

CONTROL NEOTECTÓNICO DEL DIAPIRISMO DE LODO EN LA REGIÓN DE CARTAGENA, COLOMBIA

(Neotectonic control of mud diapirism in the Cartagena region, Colombia)

Camilo O. Aristizábal*, André L. Ferrari**, Cléverson Silva G.***

Departamento de Geología. LAGEMAR - Universidade Federal Fluminense, Instituto de Geociências, Boa Viagem, Brasil,

*camilo@igeo.uff.br, **andre@igeo.uff.br, ***cleverson@igeo.uff.br

(Recibido el 21 de mayo de 2009 y aceptado el 17 de junio de 2009)

Resumen:

La región se caracteriza por la presencia de estructuras anticlinales, sinclinales, fallas inversas de alto ángulo de dirección NE-SW, fallas rumbo-destrales de orientación aproximada E-W y fallas transcurrentes de carácter sinistral de dirección NW-SE. Los rasgos diapíricos, localmente manifestándose como volcanes de lodo, asociados a exudaciones de gas, venían siendo vinculados a plegamientos ortogonales a la compresión regional, con base en datos esencialmente geofísicos.

En el área fueron identificados rasgos diapíricos en forma de morros y colinas elongadas, domos y pliegues diapíricos, volcanes de lodo y exudaciones de lodo y gas. Los domos y colinas son comúnmente cubiertos por colonias de coral, constituyendo paleo-arrecifes, cuyas edades registradas indican formación desde el plioceno hasta el presente.

Fue evidenciado claro control de rasgos diapíricos por lineamientos morfoestructurales de dirección E-W y, subordinadamente, por estructuras WNW-ESE, tanto en la zona costera como en la plataforma continental. Por interpretación de líneas sísmicas y datos estructurales, se corroboró continuidad de lineamientos en la zona inmersa, caracterizándolos, allí también, como rasgos morfotectónicos que controlan el diapirismo de lodo. También se identificó conexión entre los niveles de lodo infrayacentes y las geoformas diapíricas.

La inversión de los datos de fallas y estrías indica que las estructuras E-W a NW-SE están relacionadas al esfuerzo regional compresivo orientado en dirección WNW-ESE, siendo las estructuras E-W fallas destrales que se presentan incipientes, y las NW-SE, fallas sinistral reactivadas, tal como la falla del Canal del Dique, en la zona norte de Cartagena. En ambos casos se detectó componente normal. La ocurrencia de volcanes de lodo indica que los niveles de lodo inferiores están sometidos a alta sobrepresurización, tornando el lodo agente efectivo de fracturamiento hidráulico y de tectónica de membrana.

Palabras clave: Margen continental, neotectónica, Cinturón Sinú, diapirismo de lodo, tectónica de membrana.

Abstract:

Major structures of the Sinu and San Jacinto Deformation Belts (SSJDB) characterize the area and are represented by anticline and synclinal folds, NE-SW high angle thrust-faults, NW-SE left-lateral strike-slip faults and E-W right-lateral strike-slip faults. Locally, there are diapiric features like mud volcanoes, sometimes associated to gas/oil seeps, previously attributed to fold structures orthogonal to regional compression based on geophysical data.

In this case study, we identified a close relationship between diapiric features and morphostructural lineaments on the land area as well as on the continental shelf, mainly denoted by E-W and WNW-ESE direction structures. Seismic information also allowed the identification of a relationship between the lower mud level underlying the tertiary sedimentary sequence and pliocene-pleistocene diapiric features.

The inversion stress analysis indicates that the E-W / NW-SE structures are related to a WNW-ESE regional compressional stress, so implying that the E-W structures are right-lateral strike-slip faults and the NW-SE structures are reactivated left-lateral strike-slip faults. In both cases, a normal component was detected and that suggests a transtractive character to these structures. The presence of mud volcanoes indicates that the lower mud levels submitted to overpressurization help to generate or/and reactivate secondary fractures and faults associated to the NW compression related to the E-W dextral transcurrent binary.

The E-W and WNW-ESE dextral transcurrent faults and the NW-SE sinistral transcurrent faults, which control the mud diapirism, act as fluid-conducting surfaces - or leaky faults - that must be taken into account on the studies aiming the characterization of hydrocarbon migration processes in the SSJDB.

Key words: continental edge, neotectonics, Sinu belt, mud diapirism, thin-skin tectonics.

1. INTRODUCCIÓN

La margen continental del continente suramericano, en el noroeste de Colombia, presenta características tectónicas típicas de zonas compresivas y tasas de sedimentación continental relativamente altas, debido a la presencia del río Magdalena, que recorre el país de sur a norte. Posee sismicidad de baja magnitud (<5,4°R con hipocentros <45 km de profundidad), posiblemente asociada a la llamada "zona de subducción" del caribe y a la falla de Oca-Ancón, estructura importante en el límite norte de la placa suramericana con la corteza oceánica de la placa del caribe. El borde continental colombiano es, por tanto, una región tectónicamente activa. La vinculación de la morfología costera actual, apenas con la variación

relativa del nivel del mar, no explica todos los rasgos encontrados. Es necesario comprender los procesos tectónicos que modifican el paisaje, definen la litología del borde continental y moldean las estructuras que influyen en las manifestaciones de la actividad geológica de la región. El entendimiento de estos diversos aspectos tiene significado importante para la prospección de hidrocarburos en el área. Con el presente estudio, se objetiva entender cuál es la relación entre los esfuerzos compresivos y un fenómeno característico de la actividad geológica actual del entorno de Cartagena, que es el diapirismo de lodo.

El diapirismo de lodo en la costa de Colombia ha sido atribuido a la sobrepresurización, debida a esfuerzos tectónicos compresivos regionales o locales, favorecido

por la diferenciación gravitacional entre sedimentos pelágicos y continentales, habiendo sido éstos traídos fluvialmente desde el interior continental por el río Magdalena entre el oligoceno y la actualidad. Este proceso ha formado una serie de domos, diapiros y "volcanes" de lodo en la parte más superficial de la plataforma y al pie del talud continental caribe colombiano, que son colonizados por coronas de arrecifes coralinos. Estos rasgos diapíricos, inicialmente, producen un relieve de bajos y bancos de coral, que gradualmente van elevándose hasta formar islas al emerger de las aguas y, finalmente, hasta hacer parte de la región costera emergida. Las formaciones calcáreas más antiguas se presentan en la parte más proximal de la plataforma y en la zona costera adyacente, alineadas conforme las estructuras geológicas regionales (NE-SW) y exponiendo excelentes afloramientos, pese al fuerte intemperismo.

