las diferentes fases de acortamiento de los sedimentos durante el Cenozoico.

Línea sísmica compuesta a través del Lago de Maracaibo

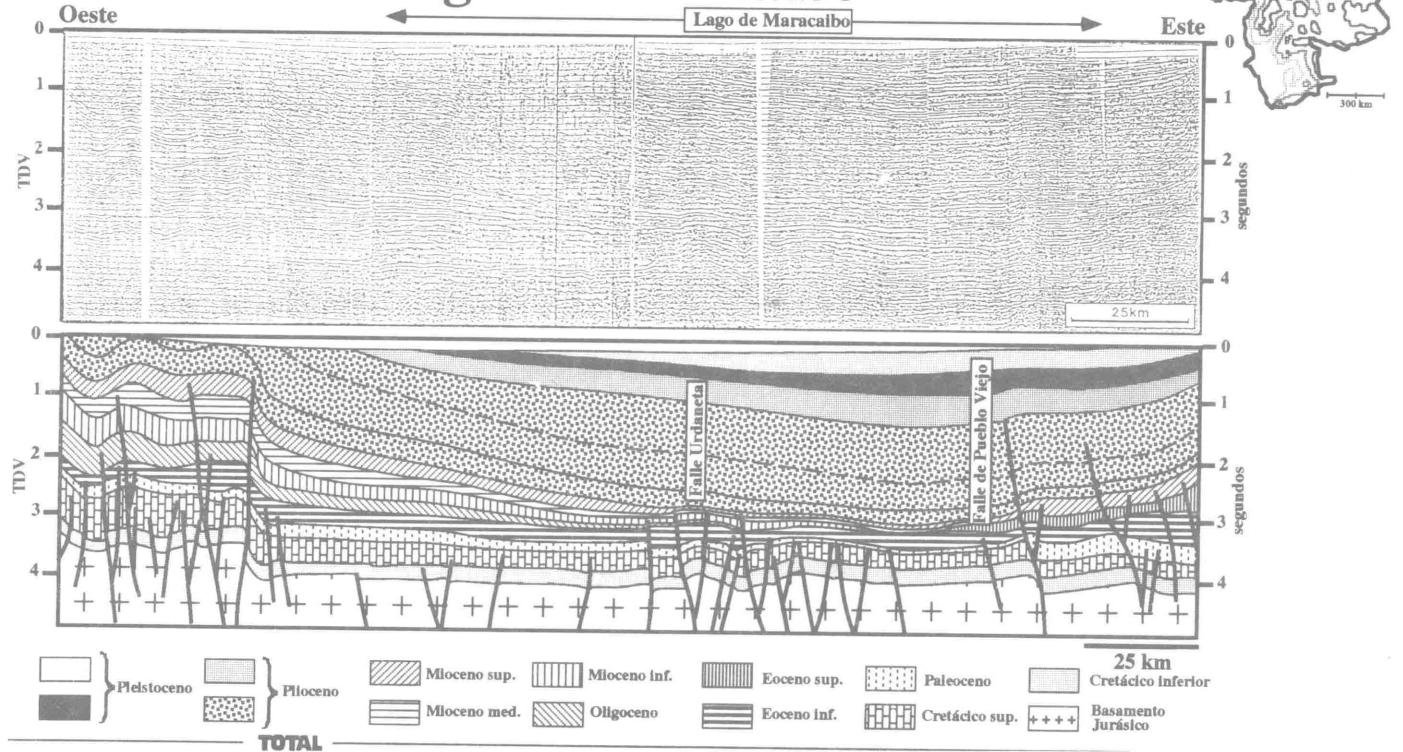


Figura 7

Esta interpretación de una línea sísmica compuesta a través del Lago de Maracaibo, muestra claramente que la región entre las fallas de Urdaneta y Pueblo Viejo, previo al acortamiento, correspondía a un eje estructuralmente alto. Por lo cual, los flancos habrían estado totalmente invertidos durante el Mioceno Tardío-Plioceno. Recalcamos que los yacimientos petrolíferos importantes están asociados a este antiguo eje alto. Nótese el ángulo alto de las fallas en ésta área, en oposición al ángulo de las fallas en el área de Furrial-Carito.

Leyenda

Mioceno-Plioceno

Oligoceno-Mioceno

Discordancia angular del Eoceno superior

Paleoceno-Eoceno

Tope de la Formación Guasare

Cretácico Superior-Paleoceno

Tope de la Formación La Luna

Cretácico Medio-Superior

Cretácico Inferior / Jurásico (?)

