

Diferenciación de dominios estructurales al noreste de la Cuenca de Maracaibo

A. BENGUIGUI¹, A. PAEZ¹, M. NUÑEZ¹ & J. ACOSTA²

¹PDVSA Exploración, Maracaibo, Venezuela. ²EXGEO-CGG Maracaibo, Venezuela.

RESUMEN

La arquitectura del noreste de la Cuenca de Maracaibo en Venezuela ha sido asociada a diferentes episodios relacionados a la cinemática de placas tectónicas. Recientes interpretaciones sísmicas permiten postular un nuevo modelo estructural caracterizado por diferentes morfologías dispuestas en el marco tectónico regional las cuales pueden ser diferenciadas, de norte a sur, en tres dominios principales. En el norte del área de estudio, el primer dominio se caracteriza por la presencia de fallas normales de basamento reactivadas en un proceso de deformación compresivo/transpresivo cuya herencia tectónica se encuentra reflejada en el desarrollo de un sistema imbricado de corrimientos que afectan la pila sedimentaria del Terciario cuyo nivel de despegue pareciera ubicarse en el Cretácico Superior. En el segundo dominio, caracterizado por la presencia de tectónica de lodo, se han interpretado al menos dos fases de deformación plástica asociadas a las estructuras: expulsión primaria de lodo por carga diferencial asociado a fallamiento lístrico y posterior removilización de lodo por inversión tectónica. Finalmente, al sur del área, el tercer dominio presenta rampas profundas y retro-corrimientos mayores asociados al levantamiento de la Serranía de Trujillo. Dichos rasgos estructurales incluyen nuevas implicaciones en la evaluación del sistema petrolífero introduciendo nuevos caminos de migración, variación en estilos de trampas y sincronización de eventos cuyo conocimiento permite considerar dichos elementos para disminuir el riesgo exploratorio asociado a la predicción de la ocurrencia de hidrocarburos en la región.

INTRODUCCIÓN

Situada en el noroccidente de Venezuela, la Cuenca de Maracaibo revela la interacción entre las placas del Caribe, Suramérica, Nazca y el Istmo de Panamá durante el Cenozoico (Fig. 1). La interacción está asociada al régimen transpresivo relacionado a las fallas Oca, Santa Marta y Boconó las cuales definen un bloque triangular denominado Bloque de Maracaibo (Fig. 2). La Serranía de Perijá y la Sierra Nevada de Santa Marta forman una zona triangular en vista planta, cuyos límites son la falla de rumbo lateral izquierda de Bucaramanga-Santa Marta, la falla de rumbo lateral derecha de Oca (sólo hasta el límite norte del Lago de Maracaibo) y el frente oriental de cabalgamiento de la Serranía de Perijá. Interiormente este

bloque esta afectado por una serie de fallas de cabalgamiento cuya vergencia principal es hacia el Noroeste, indicando que la dirección de transporte tectónico del bloque es desde el Sureste al Noroeste y que este corre a lo largo de dos rampas laterales formadas por las fallas de rumbo mayores.

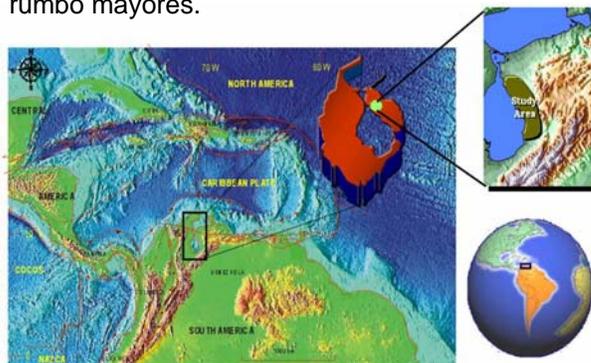


Figura 1: Mapa de localización del área de estudio en función del marco de placas tectónicas que afectan la zona.

El bloque triangular formado entre las fallas de Bucaramanga-Santa Marta, Oca y la Serranía de Perijá estaría siendo expulsado desde el Paleoceno hacia el Noroeste y a partir del Mioceno el bloque norte de los Andes de Mérida es desplazado hacia el Noreste hasta que las Napas de Lara actúan como freno.

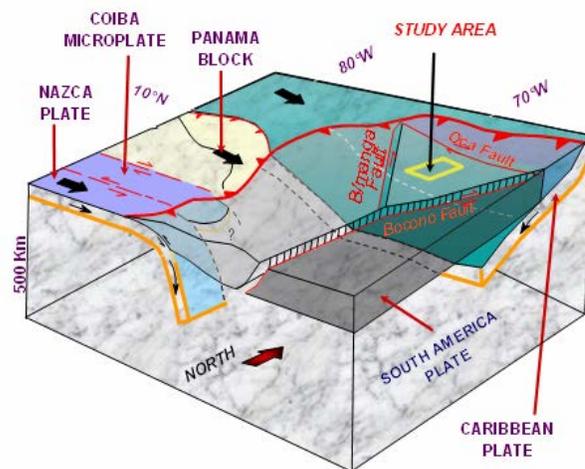


Figura 2: Área de estudio en relación al bloque de Maracaibo y a la convergencia oblicua de las placas de Nazca, Caribe, Sur América y la interacción del Istmo de Panamá.