2. ANTECEDENTES

Desde 1957, cuando comenzaron las exploraciones de la plataforma con magneto-gravimetría y sísmica de reflexión y perforaciones, Talwani (1959, 1965), Bürgl (1965), Case et al. (1971), Case et al. (1984), Duque-Caro (1979-1990), Burel (1982), Page (1983), Kolla et al. (1984), Javelaud (1987), Vernet (1982-1992) e Kellog y Bonini (1982) Kellog y Vesga (1995) y autores de la Comisión Técnica Francesa para la Exploración del Fondo Marino Colombiano, con el apoyo de investigadores del Servicio Geológico de los Estados Unidos y del entonces Servicio Geológico Nacional de Colombia, iniciaron una amplia serie de publicaciones en la que describían la geología de la margen continental al norte del país. A ellos se deben las primeras dataciones, modelos evolutivos regionales tectónicos y estratigráficos más reconocidos hasta inicios de la década del 90. Aquellas investigaciones proporcionaron las bases fundamentales para los estudios recientes al final de esa misma década, cuando aparecieron nuevas ideas acerca de la tectónica del cuaternario. Los nuevos estudios incluyeron caracterizaciones geomorfológicas y levantamientos oceanográficos detallados con alta densidad de información, desde meteorológica hasta sedimentológica de la plataforma, y sísmica 2D y 3D.

En los últimos cuatro años, investigadores de la Universidad EAFIT (Escuela de Administración, Finanzas y Tecnológicas de Colombia), con apoyo de la Universidad de Tokio, presentaron una reconstrucción paleoambiental de las terrazas marinas bajas, con una definición de tres eventos principales relacionados a las variaciones del nivel del mar (Gómez et al., 2005). Ellos se basaron en los primeros datos radiométricos proporcionados por Bürgl (1965) y en las reconstrucciones paleogeográficas de Duque-Caro

(1990) y Burel (1982) y, con la obtención de nuevas dataciones, lograron establecer la existencia de bajas tasas de sedimentación y tasas relativamente altas de levantamiento del borde costero ($\pm 3,4$ mm/año), al norte de Cartagena, sugiriendo diferencias en el comportamiento tectónico entre los lugares de muestreo y mudanzas en los procesos sedimentológicos relacionados en el espacio de acomodación y en el tiempo de sedimentación. Los lugares donde fue registrado mayor levantamiento costero mostraron las menores tasas de sedimentación. Estas conclusiones fueron motivadoras porque este trabajo podrá ayudar, entonces, a caracterizar los límites de los bloques con movimiento independiente.

3. MARCO GEOLÓGICO

Dentro de un contexto tectónico regional, el caribe colombiano se encuentra dentro de un punto triple de acción interplacas, caracterizado por la subducción de corteza oceánica bajo corteza continental, donde las márgenes de las placas de Nazca y caribe, alcanzan la margen de la placa Suramericana con diferentes ángulos y velocidades, además de estar influenciadas por las placas de Cocos y del Pacífico (Ver figura 1, página siguiente).

Autores como Sykes y Ewing (1965), Molnar y Sykes (1969), Mauffret y Leroy (1997) y Trenkham y Kellog (2002) expusieron nuevas ideas acerca de la dirección de movimiento de la placa caribe, sustentadas por datos de sismicidad que fueron expuestos por Chicangana y Vargas (2004, 2005), Cortés y Angelier (2005) y Chicangana et al. (2007), analizando los mecanismos focales de los terremotos en el sur del caribe. Siguiendo la evolución de estas ideas, se acepta en este trabajo que la placa del caribe se mueve en dirección ENE con relación a las dos placas americanas, acomodada por fallas transcurrentes dextrales y sinistrales a lo largo de sus márgenes norte y sur, respectivamente (ver figura 1). La litosfera oceánica de las placas de América del Norte y de América del Sur está siendo consumida en la zona de subducción del caribe y las Antillas Menores (Caro y Spratt 2003). Las placas de Cocos y Nazca están subduciendo en dirección de las cuñas oeste y sudoeste de la placa suramericana (Mann 1999). Las unidades sedimentológicas presentes en la cuenca caribe colombiana fueron depositadas en cuencas marginales en el medio de dos provincias geológicas, una occidental de basamento oceánico, y otra oriental, cuyo basamento es continental.

La reconstrucción paleogeográfica hecha por Duque-Caro (1979, 1984) sugiere movimiento oblicuo de las placas en la unión triple citada anteriormente, con fuerte influencia de la transcurrencia destrolateral del borde occidental de Colombia, que también afecta la margen caribe colombiana. Este importante desplazamiento

durante el mesozoico-cenozoico (Meissner et al., 1976, Feininger y Bristow 1980, ambos en: Guzmán et al., 2004) tendría acrecionadas las rocas mesozoicas formadas en la margen occidental, en la región WSW, a la cadena montañosa de Los Andes (Nívia, 1987, 1989). Los elementos estructurales importantes (Ver figura 1), que son la falla de Romeral (FR), el lineamiento Sinú (LS), el arco de Magangué-Cicuco, y las fallas de Santa Marta y Oca, marcan las bases tectono-estratigráficas evolutivas del norte colombiano desde el cretáceo superior (Duque-Caro, 1984) hasta la actualidad (Guzmán et al., 2004). La evolución del Cinturón de Deformación San Jacinto (CDSJ) fue controlada por eventos compresionales y extensionales relacionados a la interacción entre las placas caribe, Cocos y Nazca. El cinturón está limitado a oeste por el LS y a este por la FR.

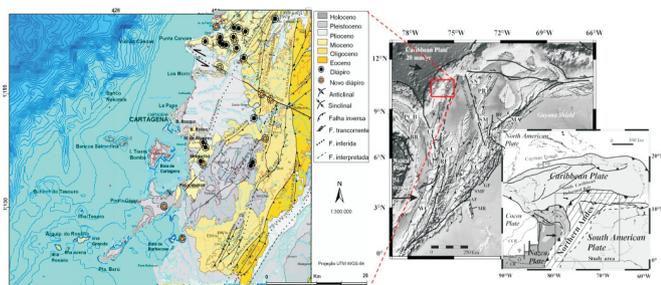


Figura 1. Localización del área de estudio y mapa geológico de la región de Cartagena (modificado de Guzmán 2003). Incluye zona costera y plataforma adyacente, correspondiente al Bloque de Exploración Sinú (BES). Rasgos estructurales principales alrededor de los Andes septentrionales. PCB: Bloque Chocó-Panamá, CC: Cordillera Central, WC: Cordillera Occidental, EC: Cordillera Oriental, FR: Falla de Romeral, RB: Serranía del Baudó, SN: Sierra Nevada de Santa Marta, PR: Serranía de Perijá, SM: Santander, MA: Andes de Mérida, FB: Falla de Boconó, GF: Falla de Guaicáramo, SMF: Falla de Santa María, AG: Falla de Algeciras, MR: Sierra de la Macarena. Vectores de velocidad de las placas en mm/año en relación a la Placa de América del Sur (modificado de Cortés et al. 2006, basado en Trenkamp et al. 2002 y Freymueller et al. 1993).