Pre-Cretácico

Mapa Estructural de Ceuta-Tomoporo

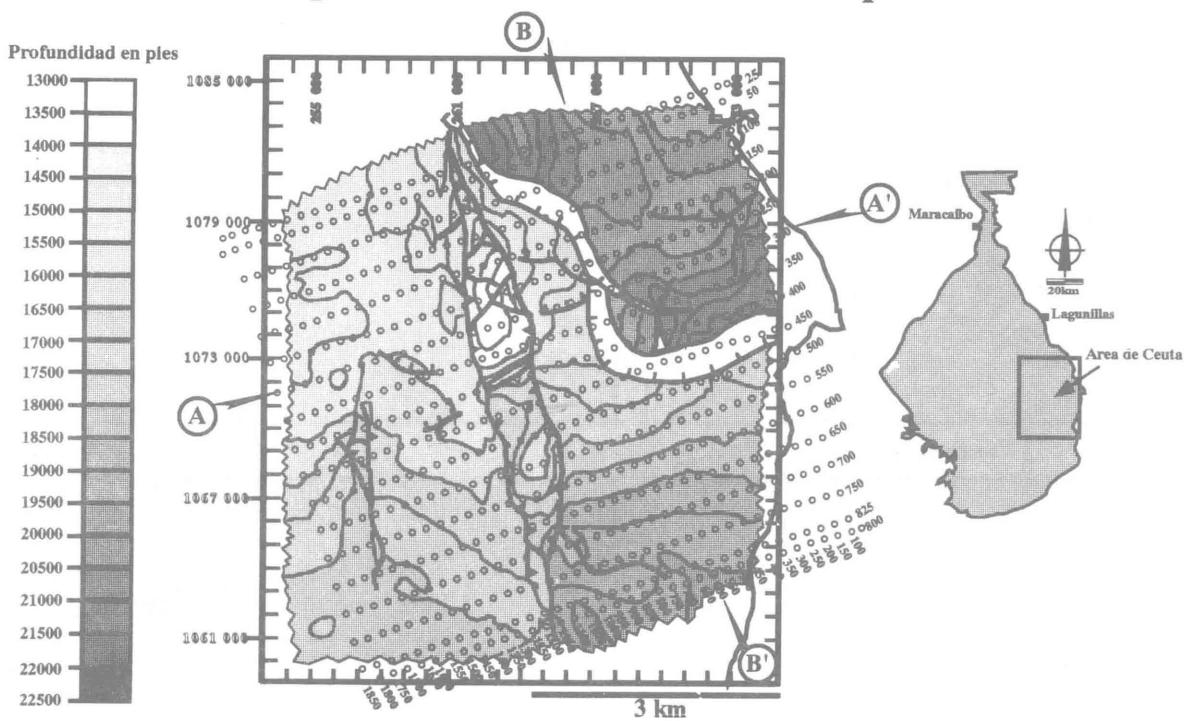


Figura 8

Este mapa (Isóbatas del límite de secuencia 54.5 Ma) corresponde más o menos al tope de la Formación Guasare. Dos sistemas de fallas pueden identificarse: (i) las de dirección norte-sur que tienen una geometría inversa y (ii) fallas de orientación general este-oeste que tienen una geometría normal y parecen asociadas a una importante extensión que tuvo lugar en el Eoceno medio. Varios yacimientos están asociados con estos sistemas. Nótese en el ápice de la estructura de Ceuta el desarrollo de pequeñas fallas de corrimiento, que elongan la estructura perpendicularmente a la dirección del esfuerzo compresivo efectivo máximo y la ubicación de las líneas sísmicas (A-A' y B-B') ilustradas en figura 9.

ubicado en el piedemonte colombiano, corresponde a un largo anticlinal asimétrico cuyo eje tiene un rumbo de N 30° -40° E, un área de cierre mayor a los 100 km² y una columna probada de hidrocarburos de 500 m. Esta gigantesca trampa estructural fue creada por reactivación de una falla normal preexistente, tal y como podemos ver en la figura 12.

La antigua falla normal con buzamiento hacia el oeste, fue completamente reactivada. No es posible identificar un punto nulo ("null point") a lo largo del plano de falla. La geometría a todo lo largo del mismo es una geometría de falla inversa de ángulo alto con involucramiento del basamento. Sin embargo, esto no se cumple para la falla normal con buzamiento hacia el este, en donde la geometría del plano de falla cambia por debajo del punto nulo ubicado en la porción inferior del plano de falla.

Postulamos una fase temprana de acorta-

miento que ubica en sitio los altos estructurales, permitiendo el entrampamiento de los hidrocarburos desde la primera fase de expulsión; en otras palabras, largo tiempo antes de los grandes episodios de tectónica compresional.

La hipótesis de un acortamiento temprano por reactivación de las fallas preexistentes es corroborada por la reconstitución geológica de las secciones regionales en profundidad, como las siguientes. En ella podemos ver que:

- Las fallas de Cusiana y del Yopal, pertenecen a diferentes sistemas.
- La estructura de Cusiana es una trampa compresional antigua, creada antes de la reactivación de las fallas del Yopal y Guaicaramo.
- El área de drenaje hacia la estructura de Cusiana, al tiempo de la primera migración de hidrocarburos, fue suficientemente gran