Estas direcciones indican que por algún tiempo durante el Neógeno Tardío la Cuenca de Maracaibo sufrió extensión expresada en la espesa secuencia de depósitos de esa edad.

La rampa lateral que sirve de límite occidental a las Napas de Lara no es claramente apreciable hoy en día en los mapas geológicos, posiblemente por haber sido erosionada y su existencia es sólo determinada por elementos estratigráficos (Lugo & Mann, 1995; Parnaud et al., 1995). Sin embargo se propone una posible explicación relacionada a la secuencia de emplazamiento de las Napas de Lara. Si el emplazamiento es en secuencia los cabalgamientos más jóvenes correrían sobre rampas laterales menores que cada vez se desarrollarían más hacia el este, pero si es una secuencia invertida como parecerían indicar la edad de las rocas observadas hacia los frentes de cabalgamiento en la Serranía de Trujillo (cada vez mas jóvenes hacia el norte), los cabalgamientos más jóvenes correrían sobre rampas laterales menores que cada vez se propagarían más hacia el oeste. En cualquier caso se esperaría que los cabalgamientos afecten en mayor grado la parte norte de la región de Zulia Oriental que la parte sur como en efecto se observa en las interpretaciones propuestas en este trabajo.

Hacia el noreste de la Cuenca de Maracaibo, la zona transpresiva está caracterizada por la presencia del sistema de fallas rumbo deslizantes Tigre – Pueblo Viejo y Burro Negro – Mene Grande quienes controlan la deformación de la pila sedimentaria y a partir de las cuales se proponen los cambios en el modelo estructural (Fig. 3).

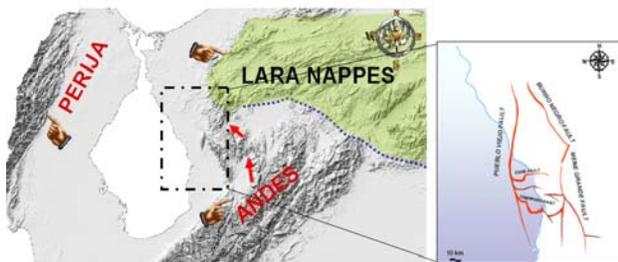


Figura 3: Ubicación relativa de los principales elementos estructurales que afectan el área.

El presente análisis estructural envuelve un área de 4300 km² cubierta por levantamientos sísmicos 2D y datos de pozos, restringidos estos últimos, a la zona de transición en la vecindad de la línea de costa. El área cubierta con sísmica ha sido subdividida en tres zonas (Ver Fig. 4) sin embargo el presente estudio se ha enfocado en lo que se ha denominado TPV Norte y TPV Centro.

Las observaciones estructurales postuladas en este trabajo se evidencian a lo largo de 70 Km., a través de la zona de estudio, diferenciando así, de norte a sur, la compleja deformación tectónica.

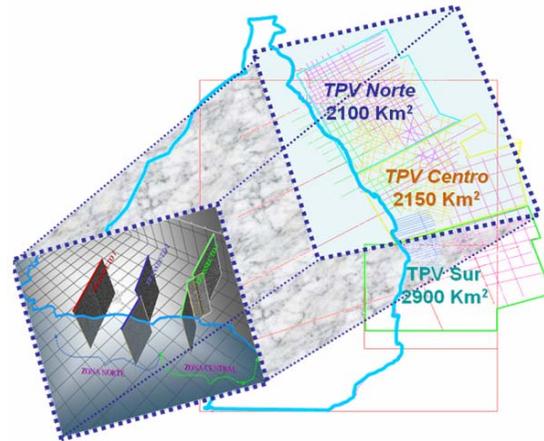


Figura 4: Ubicación de los levantamientos sísmicos 2D en relación a la línea de costa, mostrando la posición de los transectos seleccionados y el área total que abarca el presente estudio.

ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN

El área de estudio se encuentra limitada por tres elementos estructurales principales: la Serranía de Perijá al oeste, la Serranía de Trujillo al este y los Andes hacia el sur. La dirección de transporte tectónico obtenida por la graficación de polos a partir de las direcciones de rumbo y buzamiento, extraídas de mapas geológicos de superficie (1964), muestra un cambio en las líneas de deformación finita sugiriendo que el levantamiento de la Serranía de Trujillo afectó el marco de la deformación en el área de estudio. Este fenómeno es evidenciado en la rotación de la dirección de transporte tectónico NO-SE hasta la dirección NE-SO (~90°) (Fig. 5).