Esfuerzos laterales durante el eoceno medio, invirtieron el rift y, finalmente, entre el plioceno y el pleistoceno, generaron sedimentación pos-rift y un evento de levantamiento (Caro y Spratt, 2003). Después la sedimentación fue principalmente adyacente a las cuencas. Las principales inconformidades están definidas en el eoceno medio, en el eoceno medio a superior, en el oligoceno inferior, en el mioceno medio y en el plioceno superior. Otras discontinuidades intraformacionales también son registradas en el caribe colombiano (Caro y Spratt 2003). El estrechamiento activo de los dos cinturones de deformación Sinú y San Jacinto es el resultado de la convergencia entre la placa del caribe y la margen noroeste de la placa suramericana, en dirección sudeste, a una tasa aproximada de $\pm 2-6$ mm/año durante el pleistoceno (Trenkamp et al. 2002). Con base en morfología de fallas activas, se estiman desplazamientos dextrales de dirección nordeste a razón de $\pm 4-10$ mm/año durante el holoceno. Durante los últimos 20 Ma, el cerramiento del Arco de Panamá contra el borde NW de América del Sur, comprimió y expulsó tectónicamente

los sedimentos cenozoicos acumulados en la margen continental, para la margen no limitada del caribe, originando una faja de cabalgamientos transpresivos en serie, afectada por la intensa actividad diapírica, aumentando el ángulo de las cuñas anteriores y permitiendo el levantamiento de las Serranías Sinú y San Jacinto, limitando las sub-cuencas de Plato y San Jorge.

En la región central del caribe colombiano, las fallas de Santa Marta, Bucaramanga y Oca continuaron su actividad con rampas laterales de sistemas de cabalgamientos que levantan tectónicamente la Serranía de Perijá y la de la Sierra Nevada de Santa Marta (Kellog, 1984), mientras que el paso de la Cresta de Beata por la alta Guajira coincide con el desarrollo de la falla de Cuisa, configurando un sistema transtensivo regional (ver figura 2).

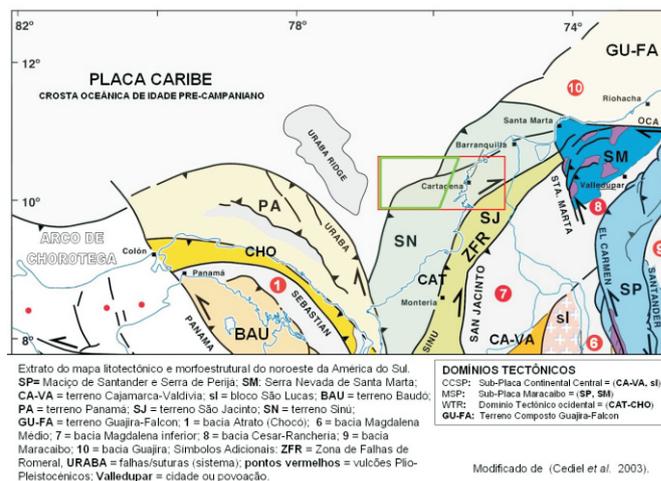


Figura 2. Bloques tectónicos del norte de Colombia (extraído de Cediel et al., 2003). El rectángulo rojo localiza el área de estudio entre los cinturones de San Jacinto (SJ) y Sinú (SN). El trapecio de color verde marca el área del bloque de exploración Sinú.

El cinturón Sinú es una secuencia sedimentaria de casi 8 km de espesor (Duque-Caro 1984), constituida principalmente por rocas turbidíticas y pelágicas del oligoceno-plioceno (Bürgl s/d In: Morer y Nichols, 1962). Las estructuras geológicas y los ejes de levantamiento regional en la zona presentan direcciones predominantes N-S a N25E (ver figura 2) y se caracterizan por la alternancia de sinclinales apretados y anticlinales amplios, con fallas inversas, subordinadamente normales (Page, 1986) y de crecimiento (Vernette, 1989). Tanto en la plataforma, como en la zona emergida, es bastante común la presencia de estructuras diapíricas, evidenciadas principalmente por domos y volcanes de lodo muy bien desarrollados entre el noroeste y el norte de la costa caribe colombiana (Correa y Vernet, 2004), cuya clasificación fue muy bien caracterizada por Briceño y Vernet (1992).

4. METODOLOGÍA

Una herramienta de apoyo analítico de la tectónica actual del Caribe colombiano es el análisis de mecanismos focales de los sismos recientes, a pesar de existir una deficiencia de datos debido a la ausencia de una red sismológica local. La información de la red sismológica internacional (NEIC) ha permitido alcanzar aproximaciones a las posibles soluciones cinemáticas para el sur del Caribe, relacionándolas con los resultados de los análisis de mecanismos focales de las zonas vecinas. Tales análisis han revelado que el comportamiento de la Placa del Caribe, en relación con la de América del Sur, no es puramente compresiva, relacionada a subducción en dirección SW, mas sí transtensiva con componente destrolateral en dirección ENE (Trenkamp et al., 2002).

El análisis morfoestructural representó una de las mejores técnicas para la caracterización del área de estudio y la base fundamental para la identificación de estructuras controladoras del relieve. El déficit de información topográfica y barimétrica detallada en el área de estudio motivó la búsqueda de otras fuentes de información para la realización de un nuevo tratamiento de datos, de tal forma que permitiese la unificación de toda la información dentro de una misma visualización, con el objetivo de interpretar las posibles estructuras responsables por la formación de rasgos relacionados al diapirismo de lodo (ver figura 3).

Con el fin de localizar los sectores con presencia de estructuras dómicas y lineamentos a ellos relacionados,

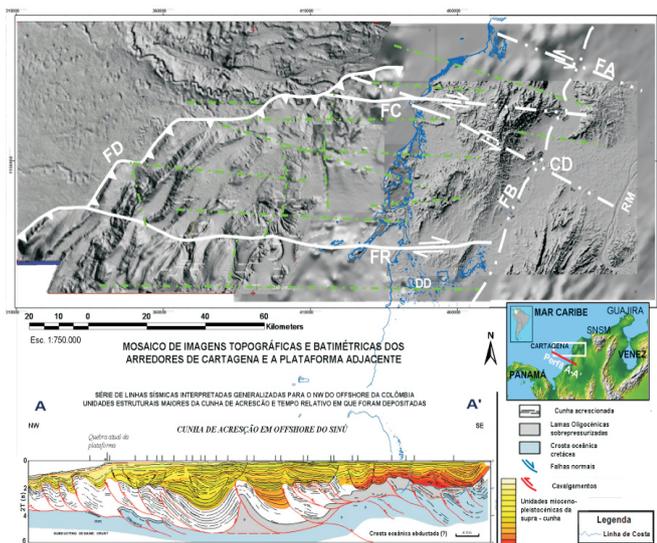


Figura 3. Imagem do relevo entre o bloco de exploração Sinú e as vizinhanças de Cartagena com a interpretação estrutural regional para offshore do NW colombiano. Destacam-se as falhas regionais mais importantes (linhas brancas) e os lineamentos gerais relevantes para este estudo (linhas a traços verdes). FA: Falha de Apure, FB: Falha inferida de Bolívar, FC: Falha de Canoas, FD: Frente de Deformação, FR: Falha de Rosário, CD: Falha do Canal del Dique, DD: Delta to Canal del Dique, RM: Rio Magdalena. Software: ArcGIS® v9.2. Perfil estrutural elaborado por TEPMA-FINA-ELF (2002)