Líneas sísmicas 3D a través Ceuta-Tomoporo

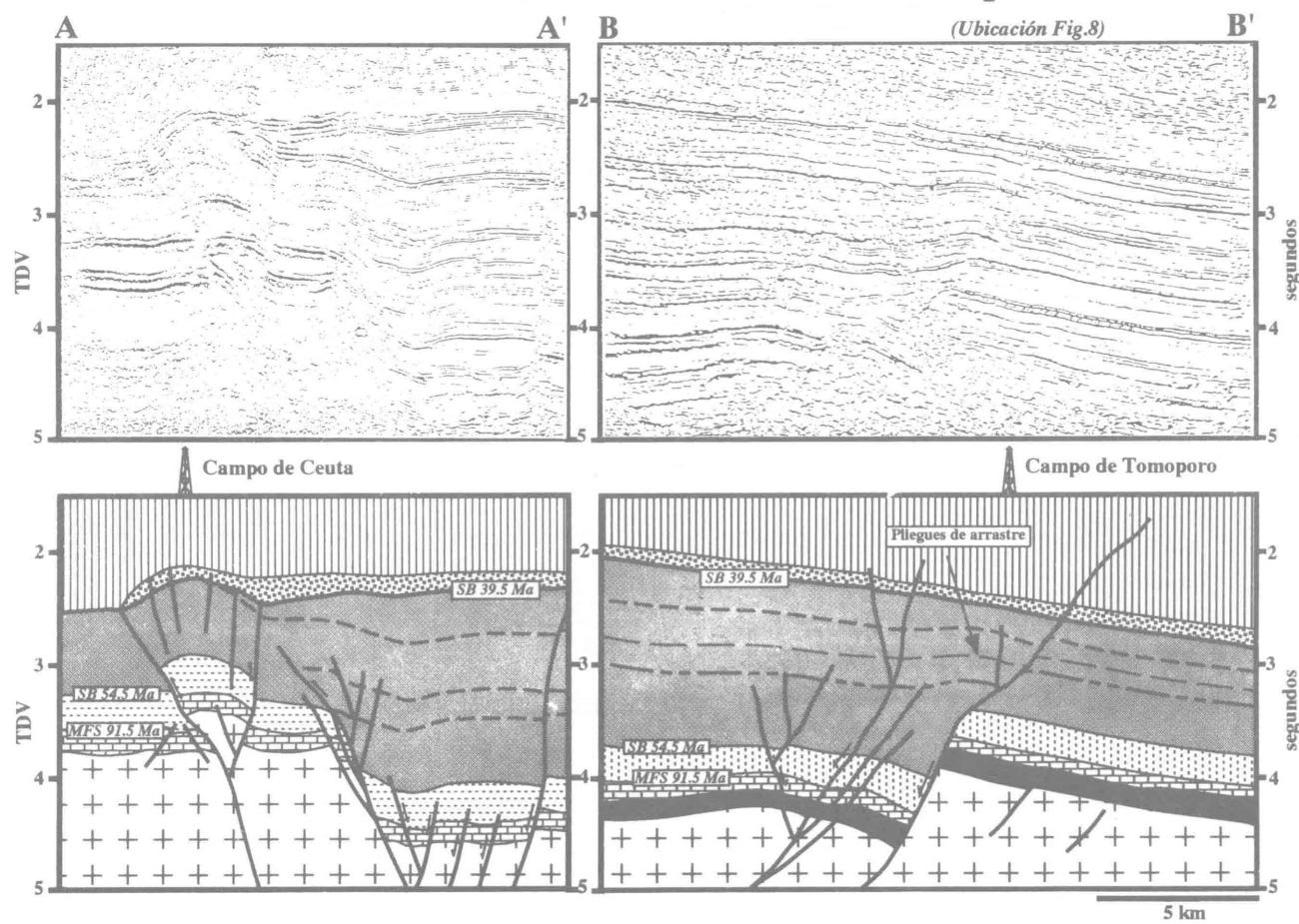


Figura 9

La interpretación de la línea sísmica 3D, A-A' de dirección OSO (izquierda) que atraviesa el campo de Ceuta y el flanco deprimido del campo de "Tomoporo", ilustra las inversiones tectónicas y el engrosamiento de los sedimentos eocenos. Este engrosamiento es causado por efecto de las fallas normales de dirección oeste-este, desarrolladas durante las fases tectónicas extensivas terciarias. El acortamiento de los sedimentos es el resultado de un régimen tectónico continuo y no episódico. Sin embargo, localmente, eventos tectónicos ocasionales e irregulares ocurren, dando lugar a discordancias angulares entre las cuales la SB 39.5 Ma es el mejor ejemplo. La interpretación de una línea sísmica perpendicular a las fallas asociadas a la extensión terciaria (derecha), muestra la importancia del engrosamiento de los sedimentos eocenos e ilustra el campo de Tomoporo. El entrampamiento de este campo está, en gran parte, ligado al movimiento de esas fallas que colocan en yuxtaposición los yacimientos con sedimentos que tienen una mayor "presión capilar de desplazamiento". Recalcamos que la migración de los hidrocarburos ocurre desde el sur. Por otra parte, es interesante señalar que existen igualmente hidrocarburos entrampados en los pliegues de arrastre en los bloques deprimidos, lo que implica que las fallas no siempre sellan. Los pliegues de arrastre son estructuras extensivas no asociadas a la inversión tectónica; el ángulo entre el esfuerzo efectivo máximo y la dirección de estas fallas es muy pequeño.

de para desarrollar la gigantesca acumulación.

- d. La trampa de Cusiana no fue destruida por los acortamientos tectónicos tardíos.
- e. Una explosión de hidrocarburos en el Neogeno.

Aun cuando la expresión estructural de Cusiana luce más compleja, en razón del reciente

tectonismo andino, no es muy diferente de otras estructuras formadas en el contexto detrás de arco, tal como se describiera previamente en el texto. Los parámetros petrolíferos del área de Cusiana son significativamente similares a los descritos para el área de Maracaibo. Así, se mencionan algunos puntos de interés particular:

- a. La eficiencia del espeso sello oligoceno-

Corte Geológico Regional de Colombia

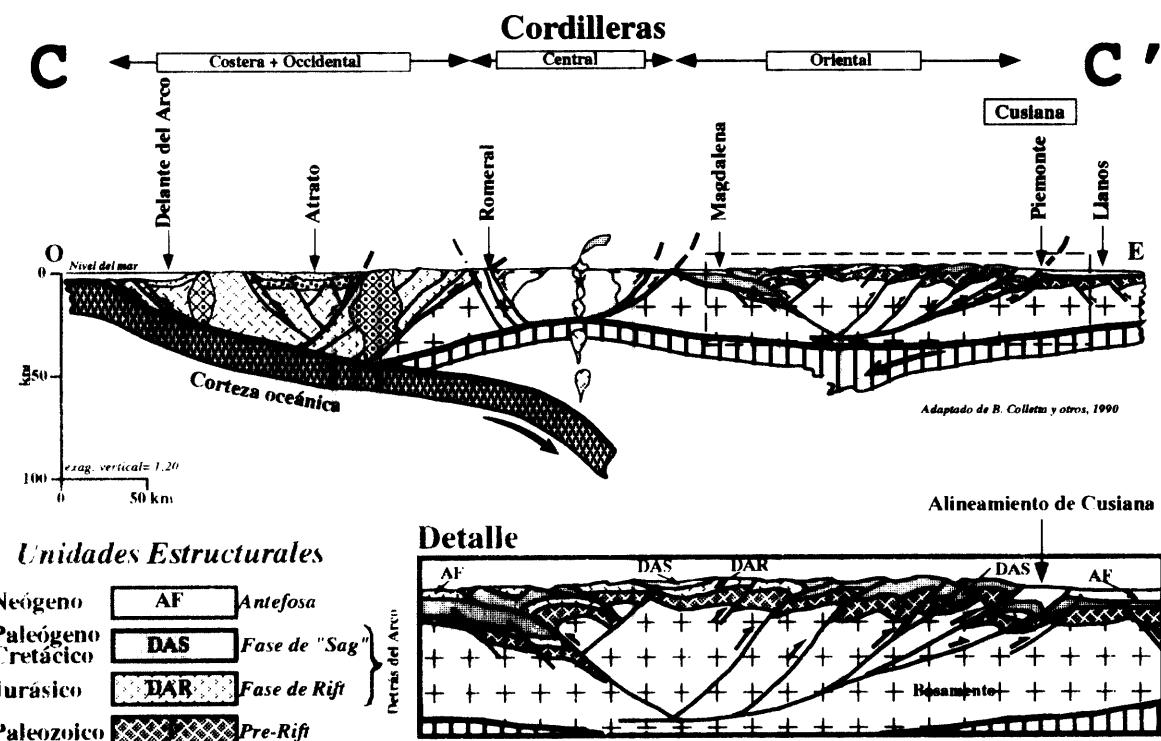


Figura 10

Este corte a través de las cordilleras colombianas y de los Llanos hasta la cuenca detrás del arco actual, ilustra la inversión de los sedimentos pre-rift y de la cuenca detrás del arco. Esta inversión tectónica ocurre por reactivación de antiguas fallas normales. Diferente al corte que pasa por el campo de El Furrial, todas las fallas se enraízan en el basamento y los planos de fallas son relativamente poco inclinados.

mioceno de las formaciones Carbonera y León.

b. Los biomarcadores y otras características del crudo confirman dos períodos de carga: una temprana y otra tardía.

c. El acortamiento multifásico que tuvo lugar durante el Paleoceno-Neogeno, está sustentado por hiatos estratigráficos observados. Este punto no está tan bien controlado como lo está en el área de Maracaibo, debido a la baja densidad de los datos existentes. Las correlaciones más detalladas se harán disponibles en la medida en que progresen los trabajos del área.

d. Si la mayoría de los campos descubiertos en el piedemonte andino están asociados con trampas de origen compresivo, las observaciones resumidas arriba sugieren que la ubicación de las grandes reservas está directamente asociada con la proximidad de

áreas positivas existentes antes de la compresión.

Semejanzas y diferencias

Aún cuando se reconoce que (en una aproximación regional) los cuatro campos mencionados son alimentados por la misma roca madre, tres de ellos están asociados con cuencas detrás del arco mientras que uno (El Furrial) está asociado con un margen divergente. Este contexto geológico regional (Fig. 14), reconstruido en tiempo previo a la compresión, explica las diferencias y semejanzas, principalmente desde el punto de vista estructural entre los nuevos gigantes de Venezuela y Colombia.

Dos familias de sistemas petrolíferos están claramente definidas y pueden ser de utilidad para establecer los criterios de selección de localizaciones en búsqueda de depósitos similares. Estos criterios inclu-

Mapa Estructural del Campo de Cusiana

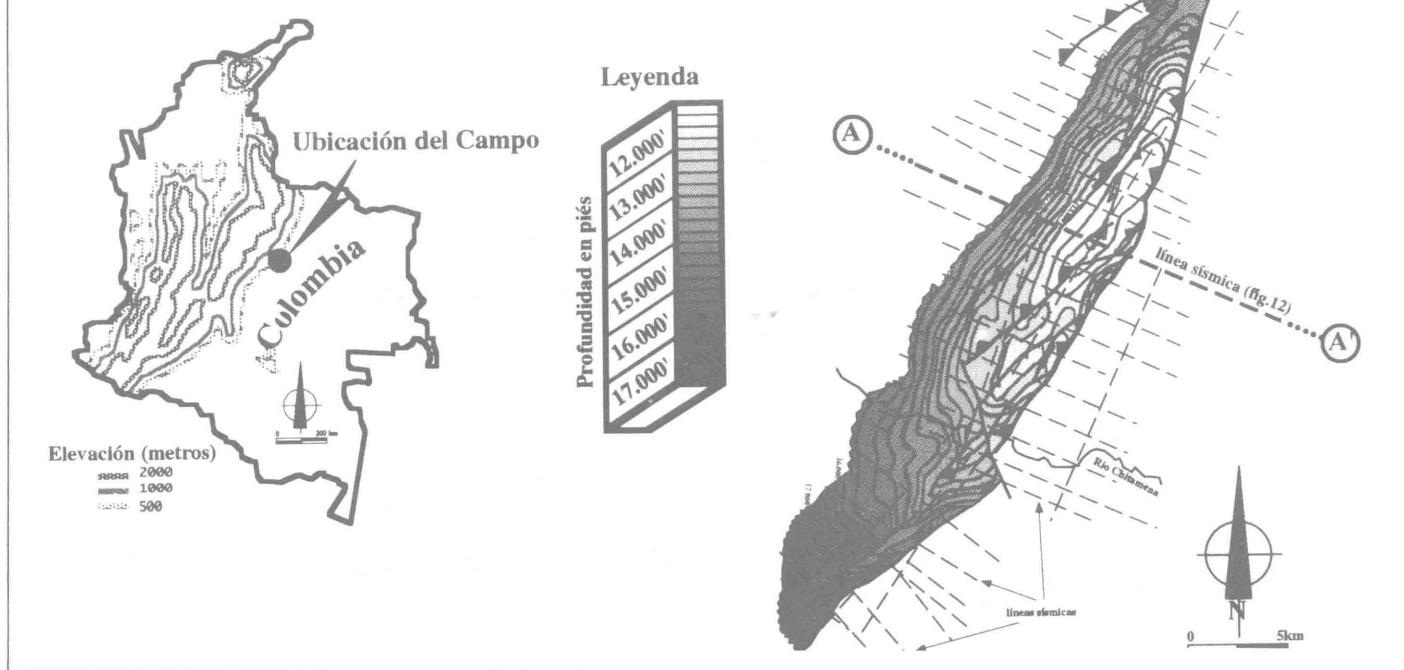


Figura 11

La estructura de Cusiana, aquí ilustrada por el mapa en profundidad del tope de la Formación Mirador, corresponde a un anticlinal de dirección NNE-SSO desarrollado en el bloque levantado de una falla inversa que corresponde en profundidad a la reactivación de una antigua falla normal. Una falla de transferencia parece dividir la estructura en dos bloques, uno al norte y el otro al sur del Río Chitemena.

yen: (i) el contexto regional (ii) el tipo de fallamiento involucrado en el mecanismo de entrampamiento y (iii) la posibilidad de un acortamiento multifásico.