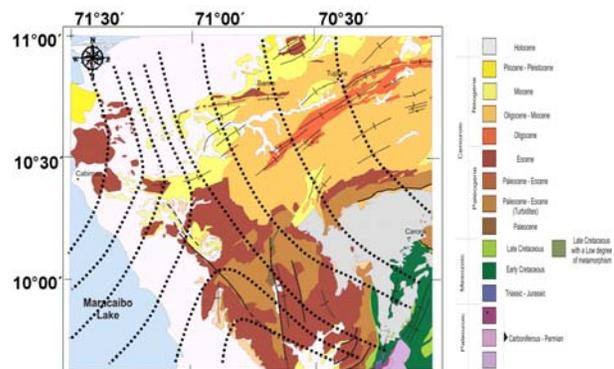


Figura 5: Líneas de deformación finita obtenidas a partir de los datos geológicos de superficie. Se puede evidenciar como la dirección de transporte tectónico (NO-SE) es afectada en la vecindad de la Serranía de Trujillo por el levantamiento de la misma rotando en aproximadamente 90° la tendencia regional.

DIFERENCIACIÓN DE DOMINIOS ESTRUCTURALES AL NORESTE DE LA CUENCA DE MARACAIBO

La base de datos sísmica (2D) presentada en este estudio cubre el flanco oriental (costa adentro y zona transicional) de la Cuenca de Maracaibo haciendo imagen de las estructuras en subsuelo ubicadas entre la Serranía de Trujillo y la costa del lago las cuales afloran parcialmente en superficie. De norte a sur es posible distinguir al menos tres estilos estructurales dominantes:

Hacia el norte del área de estudio, el perfil A (Fig. 6) revela un basamento económico afectado por un sistema de fallas de extensión el cual infrayace un sistema de fallas lítricas normales reactivadas como inversas las cuales afectan la pila sedimentaria Cenozoica. Dichas fallas permiten la depositación syn-tectónica de las turbiditas de la Formación Trujillo durante el Paleoceno induciendo la migración lateral del lodo infrayacente hacia el este, lo cual se manifiesta al norte en el incremento de espesor en esta dirección de la unidad equivalente a la Fm. Colón. Las fallas lítricas principales cabecean hacia el norte en su flanco sur invirtiéndose la geometría progresivamente en dirección norte.

Distintos episodios compresivos ocurridos durante el Eoceno temprano y Mioceno reactivan estas fallas como inversas, generando escamas de corrimiento evidenciadas hacia el noreste del área alcanzando el estado de deformación actual y permitiendo un nuevo periodo de migración del lodo (Fig. 7).

Se identifica divergencia en los limbos en las unidades dispuestas en los bloques cabalgantes asociados al nivel de despegue intra Cretácico Tardío en un marco tectónico de piel gruesa.

En la parte central del área de estudio, interpretaciones previas postulan fallas normales de alto ángulo en cuya reactivación se afecta la pila sedimentaria. Varias unidades sísmicas son identificadas y correlacionadas según equivalentes de edad Cretácico y otras del Cenozoico. Sin embargo, el control estructural asociado a estas fallas de basamento dificulta el entendimiento de la ocurrencia de hidrocarburos como lo indica el modelado de la madurez y la migración de fluidos. En este sentido, Malavé (1997) indica cambios laterales en estudios de litomicrofacies para la Formación Colón: hacia el norte y centro, se evidencian lutitas y limolitas mientras areniscas y minerales accesorios aparecen hacia el sur. De acuerdo a lo antes mencionado, la falta de imagen sísmica, la falta de continuidad y el pinchamiento de las unidades

interpretadas hacia el flanco de la zona de respuesta caótica son asociados en este estudio, a la presencia de estructuras diapíricas. Esta hipótesis se ha fundamentado en varios análisis incluyendo modelado sísmico y modelado de Cuencas (Nuñez et al., 2005 y Páez et al., 2005).

La nueva interpretación del perfil sísmico S mostrada en la Fig. 7 y los datos estratigráficos disponibles, revelan la presencia de un diapiro asociado a la movilización de la Formación Colón durante el Paleógeno (Fig. 8). En esta sección la restauración estructural permite correlacionar las dos fases dominantes en la deformación del lodo. Un primer evento de edad Paleoceno con la expulsión lateral del mismo causado por carga y compactación diferencial durante la sedimentación de las turbiditas suprayacentes. En este caso el fallamiento lítrico durante la sedimentación del Paleoceno dispara el mecanismo diapírico y el crecimiento de los mismos a través de la deformación interna por deslizamiento (Fig. 9). Un segundo y posterior evento tiene lugar durante el Eoceno con la circulación y reacomodo del lodo asociado a los periodos compresivos de la obducción de las Napas de Lara en la colisión Sur América – Caribe. En el Neógeno, la orogénesis Andina pudo reacomodar la configuración Paleógena rotando en este caso, en sentido antihorario, el sistema anteriormente dispuesto.

Hacia el límite sur del área afectada por la tectónica de lodos, la migración de la Formación Colón (sobrepresurizada), en la dirección de transporte tectónico, genera una lengüeta lutítica que explica el incremento observado de Esmectita en la relación Illita/Esmectita en muestras de núcleo para un pozo que atraviesa dicha estructura (Fig. 10). La incorporación del lodo de posible edad Cretácica (soterrado) en intervalos de menor profundidad introduce anomalías en algunos perfiles petrofísicos (e.g. Resistividad) y geoquímicos (e.g. %Ro) correlacionando así interdisciplinariamente en profundidad, la estructura diapírica en la sección.