fue realizada interpretación de 1341 fotografías aéreas antiguas, disponibilizadas (sic) por INGEOMINAS, para el área de estudio, a escalas entre 1:10.000 y 1:60.000. En 251 de ellas se detectaron domos, diapiros y rasgos alineados de interés para el estudio. Con base en la fotointerpretación geomorfológica y en observaciones previas en el área, fue realizada una visita al campo para adquisición de datos estructurales, llevando en cuenta que el detalle y el peso de la información deberían ser consistentes con la escala de trabajo (ver figura 4).

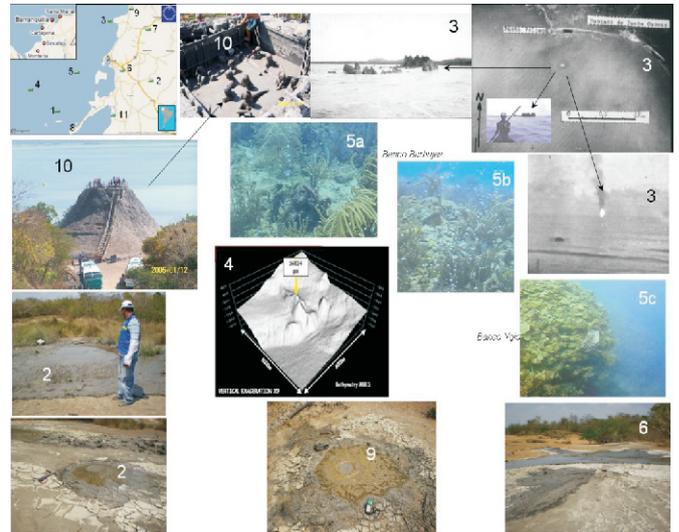


Figura 4. Ejemplos de domos diapíricos en la región norte de Cartagena. El esquema de localización incluye otras manifestaciones en el área. Los números localizan cada sector, en este caso: 1) volcán de Isla Tesoro (islas del Rosário), 2) este del municipio de Turbaco, 3) Punta Canoas, donde en 1979 se presentaron erupciones violentas con formación de islas temporales y combustión de gas, 4) oeste del área de estudio desde la parte superior del talud (volcán Esperanza) hasta el pié de talud (Jaramillo, 2002), 5) Bancos de Salmedina (GIO 2005), 6) Volcán del barrio El Rodeo, al sur de Cartagena, 7) este del municipio de Bayunca, 8) punta de Barú (fig. 51), 9) Arroyo de Piedra, 10) El Totumo (cortesía I. D. Correa) y 11) localidad de El Recreo, al sur de Pasacaballos.

La adquisición de información estructural en el área de estudio consistió, básicamente, en tomar medidas de estratificación, fracturas, fallas (datos pareados plano/estria) y orientaciones de lineamientos estructurales, control de drenaje, direcciones preferenciales de geformas de relieve, tales como sierras y colinas, domos y volcanes de lodo activos e inactivos alineados o elongados, crestas y lomos de ballena, depresiones, grietas y planos de diaclasas asociados a los domos o altos topográficos coralinos (ver figuras 5 y 6, página siguiente).

Fueron revisadas líneas sísmicas disponibles en la zona costera norte del país y registros e informes de sísmica de pozo en el Caribe. Se incluyeron secciones multicanal, 2 en tierra y 3 en plataforma, y 7 imágenes recuperadas de los trabajos de Vernet (1986) de sísmica 3.5 khz, que el autor correlacionó con registros sísmicos de AirGun de 12 kHz, dispuestas paralelamente a las líneas multicanal (Ver figuras 7 y 8, página siguiente).

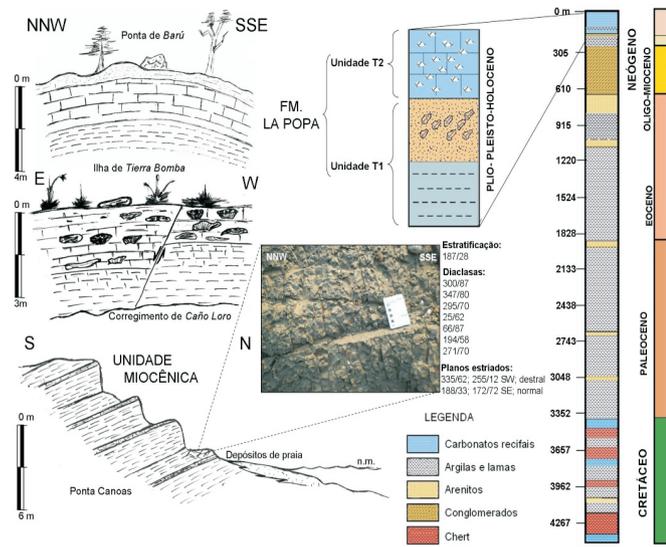


Figura 5. Estratigrafía de la Fm. La Popa y columna estratigráfica generalizada para la región de Cartagena. A la izquierda, perfiles litológicos descritos en campo en las localidades de Punta Canoas, la isla de Tierra Bomba y la Punta de Barú. Las descripciones de campo (centro arriba) corresponden con la definición del texto. A la derecha, columna representativa para el prisma de acreción Sinú, según informes de la industria del petróleo.