Conclusiones

Se obtuvieron cuatro conclusiones mayores del presente estudio:

1. Los criterios no deben definirse sólo en términos del contexto "cinturones plegados" en contraposición con "plataforma" como conclusión convencional, sino también en términos del contexto de cuencas "detrás el arco" en contraposición con "margen divergente". De todas formas se confirma que una visión regional es sumamente importante para la comprensión de los diferentes sistemas.

2. Los factores claves que determinan la presencia de campos gigantes en cuencas

detrás el arco son:

- 2.1 La existencia de fallas antiguas de ángulo alto, reactivadas.
- 2.2 La proximidad de arcos antiguos tales como el de Maracaibo para el campo de Ceuta-Tomoporo, el Arco de Arauca para el campo de Caño Limón-Guafita y probablemente uno similar para Cusiana.
- 2.3 Un moderado relieve estructural debería permanecer como tal, particularmente en el piedemonte, para preservar la retención y asegurar una significativa acumulación de hidrocarburos.
- 2.4 Se debe añadir el importante acortamiento del Eoceno Tardío y la configuración estructural asociada, particularmente observable en Caño Limón y Ceuta.
3. Los factores claves que determinan la presencia de campos gigantes en márgenes divergentes son:
 - 3.1 Rampas laterales.

3.2 Sellos sobrepresurizados, y
3.3 Los altos estructurales actuales son suficientes para mejorar la posibilidad de entrampamiento.

4. Las herramientas de selección son:
- 4.1 Sísmica moderna, mejor y de excelente resolución. Esta fue la clave para la buena definición de la geometría de las trampas, así como para el análisis de la conducta del fallamiento en todos los casos discutidos en el trabajo.
 - 4.2 La geoquímica regional y los estudios de modelaje. Tales estudios son más difíciles en las antefosas y en los cinturones plegados, debido a que el interior de la cordillera forma parte del entorno y también a que la sedimentación original (anterior a la erosión de la cordillera) debe reconstruirse.

4.3 El análisis sedimentológico y de yacimiento detallado, para entender la evolución y preservación de las características petrofísicas, tanto horizontal como verticalmente.

4.4 Las interpretaciones estructurales revisadas que incorporen, particularmente, la historia completa del fallamiento y que permitan la construcción de mapas de rutas de migración.

En resumen, son evidentes los peligros y limitaciones de las grandes y mágicas clasificaciones y simples paradigmas. La comprensión de un campo individual, aun cuando es requerimiento básico, no es suficiente para tener la visión completa. Los sistemas petrolíferos son dinámicos y heterogéneos. Cualquier diferencia, por pequeña que parezca, en las condiciones iniciales, puede tener un impacto desproporcionado en los