Las interpretaciones realizadas al sureste del área de estudio, indican la presencia de corrimientos profundos que deforman la pila sedimentaria como resultado de la propagación del levantamiento de la Serranía de Trujillo (Fig. 11). En este caso, la disposición de la Cuenca Antepaís desarrollada en este sistema, actúa como impedimento para la propagación de la deformación asociada a dicho régimen compresivo generando retrocorrimientos relevantes los cuales deforman la secuencia Terciaria en el frente del sistema imbricado, respuesta asociada al importante cambio de orientación en las líneas de deformación finita.

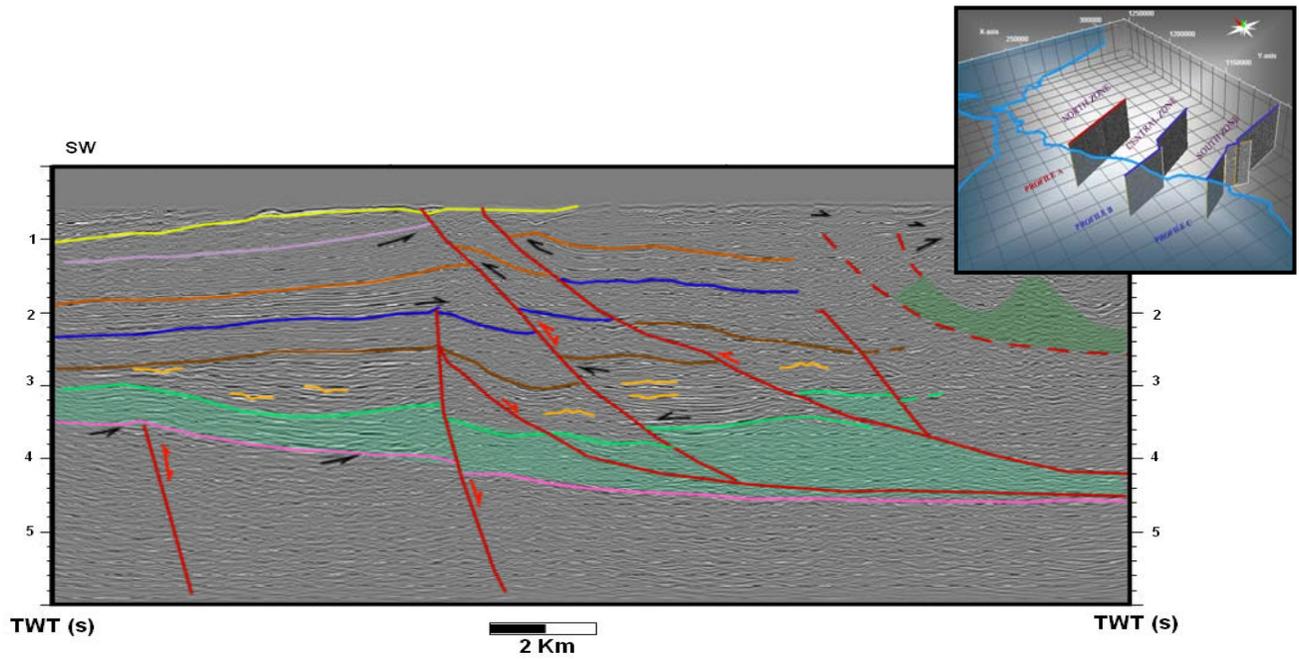


Figura 6: Perfil A localizado en el norte del área de estudio en la dirección de transporte tectónico. La unidad resaltada en verde representa la Formación Colón.