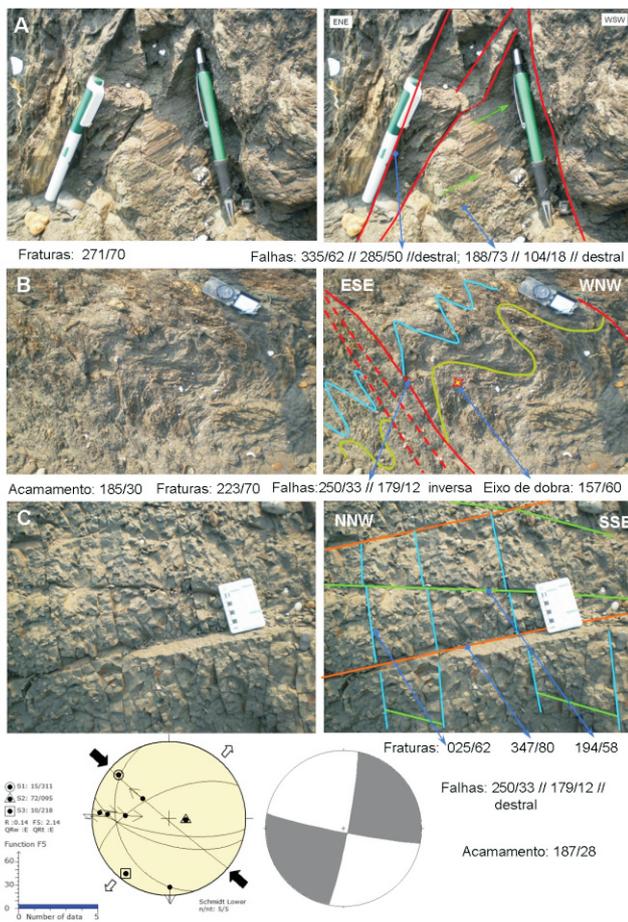


Figura 6. Depósitos turbidítico-arcillosos deformados y fallados en el extremo norte del área, sector este del faro de Punta Canoas. A: aspecto (a la izquierda) e interpretación (a la derecha) del afloramiento, mostrando el plano de falla principal, señalando las estrías (flechas verdes); B: aspecto e interpretación de las arcillolitas miocénicas falladas con pliegues de arrastre; C: sector apenas fracturado mostrando las tres familias de fracturas más evidentes. Debajo, proyección estereográfica de los planos y el respectivo régimen de esfuerzos compresivo strike-slip.

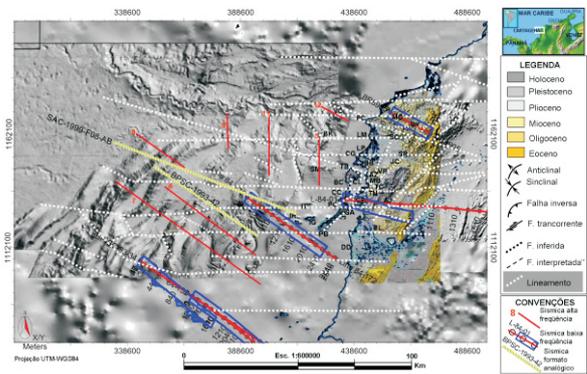


Figura 7. Mapa de correlación entre la distribución de la información sísmica disponible para el estudio y los lineamientos morfointerpretados en la plataforma adyacente a Cartagena. Son resaltados los lineamientos de dirección E-W, que afectan las estructuras compresivas NE-SW. VC: Volcán Canoas, PT: Punta Cantera, PC: Punta Canoas, MC: Los Morros - Serranía de Canalete, BK: Banco de Nokomis, BQ: La Boquilla, BY: municipio de Bayunca, SR: municipio de Santa Rosa, VR: Volcán del barrio El Rodeo, SM: bancos de Salmedina, JC: región de Juan Congo, MB: Membrillal, TB: distrito de Tierra Bomba, BC: Distrito de Boca Chica, CL: Distrito de Cano de Loro, TC: Municipio de Turbaco, TN: Municipio de Turbana, AJ: Municipio de Arjona, CT: morro Loma Carreto, LS: Loma El Siglo, CB: Municipio de Pasacaballos, CC: Crista El Carranco, BT: Bancos do Tesoro, IT: Isla Tesoro, PN: Porto Nao, PG: Punta

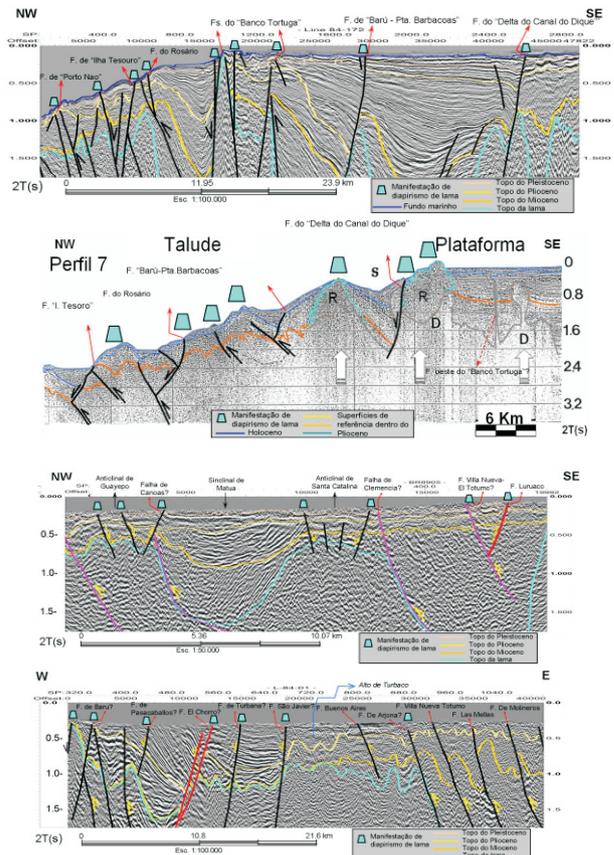


Figura 8. Secciones sísmicas con la interpretación correspondiente. Las dos primeras, BR-1989-05 y NW-1984-01, localizadas en la zona emergida (Figura 7). En la primera sección (arriba), las fallas en color lila son inversas cartografiadas en este trabajo como superficies de despegue; y las negras, son fallas normales o inversas más superficiales. La segunda sección (abajo) muestra el extremo oeste del registro original, entre el Canal del Dique, al oeste, y Punta Gigantes, al este. En ambos casos, las fallas rojas, a pesar de su expresión, no están cartografiadas en la literatura. Los horizontes son apenas niveles de referencia basados en interpretaciones de la industria; y en color azul, se representó el techo del lodo miocénico. Las flechas amarillas indican el sentido de falla. Tercera sección, línea sísmica multicanal NW-1984-172 y abajo, perfiles sísmicos de 3.5 kHz entre el talud y la plataforma (perfil 7). Interpretación morfotectónica que correlaciona las estructuras más relevantes en el área del punto de vista regional y los rasgos más reconocidos en campo. Los nombres entre comillas son propuestos según el local geográfico donde afloran.

5. RESULTADOS OBTENIDOS

El control estructural regional en dirección NE-SW es bastante evidente desde la región inmersa, donde la quiebra de la plataforma se orienta en la misma dirección en que está orientada la Península de Barú y otros ejes de pliegues más proximales, hasta el interior del CDSJ. No obstante, observando la distribución de los planos de falla y las tensiones, se confirmó que existe otro conjunto de estructuras en la región, además de la tendencia NE-SW, entre el borde de la plataforma y la porción interior de la zona costera, que son las estructuras de orientación E-W. Estas estructuras fueron anteriormente definidas a partir de parámetros morfoestructurales, como la orientación de los bancos, bajos, islas, colinas, morros y sierras del área. Los campos de tensiones definidos a partir del análisis de los planos de fallas, por el método de diedros rectos, evidencian el predominio regional de un SHmax orientado en dirección WNW-ESE a NW-SE, con o Shmin orientado en dirección NNE a NE (Ver figura 9).