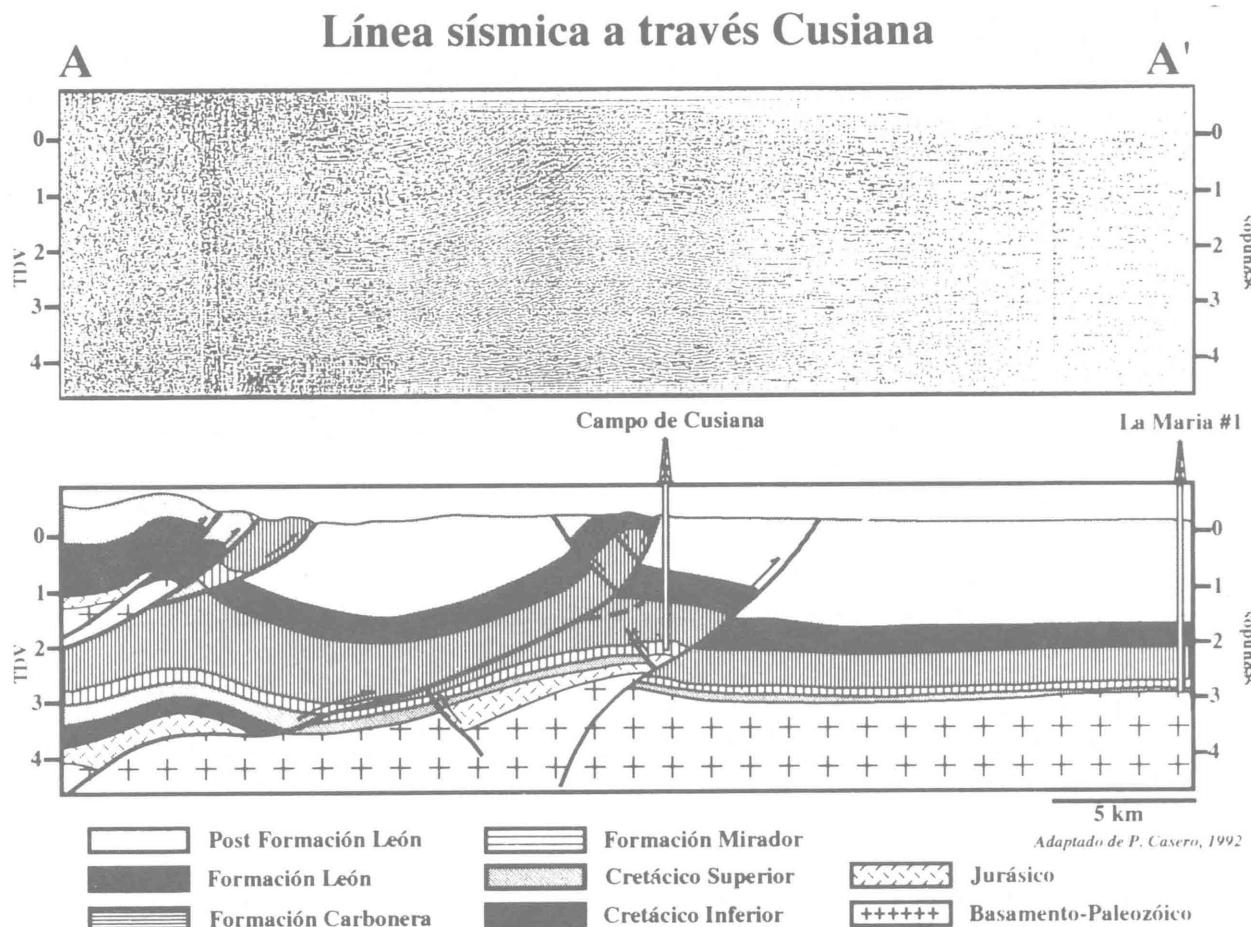


Figura 12

La interpretación de esta línea sísmica compuesta a través del campo de Cusiana (ver ubicación en la fig. 11), muestra por una parte, que la estructura del campo corresponde a la reactivación de una antigua falla normal de la fase de rift, muy probablemente de edad jurásica y por otra parte, ilustra el comportamiento estructural relativamente plano de las rocas yacimiento, que es la condición *sine qua non* para que cantidades importantes de hidrocarburos sean retenidas.

parámetros clave: por lo cual, la habilidad en reconocerlas es lo que hace a un explorador "sortario".

Agradecimientos

El presente trabajo es uno de los resultados de 12 años de estrecha colaboración técnico-científica entre TOTAL, S.A. y PDVSA. Agradecemos a todas las filiales de Petróleos de Venezuela, así como a TOTAL, S.A. por permitir su publicación.

Referencias

- Audemard, F. 1991 -Tectonics in Western Venezuela. Ph. D. Thesis, Rice University, Houston, Texas. 245 pp.
- Aymard, R., Pimentel, L., Eitz, P., López, P., Chaouch A., Navarro, J., Mijares, J., and Pereira, J. G. 1988. Geological integration and evaluation of Northern Monagas Eastern Venezuela. Geological Society of London "Classic Petroleum Provinces Meeting", London, p. 37-53.
- Bally A. W. and Snelson, S. 1980. Realms of subsidence: in Facts and Principles of world Petroleum Occurrences (ed. por A. D. Miall). Canadian Society Petroleum Geologists,