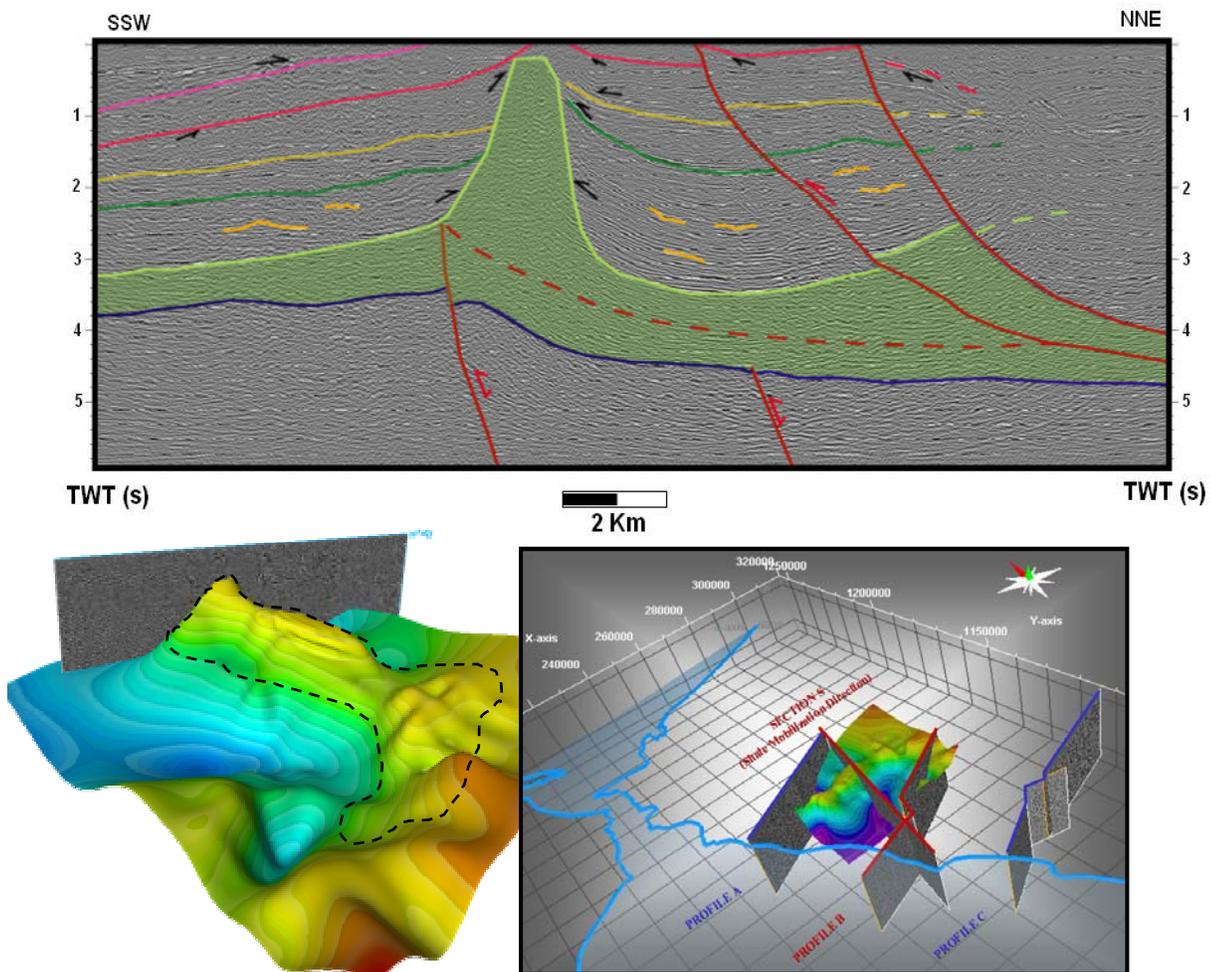
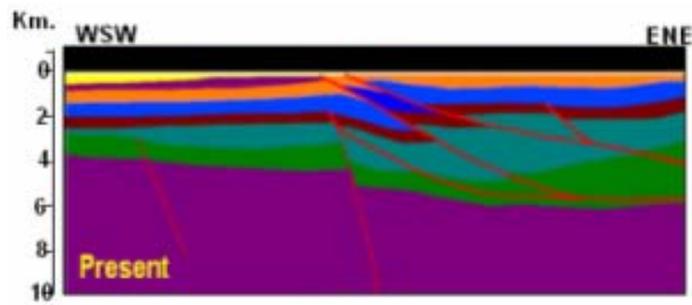
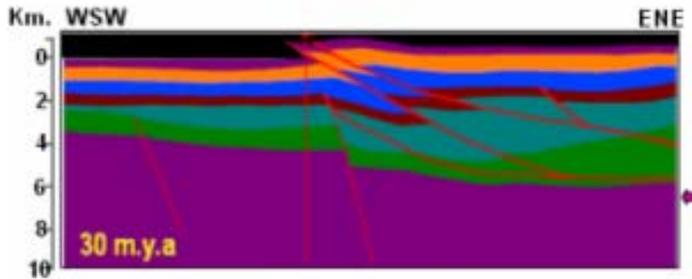


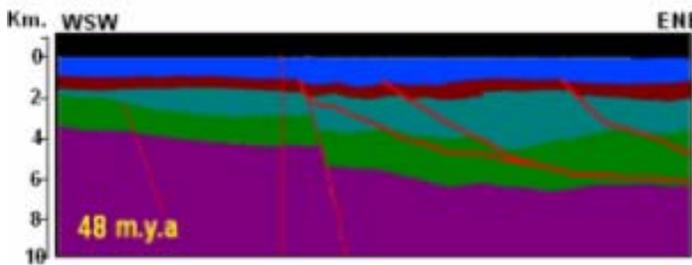
Figura 7: El perfil S revela la presencia de un diapiro asociado a la movilización del lodo de la Fm. Colón. El mismo forma parte de una pared lutítica orientada preferencialmente en la dirección NNE-SSW.



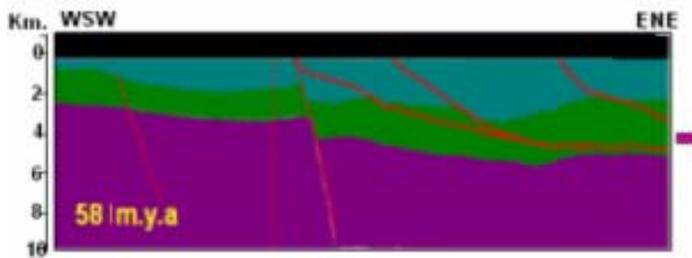
a) Estado de la Deformación Actual. Interpretación de la sección en el dominio de la profundidad.