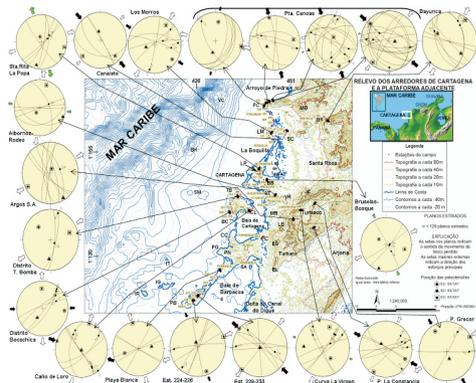


Figura 9. Proyecciones ciclográficas de los planos estriados y fracturas en los alrededores de Cartagena. Convenciones iguales a las de los mapas

Este arreglo del campo de tensiones corresponde a un cuadrante NW compresivo, responsable por la presencia, desde regímenes transcurrentes puros, pasando por transcurrentes distensivos, a distensión oblicua y, más raramente, regímenes transcurrentes compresivos. En todos estos casos se tiene como resultado la generación de un componente dextral en las fallas de dirección E-W. Casos localizados de variaciones en los ejes de tensiones, como aquel del sector de Punta Canoas, donde las direcciones de los esfuerzos principales se presentan preferiblemente orientados en dirección NW-SE, pueden resultar en la dispersión de los esfuerzos a lo largo de planos de falla de dirección irregular, como sucede con la falla de Canoas. En este caso, estas variaciones generan relajamientos (releasing bend) y restricciones (restraining bend) que explican las mudanzas en las direcciones de los ejes de esfuerzos principales.

Localmente se evidencia otro patrón de esfuerzos, representado por la orientación radial de la estratificación, que presenta baja declividad, reflejando una conformación de cúpula sobre los domos diapíricos.

En estos casos, el análisis de fracturas asociadas muestra control por campo de tensiones oblicuo distensivo a radial distensivo. Ejemplos son vistos en el municipio de Bayunca, barrios Bosque, Paraguay y Bruselas, Albornoz, Membrillal, El Rodeo, Santa Rita y el morro de La Popa, y Playa Blanca, en Barú, donde se presentan desplazamientos laterales con componente normal, en los que la posición de los esfuerzos principales indica régimen de tensiones oblicuo distensivo a radial distensivo. Los dominios estructurales de estos sectores muestran orientaciones principales de las estructuras secundarias, según E-W, NE-SW e NW-SE. Así las estructuras regionales de dirección NE ejerzan gran control en los ejes de deformación, se destacan en la deformación de la secuencia sedimentaria superior entre el plioceno hasta el reciente, las grandes estructuras de orientación E-W y WNW-ESE que presentan movimiento dextral, y de orientación NW-SE con movimiento sinistral, antitético (ver figura 10)

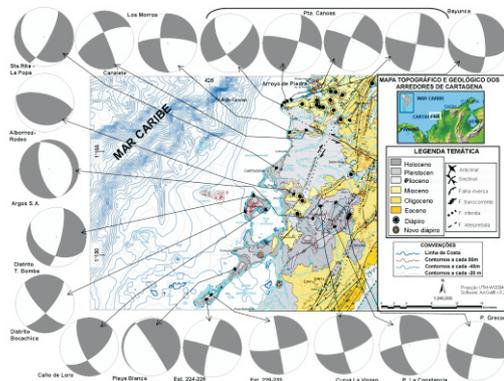


Figura 10. Determinación de campos de esfuerzo a partir de análisis cinemático de fallas en los locales de levantamiento estructural.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las estructuras neotectónicas del diapirismo de lodo presentes en la región emersa e inmersa de la región de Cartagena o Bloque Sinú están representadas en la figura 11, a continuación:

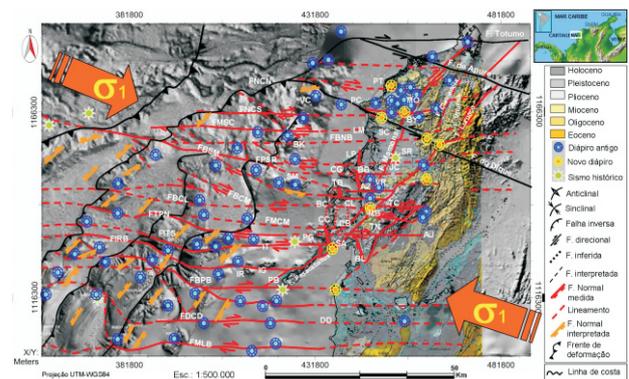


Figura 11. Mapa de estructuras de control neotectónico del diapirismo de lodo en los alrededores de Cartagena y la plataforma adyacente. Se resaltan las estructuras E-W y las secundarias a ellas asociadas. De sur para norte, FMLB: Falla de María La Baja, FDCD: Falla Delta Canal del Dique, FBPB: F. Barú-Pta. Barbacoas, FIRB: F. Islas Rosarío-Barú, FTPN: F. Tesoro-Porto Nao, FCMM: F. Carranco-Marinás-Monterrey, FBCM: F. Boca Chica-Membrillal, FBCL: F. Chamba-Caño Loro, FBMS: F. Bancos Salmedina-Albornoz, FPSR: F. Popa-Sta. Rosa, FMSC: F. Morros-Sierra Canalete, FNCS: F. Nova Canoas Sur y FNCN: F. Nueva Canoas Norte.

El mapa ilustra la localización aproximada de los diferentes tipos de manifestaciones de diapirismo de lodo encontrados en el área, y descritos en trabajos anteriores, además de manifestaciones nuevas, cartografiadas en el presente trabajo. Algunas de las clasificadas como "nuevas", en realidad ya eran conocidas popularmente, pero no habían sido incluidas en los mapas publicados.

Se infiere ahora que el control tectónico del diapirismo de lodo a lo largo del cinturón deformado Sinú, de orientación NE, puede ser evidente por cuanto estas grandes estructuras de vergencia general NW, que definen el prisma de acreción Sinú, se encuentran restringidas al material arcilloso. El origen de este prisma está definido por un sistema acrecional tectónico en ambiente convergente a transcurrente y a tectónica posmiocénica, controladora del diapirismo de lodo y, típicamente, del tipo de piel delgada (*thin-skin tectonics*), cuya movilidad y estructuración son favorecidas por la presencia del nivel de lodo inferior, de edad miocénica, que actúa como un nivel de despegue. La sobrepresurización del lodo favorece la generación y/o reactivación de fracturas y fallas secundarias a la compresión NW, que se asocian al binario transcurrente distal E-W. Estas estructuras secundarias se orientan en las direcciones WNW-ESE, E-W, ENE-WSW, cuando distales, y NNW-SSE a NNE-SSW, cuando sinistralas, correspondiendo a las direcciones que se manifiestan en la morfología del área, resultado de la actividad de las fallas generadas por la compresión NW-SE.