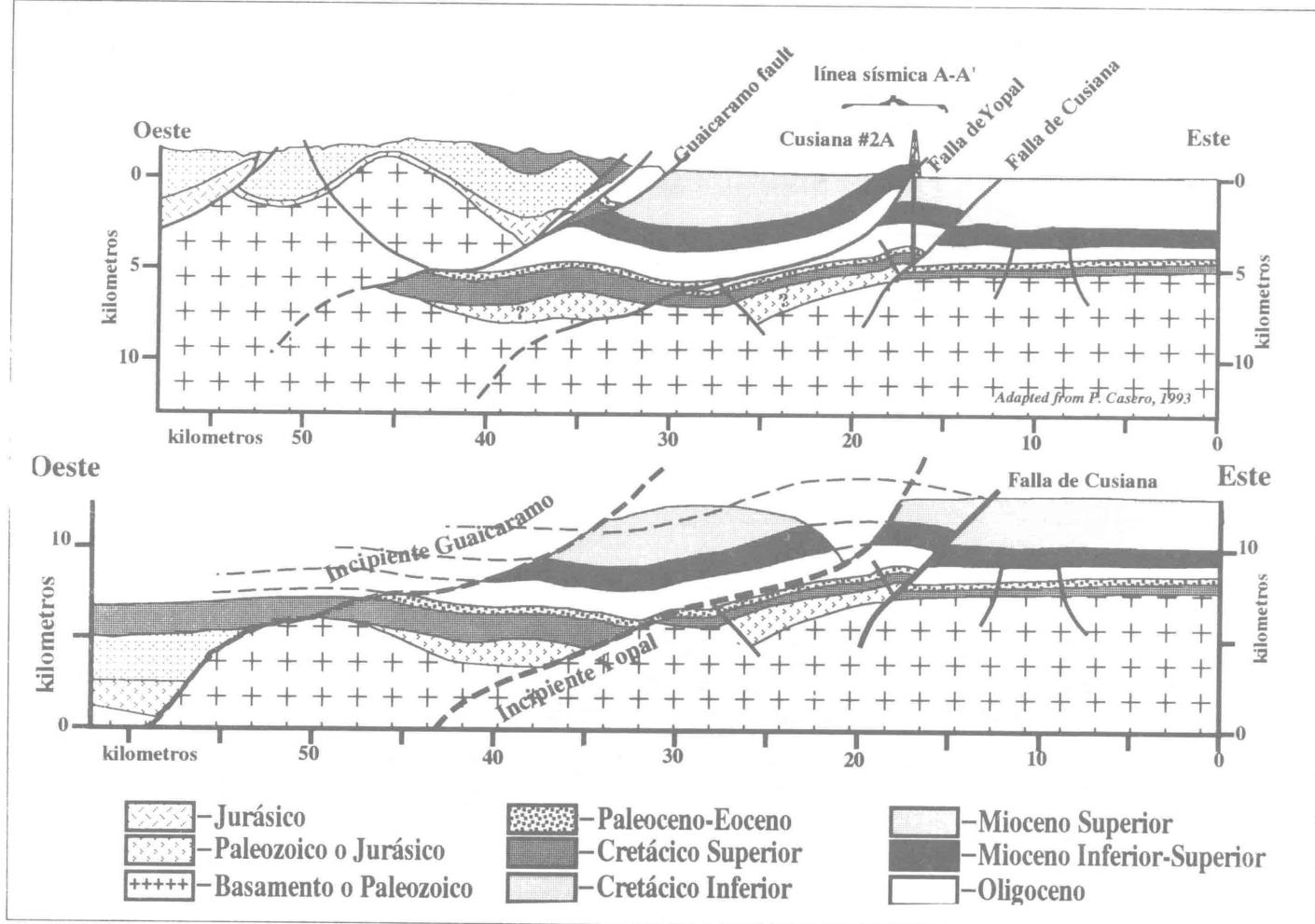


Figura 13

La interpretación balanceada en profundidad de la línea sísmica interpretada en tiempo en la figura precedente, sugiere la posibilidad de la existencia de ejes estructuralmente altos y anteriores a la primera fase de migración de los hidrocarburos. La puesta en evidencia de estos ejes es una de las claves para el éxito de la exploración en éste tipo de cuencas (cuencas detrás del arco invertidas y antefosas). Este escenario al Miocene Tardío ilustra igualmente la intensa tectónica extensiva durante el Mesozoico (los "rifts" jurásicos y el engrosamiento Cretácico); la falla de Cusiana es un ejemplo del primero mientras la falla de Guaicaramo del segundo.

- Memoir 6, p. 9-94.
- Boesi, T. 1993. Cretaceous and Paleogene sedimentation in the Southwestern Venezuelan Andes, Field trip No. 4. American Association of Petroleum Geologists/Sociedad Venezolana de Geólogos, Caracas p. 1-73.
- Carnevali, J.O. 1988 El Furrial Oil field, northeastern Venezuela: first giant in foreland fold and thrust belt of western hemisphere, (Abstract). American Association of Petroleum Geologists, Bull., 72 (2) p. 168.
- Carnevali, J.O. 1991 La zona del cinturón sobre corrido de Monagas en la cuenca oriental de Venezuela: Anatomía de un descubrimiento gigante de la década del 80. 13º Congreso Mundial del Petróleo, Buenos Aires, Argentina, Octubre, 20-25. p. 1-12.
- Colletta, B., Hebrard, F., Letouzey, J., Werner, P., and Rudkiewicz, J.L. 1990. Tectonic style and crustal structure of Eastern Cordillera (Colombia) from a Balanced Cross - Section, in Petroleum and Tectonics in Mobile Belts (ed. J. Letouzey y Editions Technip), Paris, p. 81-100.
- Demaison, G. and Huizinga B.J. 1991. Genetic classification of petroleum systems. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, V.75, No. 10, p. 1626-1643.
- Duval B., Cramez, C. and Vail, P. 1992. Types & hierarchy of stratigraphic cycles. Stratigraphy of European Basins, Dijon, France. (Abstract).
- Letouzey, J. 1990. Fault reactivation, inversion and fold-thrust belt, in Petroleum and Tectonics in mobile Belts (ed. J. Letouzey y Editions Technip), Paris, p. 101-128.