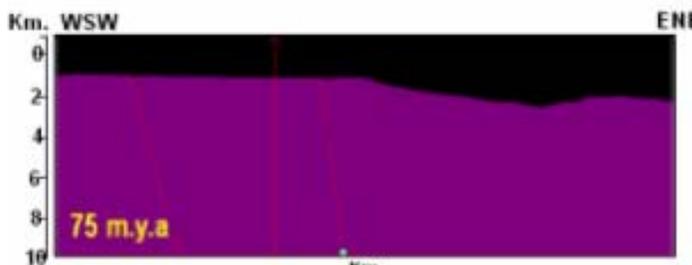
b) Episodio Compresivo asociado a la obducción del Paleo-Caribe. ~ 3 Km. de acortamiento aparente.



c) Fin del fallamiento lístrico asociado a la migración de lodo. ~ 1 Km. de extensión.



d) Migración lateral del lodo debido al fallamiento lístrico asociado a la carga depositacional de las turbiditas de la Formación Trujillo.



e) Basamento Económico: Se incluye Cretácico Temprano y Basamento Metamórfico.

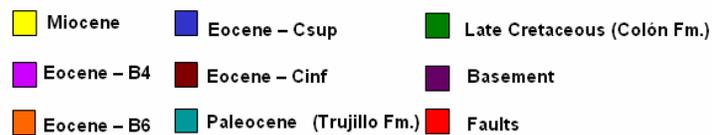
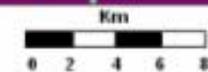
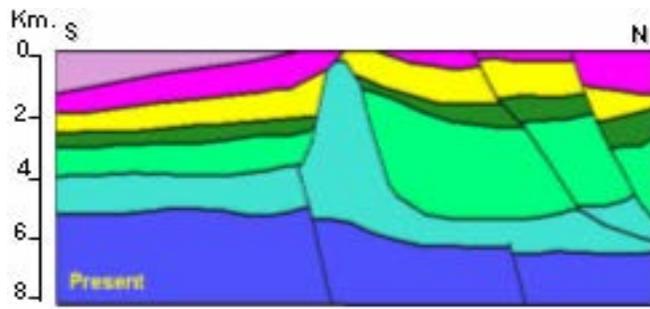
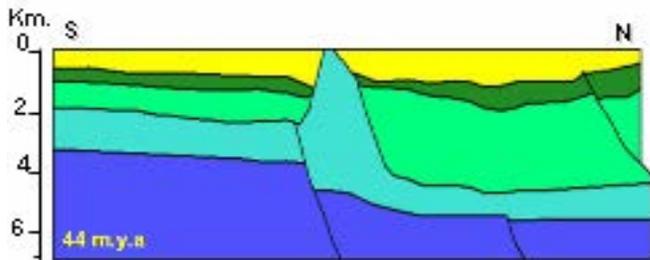


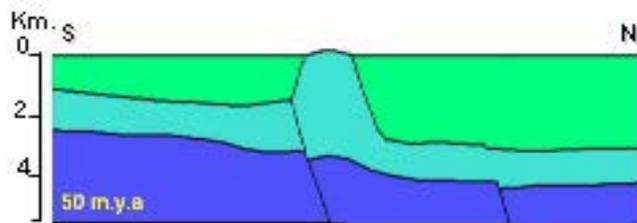
Figura 8: Restauración del perfil A. Los episodios compresivos del Eoceno Temprano y Mioceno reactivan la configuración estructural dispuesta.



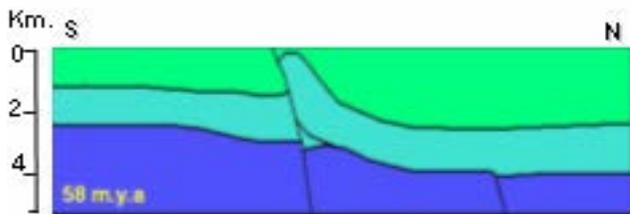
a) Estado de la Deformación Actual. Interpretación de la sección en el dominio de la profundidad. Se observa reactivación de las fallas normales lístricas.



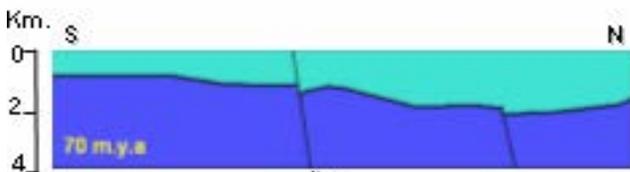
b) Sedimentación syn-tectónica de las unidades de edad Eoceno durante el crecimiento del diapiro (Segunda fase de movilización).



c) Primera fase de movilización del lodo asociada a la sobrecarga ejercida por sedimentación de las turbiditas de la Formación Colón.



d) El fallamiento lístrico durante la sedimentación del Paleoceno dispara el mecanismo diapírico. El diapiro se deforma internamente por deslizamientos internos.



e) Sedimentación de la Formación Colón durante un margen pasivo en el Cretácico Tardío.