Las fallas de orientación NE activas que ocurren al este del prisma de acreción y del área de estudio, que se presentan a lo largo del Cinturón San Jacinto y en la región del valle medio del Magdalena, siguiendo subparalelas al tren de la zona de fallas de Romeral no evidencian diapirismo de lodo y predomina allí un ambiente frágil. Caso contrario, en el área de estudio, a lo largo de las fallas o lineamientos transversales de dirección WNW-ESE, oblicuos a la falla de Oca, y a lo largo de las subparalelas homónimas, como las fallas de Canoas y la del Canal de Dique, hay una intensa actividad diapírica. No obstante esa relación estrecha entre las estructuras E-W y la formación de domos, puede existir actividad de vulcanismo de lodo en razón de la diferencia de densidades y de la sobrepresurización de lodos, independiente de la ocurrencia de movimientos tectónicos continuos. Es decir, que una vez abiertas las fallas y fracturas por donde emergen las arcillas, es posible que, localmente, ellas continúen ascendiendo constantemente, así la actividad tectónica local se haya estabilizado temporalmente. Por otro lado, se debe resaltar que la distribución de las tensiones tectónicas y de la sobrepresurización del nivel de lodo miocénico no es totalmente homogénea, lo que permite la reactivación y/o generación de estructuras locales. Estos dos factores

contribuyen a la presencia de volcanes activos en algunos lugares y de inactivos en otros. Estos procesos que actúan en el control de migración de lodo, pueden también tener efectividad en la migración de hidrocarburos a través de las estructuras neotectónicas.

7. CONCLUSIONES

Las estructuras levantadas en campo explican consistentemente la relación entre el aspecto del relieve, la geología de la zona de estudio y los campos de tensiones determinados a partir de los sismos en trabajos pretéritos. Estas estructuras son, predominantemente, estructuras híbridas secundarias al eje de deformación NW-SE, que consisten en planos tipo R, R', T y P, responsables por el control morfoestructural observado en la zona emergida, en los alrededores de Cartagena.

Se reconocieron también algunas variaciones locales en las direcciones de los ejes de compresión I, que pueden estar relacionadas, bien a las variaciones en la dirección de las estructuras E-W, responsables por releasing e restraining bends locales, o bien a los procesos de reactivación intrínsecos a la evolución a lo largo de los planos de falla, facilitados por la sobrepresurización de lodos.

El presente trabajo revela, por tanto, que la formación de los volcanes de lodo con exudaciones de gas, obedece al carácter híbrido de las estructuras secundarias, debidas a los esfuerzos compresivos regionales NW-SE, asociado a las fallas distensivas orientadas E-W, WNW-ESE y NW-SE, producidas por la transtracción consecuente de dirección ENE-WSW, entre las placas del caribe y de América del Sur.

El lodo miocénico infrayacente a la secuencia sedimentaria turbidítica se encuentra afectado por el proceso de estrechamiento en dirección del σ_1 , siendo sobrepresurizado a favor de la impermeabilidad que proporciona el paquete turbidítico superior miopliocénico. Así, el lodo se inyecta a través de las fracturas secundarias y fallas normales (de carácter distensivo) que se forman una vez el sistema compresivo supera el nivel rúptil de los turbiditos, también por medio de fallas transcurrentes de dirección aproximada E-W y otras estructuras sintéticas y antitéticas, que son responsables por la presencia de los lineamientos descritos por O. Aristizábal (2008). Una vez ocurrido el fallamiento secundario, en las intersecciones de planos de falla inversa y transcurrentes (con componentes normales o inversas), por compensación, el lodo encuentra un

conducto vertical para alcanzar la superficie. Se produce, entonces, un diapiro de lodo, que deforma los niveles detríticos y carbonáticos plio-pleistocénicos y holocénicos superiores, correspondientes a la formación La Popa.

8. AGRADECIMIENTOS

Agradezco inmensamente el apoyo económico de la Coordinación de Perfeccionamiento de Personal de Nivel Superior CAPES, al Instituto de Geociencias de la Universidad Federal Fluminense UFF y al Departamento de Geología/LAGEMAR (Brasil), también al programa de Maestría en Geofísica del Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia, al Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS) y al programa de Maestría en Ciencias de la Tierra da EAFIT.