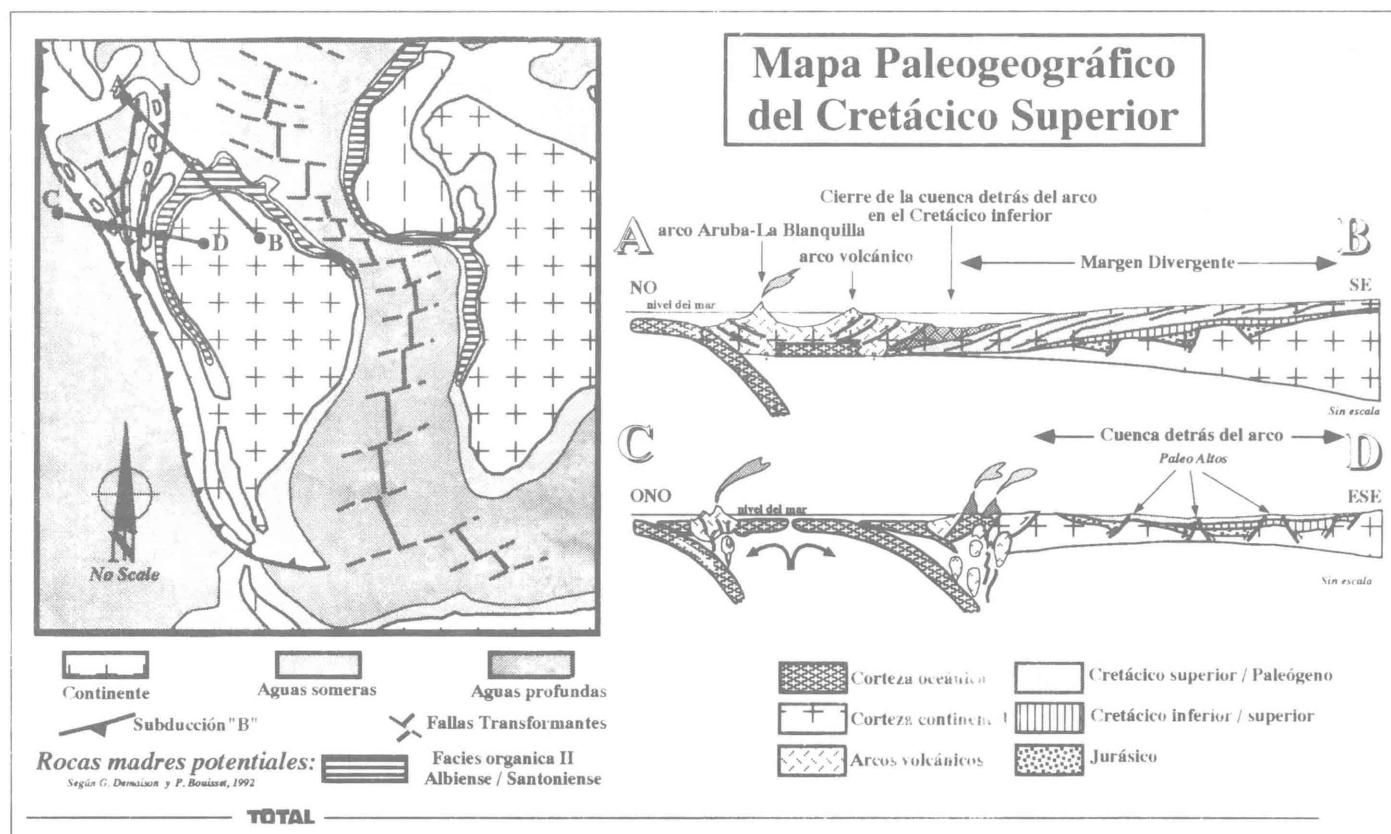


Figura 14

El mapa paleogeográfico del Cretácico Superior indica un contexto geológico de margen divergente en la región norte de Suramérica (corte A-B), característico del campo de Furrial y un contexto de detrás del arco, predominante durante el Mesozoico, en las regiones donde se han descubierto los campos de Ceuta-Tomoporo y de Cusiana. Las diferentes condiciones iniciales de estas cuencas controlan la variación y la importancia de los parámetros de los sistemas petroleros. Nótese igualmente en este mapa, la distribución de las rocas madres potenciales (tipo II) cuya edad abarca el intervalo Albienense / Santoniense.

- Mc Collough, C. and Carver, J.A. 1990. The Giant Caño Limón Field, Llanos Basin, Colombia, in *Giant Oil Fields of the Decade 1978-1988*. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 54, p. 175-195.
- Palmer, S.E. and Russel, J.A. 1988. The five oil families of the Llanos Basin. III Simposio Bolivariano, Exploración Petrolera de las Cuencas Subandinas, Caracas, 13 al 16 de marzo de 1988. p. 723-754.
- Ramirez, E. and Marcano, F. 1990. Ceuta-Tomoporo Field, Venezuela, in *Giant Oil Field of the Decade 1978-1988*. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 54, pp. 163-173.
- Roberto, M., Mompart, L., Puche, E., and Scherer, F. 1988. New Oil discoveries in Ceuta area, SE Lake Maracaibo, Venezuela: Classic Petroleum Provinces, Geological Society of America, Special Publication No. 50, p. 77-88.
- Roure, F., Carnevali, J.O., and Subieta, T.A. 1994. Geometry and Kinematics of North Monagas Thrust Belt (Venezuela). *Marine and Petroleum Geology*, v. 11, 3, p. 347-362.
- Subieta, T.A., Carnevali, J.O., and Hunter, V. 1988. Evolución Tectono-Estratigráfica de la Serranía del Interior y de la Subcuenca de Maturín. III Simposio Bolivariano, Memoria, Tomo II, Caracas, Venezuela. p. 548-578.
- Zambrano, E., Vasquez, E., Duval, B., Latreille, M., y Coffinieres, B. 1971. Síntesis paleogeográfica y petrolera del Occidente de Venezuela. IV Congreso Geológico Venezolano. Caracas, Nov. 1969. Memoria, Bol. Geol. Caracas, Publi. Esp. 5, I: p. 483-545.

TABLA I

PARAMETROS PETROLIFEROS DEL CAMPO EL FURRIAL-CARITO

- Contexto de margen divergente.
- Roca madre de buena calidad.
- Buena roca yacimiento y sección espesa subcompactada de roca sello.

1.	Expulsión de hidrocarburos antes de la compresión.
2.	Baja impedancia antes del acortamiento.
3.	No hay inversión estructural antes del Plio-Pleistoceno.
4.	No hay reactivación de las fallas pre-existentes en el "rift".
5.	Trampas de origen compresivo.
6.	Expulsión de hidrocarburos en el Neogeno tardío.
7.	Acortamiento "en secuencia" en el Neogeno. Fallamiento de ángulo bajo.
8.	Migración lateral predominante.

TABLA II**PARAMETROS PETROLIFEROS DEL CAMPO CEUTA-TOMOPORO**

- Contexto de cuenca detrás del arco.
- Roca madre de buena calidad.
- Buena roca yacimiento y rocas sello de poco espesor.
- Alta impedancia antes del acortamiento.

1.	Expulsión de hidrocarburos antes de la compresión.
2.	Ajuste y reactivación de fallas de "rift" pre-existentes.
3.	Inversiones estructurales.
4.	Trampas de origen extensivo bien marcado y compresivo.
5.	Acortamiento multifásico en el Neogeno. Fallamiento de ángulo alto.
6.	Expulsión de hidrocarburos en el Neogeno tardío.
7.	Migración vertical y lateral.

TABLA III

PARAMETROS PETROLIFEROS DEL CAMPO CUSIANA

- Contexto de cuenca detrás del arco.
- Roca madre de buena calidad.
- Buena roca yacimiento y roca sello.
- Alta impedancia antes del acortamiento.

1.	Inversiones estructurales.
2.	Expulsión de hidrocarburos.
3.	Acortamiento multifásico. Fallamiento de ángulo alto.
4.	Ajuste y reactivación de fallas pre-existentes en el "rift".
5.	Trampas de origen compresivo.
6.	Expulsión de hidrocarburos en el Neogeno tardío.
7.	Migración vertical y lateral.

TABLA IV

**COMPARACION DE COMPONENTES CLAVES
DE LOS SISTEMAS PETROLIFEROS**

	CUSIANA	CEUTA-TOMOPORO	C. LIMON	EL FURRIAL-CARITO
Fallas inversas de ángulo bajo				XXXX
Contexto de margen divergente				XXXX
Acortamiento en el Neogeno	XXXX	XXXX		XXXX
Inversión Tectónica	XXXX	XXXX		
Fallas inversas de ángulo alto	XXXX	XXXX		
Fallamiento normal post-Jurásico	XXXX	XXXX	XXXX	
Acortamiento del Eoceno tardío	XXXX	XXXX	XXXX	
Contexto detrás del arco	XXXX	XXXX	XXXX	

Dos familias de sistemas petrolíferos están claramente definidas y pueden ser de utilidad para establecer los criterios de selección de localizaciones en búsqueda de depósitos similares. Estos criterios incluyen: (i) el contexto regional, (ii) el tipo de fallamiento involucrado en el mecanismo de entrampamiento y (iii) la posibilidad de un acortamiento multifásico.