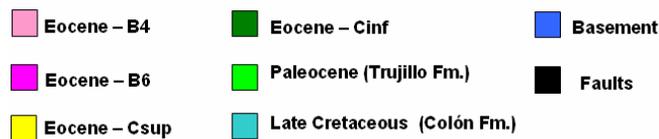
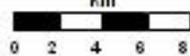


Figura 9: Restauración del perfil S. La expulsión lateral asociada a la carga turbidítica (unidad verde claro) y los episodios compresivos posteriores activan el mecanismo diapírico.

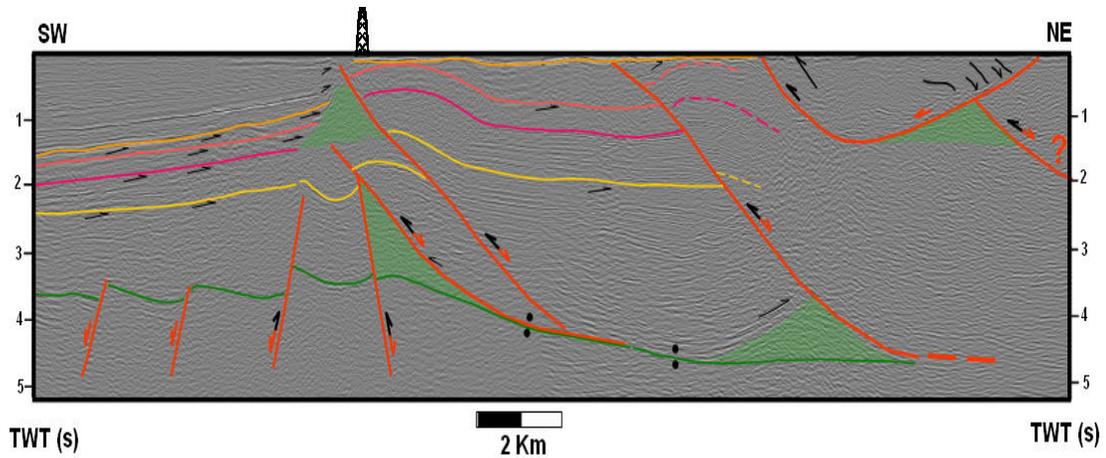


Figura 10: El perfil B se localiza en el límite sur del área afectada por tectónica de lodo. En la dirección de transporte tectónico la migración la Formación Colón (sobrepresurizada) genera una lengüeta de lodo. El emplazamiento del mismo introduce *rollers* bajo las fallas induciendo el *welding* junto al nivel de despegue.

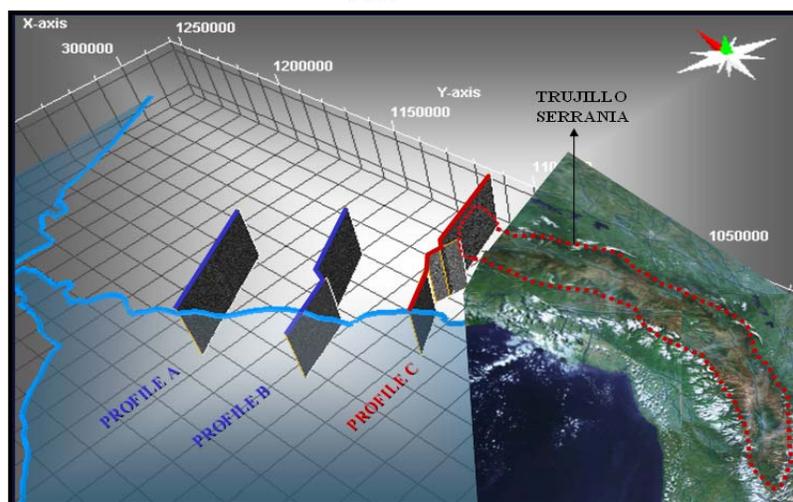
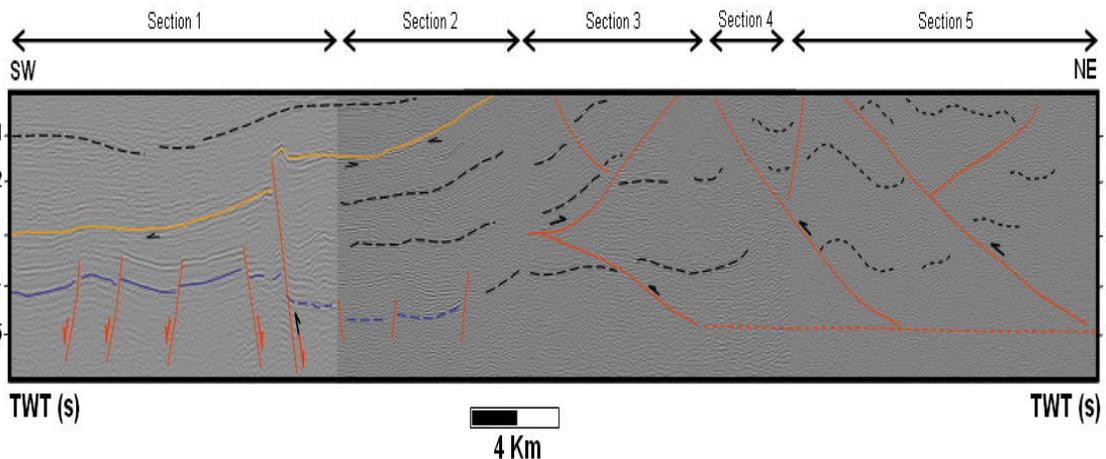