9. REFERENCIAS

- Briceño, L. A., Vernet, G., (1992). Manifestaciones del diapirismo de lodo en el margen colombiano del caribe. *Geofísica Colombiana*. Bogotá, n. 1, pp. 21-30.
- Burel, T., (1982). Caractérisation des modalités d'évolution récente de la marge continentale Nord-Colombienne. *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine*. Bordeaux, n. 21, pp. 161-166.
- Bürgl, H., (1965). El límite oligo-mioceno en el terciario marino de Colombia. *Rev. Acad. Col. Cienc., Ex. Fís. y Nat.*, Bogotá, n. 42, pp. 245-258.
- Caro, M. and Spratt, D., (2003). Tectonic evolution of the San Jacinto fold belt; fold-fault research project, University of Calgary, February 2003, CSEG RECORDER. Focus Article. [S. l.].
- Case, J. E.; Durán, S. L.; Lopez, R. A.; Moore, W. R., (1971). Tectonic investigations in western Colombia and eastern Panama. *Geol. Soc. Am. Bull.* [S. l.]. v. 82, pp. 2685-2712.
- Case, J.; Holcombe, T.; Martin, R., (1984). Map of geologic provinces in the Caribbean region. *Mem. Geol. Soc. Am.* [S. l.]. v. 162, pp. 30.
- Correa, I. D. y Verenette, G., (2004). Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes - Turbo) costa caribe colombiana. *Bol. Invest. Mar. Cost. Santa Marta*, v. 33, pp. 7-28.
- Duque-Caro, H., (1990). Neogene stratigraphy, paleoceanography and paleobiogeography in northwest South America and the evolution of the Panama Seaway: palaeogeogr. *Paleoclimatol. Palaeoecol.* [S. l.], v. 77, pp. 203-234.
- Duque - Caro, H., (1979). Major structural elements and evolution of northwestern Colombia. In: Watkins, J. S.; Montadert, L. and P.W. Dickerson, P. W.(Edi.). *Geological and geophysical investigations of continental margins*. Tulsa, Okla. American Association of Petroleum Geologists. (AAPG memoir; 29, pp. 329-351.
- Frey Mueller F.T.; Kellogg J.N. and Vega, V., (1993). Plate motions in the north Andean region, *J. Geophys. Res.* 98, (B12), pp. 21853-21863.
- GIO - Grupo de Investigación en Oceanología. Rasgos geomorfológicos En: estudio oceanográfico integral de los bancos de Salmedina, caribe Colombiano. Cartagena de Indias: Escuela Naval Almirante Padilla; Bogotá: Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología
- Gómez, A.; Martínez, J. I. E.; Yokoyama, Y., (2005). El holoceno tardío en la región de Cartagena: reconstrucción paleoambiental de las terrazas marinas bajas. En: Congreso Colombiano de Geología, 10, 2005, Bogotá. *Memorias*. Bogotá
- Guzmán, O. G., (2003). Mapa geológico de Sinú - San Jacinto y borde oeste del valle inferior del Magdalena. Bogotá : INGEOMINAS; Université de Liège-Belgique. 1 mapa. Escala 1: 300.000
- Guzmán O. G., Gomez L. E., Serrano S. B. E., (2004). Geología de los cinturones del Sinú, San Jacinto y borde occidental del valle inferior del Magdalena, caribe colombiano, y mapa geológico de Sinú-San Jacinto y borde oeste valle inferior del Magdalena. Escala 1:300.000. Bogotá D.C.: Instituto de Investigación Geocientífica Minero-Ambiental y Nuclear et Université de Liège - Belgique, Ministerio de Minas y Energía. INGEOMINAS.
- Jaramillo, J. M., (2002). Informe técnico anual - año 2002) Memoria de geología y geofísica. Contrato de asociación Sinú, informe de geología y geofísica. [Bogotá]: TEPMA-FINA-ELF. 127p.
- Javelaud, O., (1987). La sedimentation du plateau continental de la Colombia caraibe au tours du quaternaire terminal. Bordeaux: Université de Bordeaux. PhD T'hèse (Doutorado), Université de Bordeaux, La France, 383 p.
- Kellogg, J.N., (1984). Cenozoic tectonic history of the Sierra de Perija, Venezuela-Colombia, and adjacent basins, in W.E. Bonini, R.B. Hargraves, and R. Shagam, eds., *The caribbean-south american plate boundary and regional tectonics: GSA Memoir 162*, pp. 239-261.
- Kellogg, J. N.; Bonini, W. E., (1982). Subduction of the caribbean plate and basement uplift in the overriding south american plate. *tectonics*. [S.l.], v. 1, pp. 251-276.
- Kellog, J. N. y Vega, V., (1995). Tectonic development of Panama, Costa Rica and the colombian Andes: constraints from global positioning system geodetic studies and gravity. *Geological Society of America*. [S.l.]. Special Paper, v. 295, pp. 75-90.
- Kolla, V., Buffler, R. T. and Ladd, J. W., (1984). Seismic stratigraphy and sedimentation of Magdalena fan,

- southern colombian basin. Caribbean sea. AAPG Bull. [S.l.], v. 68, n. 3, pp. 316-332.
- Mann, P., (1999). Caribbean sedimentary basins: classification and tectonic setting from jurassic to present. Sedimentary basins of the world. Caribbean basins. [S.l.], v. 4, pp. 3-31.
- Maufrett, A. and Leroy, S., (1997). Seismic stratigraphy and structure of the caribbean igneous province. tectonophysics. [S.l.], v. 283, pp. 61-104.
- Meissner, R. O.; Flueh, E. R.; Stibane, F., and Berg, E., (1976). Dynamics of the active plate boundary in southwest Colombia according to recent geophysical measurements. Tectonophysics. [S. l.], v. 35, pp. 115-136.
- Molnar, P. and Sykes, L. R., (1969). Tectonics of the Caribbean and middle America regions from focal mechanisms and seismicity. Geological Society of Amér. Bull. [S.l.], v. 80, 14 figs., pp. 1639-1684.
- Morer, J. J. e Nichols V., E., (1962). Calizas de la región de Cartagena. Informe, Boletín Geológico Ingeominas, Bogotá, v. 9, n. 1343 pp. 1-3, pp. 97-114,4 figs
- Nivia, A., (1989). El terreno Amaime: una provincia volcánica acrecionada de basaltos de mesetas oceánicas. En: Congreso Colombiano de Geología, 5, 1989, Bucaramanga. Memorias. Bogotá: Ingeominas, pp. 1-30.
- Nivia, A., (1987). Geochemistry and origin of the Anaimé and volcanic sequence, southwestern Colombia. Thesis university of Leicester, Leicester, U.K. 163 p.
- O. Aristizábal., (2008). Controle neotectônico do diapirismo de lama na região de Cartagena, Colômbia. Niterói: Universidade Federal Fluminense. Tese Mestrado, 224 p.
- Page, W.; Alvarez, R. trad., (1986). Geología sísmica y sismicidad del noroeste de Colombia. [S. l.]: ISA-INTEGRAL-WOODWARD - C LYDE CONSULTANTS. Ingeniería e Hidrosistemas IEH Ltda. 156p.
- Page, W., (1983). Holocene deformation of the caribbean coast, northwestern Colombia. In : "Field trip guide book, General Geology, Geomorphology and neotectonics of northwestern Colombia", n. 10, Cartagena. Conferencia Geológica del caribe. Cartagena, pp. A1-120.
- Sykes, L. R. and Ewing, M., (1965). The seismicity of the caribbean region. Jour. Geophys. Research. [S. l.], v. 70, n. 10, pp. 5065-5074.
- Talwani, M., (1959). Rapid gravity computations for two dimensional bodies with application to the Mendocino Submarine Fracture Zone. Journal Geophysical Research. [S.l.], v. 64, pp. 49-59.
- Talwani, M., (1965). Shipborne continuous gravity measurements in the eastern caribbean (Abs.). Am. Geophys. Research. [S.l.], v. 73, pp. 3821-3845.
- Trenkamp, R.; Kellogg, J. N.; Freymueller, J T. and Mora, H. P., (2002). Wide plate margin deformation, southern central America and northwestern south America, CASA GPS observations. Journal of South American Earth Sciences. [S. l.], v. 15, n. 2, Jun., pp. 157-171.
- Vernette, G., (1986). La plate-forme continentale caraibe de Colombie (du débouché du Magdalena au golfe de Morrosquillo): importance du diapirisme argileux sur la morphologie et la sedimention. PhD Thèse (Doutorado) N°20, Université de Bordeaux, Memoires de l'Institute de Geologie du Bassin d'Aquitaine, La France. 386 p.
- Vernette, Georges. (1989). Examples of diapiric control on shelf topography and sedimentation patterns on the colombian caribbean continental shelf. Journal of south american earth sciences. [S. l.], v. 2, n. 4, pp. 391-400.