Figura 11: Hacia el sureste del área de estudio el perfil C ilumina un prisma estructural que envuelve la propagación de un retrocorrimento a partir del frente del sistema imbricado. Las líneas punteadas en el panel sísmico representan patrones de buzamiento de las capas.

CONCLUSIONES

Las nuevas interpretaciones postuladas para el noreste de la Cuenca de Maracaibo permiten diferenciar al menos tres estilos morfológicos. Hacia el norte el fallamiento normal que afecta el basamento infrayace a un sistema de fallas lítricas de colapso gravitacional las cuales son reactivadas como inversas durante episodios compresivos afectando así la pila sedimentaria Cenozoica. En el área central, la movilización de lodo (sobrepresurizado) de la Formación Colón permite la generación de estructuras diapíricas, lengüetas, *toe-thrusting*, *weldings* y mini cuencas. Finalmente, se interpretan hacia el sureste del área corrimientos profundos asociados al levantamiento de la Serranía de Trujillo. La nueva arquitectura permite postular nuevos patrones de migración que pueden explicar la distribución de la ocurrencia de hidrocarburos, mejorando así el entendimiento del sistema petrolífero e incrementando el potencial de predicción de nuevas oportunidades en la región.

REFERENCIAS

- Acosta J., Lonergan L. & Coward M.P.** [1996] Oblique transpression in the western thrust front of the Colombian eastern cordillera. *Journal of South American Earth Science* 17, pp.181-194.
- Audemard F.E. & Audemard F.A.** [2002]. Structure of the Mérida Andes, Venezuela: relation with the South America - caribbean geodynamic interactions. *Tectonophysics* 345, pp.299 –327.
- Chatelier J.Y., Mendéz M.J., Hague P. & Navarro A.** [1998]. Shale mobility in western Venezuela, implication for maturity studies and prospectivity. AAPG Anual Convention abstract, Salt lake city, Utah.
- Deville E., Battani A., Griboulard R., Guerlais S., Lallemand S., Mascle A., Prinzhofer A. & Schmitz J.** [2004] Processes of Shale Diapirism and Mud Volcanism in the Barbados-Trinidad Compressional System: Integrated Thermal and Geochemical Approach. GCSSEPM conference.
- Escalona A.** [2003] Regional tectonics, sequence stratigraphy and reservoir properties of Eocene clastic sedimentation, Maracaibo Basin, Venezuela, Ph.D. dissertation, The University of Texas at Austin, Austin, Texas.
- Escalona A. & Mann P.** [2003]. Three-dimensional architecture and evolution of the Eocene pull-apart basin, central Maracaibo basin, Venezuela. *Marine and Petroleum Geology*, Vol.20, pp.141 –161.
- Freymueller J.T., Kellog J.N. & Vega V.** [1993]. Plate motions in the North Andean Region. *Journal of Geophysical Research* 98, pp. 21853 – 21863.
- Duerto L., Escalona A., Nuñez M. Páez, A. & Benguigui A.** [2006] Onshore Venezuelan shale mobilization associated to the south Caribbean Plate boundary. AAPG Hedberg Conference. Extended Abstract.
- Lugo J. & Mann, P.** [1995]. Jurassic – Eocene Tectonic evolution of Maracaibo Basin, Venezuela. AAPG memoir 62, p. 699 – 725.
- Malavé M.** [1994] Lithofacies and Total Organic Carbon and Phosphore in Colon Formation. Maracaibo Basin. Thesis work submitted in Central Venezuela University.
- Nuñez M., Benguigui A., Páez, A., Moreno E., Gonzalez J. & Acosta, J.** [2005] Deformation due to Shale Tectonics in Northwestern Venezuela. AAPG International Conference and Exhibition Paris. Abstract.
- Páez A., Benguigui A., Nuñez M. & Schneider F.** [2005] Petroleum System Evaluation of Northeastern Maracaibo Basin: Incomes from 2D Basin Modeling and Risk Analysis. IV Alago Workshop in Basin Modeling. Argentine, Expanded Abstract.
- Parnaud F., Gou, Y., Pascual J.C., Capello M.A., Truskowski I. & Passalacqua H.** [1995]. Stratigraphic syntesis of western Venezuela. AAPG memoir 62, p. 681 – 698.
- Roure F., Colleta B., De Toni B., Loureiro D., Passalacqua H. & Gou Y.** [1996]. Within - plate deformations in the Maracaibo and East Zulia Basins. Eastern Venezuela. *Marine and Petroleum Geology*, Vol.14, N°2, pp.139 –163.