

Sobre emanaciones de gas natural y la evidencia preliminar de subsidencia en la bahía Cartagena de Indias (Colombia)

On natural gas venting and preliminary results on subsidence in Cartagena bay (Colombia)

DOI: 10.26640/22159045.448

Fecha de recepción: 2018-06-29 / Fecha de aceptación: 2018-08-31

Héctor Mora P. *, José H. Carvajal **, Alex Ferrero R. *, Herman León R. **** y Carlos A. Andrade A. *******

Mora, H., Carvajal, J., Ferrero, A., León, H. y Andrade, C. (2018). *Sobre emanaciones de gas natural y la evidencia preliminar de subsidencia en la bahía Cartagena de Indias (Colombia)*. Bol. Cient.CIOH (37):35-51. ISSN 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. DOI: 10.26640/22159045.448

RESUMEN

Se reportan actividad de emanaciones de lodo y gas en la región. El levantamiento batimétrico realizado con sonda multihaz en el sur de la bahía de Cartagena durante 2015-2016 permitió evidenciar actividad diapírica de lodos en el sector, con la presencia de numerosos manaderos de fluidos y gas y marcas circulares (pockmarks) de unos 20 m de diámetro y hasta 3 m de profundidad, localizados sobre el plano lodoso de fondo. La pérdida de zona costera y las emanaciones de lodo y gas presentes en zonas de la plataforma vecinas y mediciones con DGPS de alta resolución vertical en la bahía confirman la ocurrencia de subsidencia diferencial en la región.

PALABRAS CLAVES: bahía de Cartagena, diapirismo, marcas de gas, subsidencia.

ABSTRACT

Mud and emissions are reported in the region. A multibeam survey carried out during 2015-2016 in the Bay of Cartagena showed numerous pockmarks (20m in diameter, 3m in depth) in the flat mud surrounding mud volcanoes in that area evidencing active natural gas venting in the south of the Bay. The observation of coastal land loss related to natural gas venting in the neighboring continental shelf and in situ high vertical resolution DGPS in the Bay confirm the existence of subsidence in the area.

KEYWORDS: Cartagena Bay, diapirism, pockmarks, subsidence.

* Servicio Geológico Colombiano, (SGC). Correo: hmora@sgc.gov.co

** Servicio Geológico Colombiano, (SGC). Correo: jcarvajal@sgc.gov.co

*** Comisión Colombiana del Océano (CCO), Bogotá. Correo: jefcioh@dimar.mil.co

**** Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, CIOH. Correo: hleon@dimar.mil.co

***** Facultad de Oceanografía Física, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla". Correo: candrade@enap.edu.co

INTRODUCCIÓN

Desde que el mar llegó a los niveles actuales, luego de haberse elevado alrededor de 120 m debido al deshielo post-glacial 11700 años \pm 99 años (Walker *et al.*, 2009), el nivel del mar se ha mantenido cercano al actual, pero ha venido subiendo en forma neta, como resultado del efecto de varios aspectos influyentes, tales como el calentamiento del agua, el agua que le llega al mar por derretimiento del hielo y el movimiento de la corteza terrestre en los bordes de las placas, subiendo o bajando conforme a la actividad tectónica (IPCC, 2013). Este reporte estableció que, de manera general, el mar estuvo subiendo alrededor de 1.8 mm/año entre 1961 y 2003, siendo de 2.8 mm/año entre 1993-2003, lo cual ha sido atribuido principalmente al calentamiento global, el derretimiento de glaciares, y el deshielo de Groenlandia y de Antártica.

Los factores objetivamente medidos son los relacionados al nivel del mar con referencia del lugar donde se encuentran los medidores de nivel, que se encuentran posicionados con precisión, en las costas del mundo (GLOSS, 2016). En ese sentido, se tienen en cuenta, no solamente los factores directamente relacionados con la naturaleza de la masa del agua, sino también, los asociados con el movimiento que tienen los sensores debido a la dinámica tectónica de las placas donde se encuentran localizados. Esto tiene como consecuencias que la elevación relativa del nivel del mar puede ser distinta de un sitio a otro.

Análisis del nivel relativo del mar

Con base en datos tomados en el mareógrafo colocado inicialmente en la punta de Castillogrande y, posteriormente, en el muelle del CIOH, en la isla de Manzanillo, los cuales han sido coleccionados por la NOAA desde 1951 al 2000, se realizó un cálculo que dio como resultado un aumento del nivel del mar en la bahía de Cartagena de 3.58 mm/año (Torres *et al.*, 2006). Posteriormente, un nuevo estudio con el mismo grupo de datos estableció que en la bahía de Cartagena hubo una tendencia al

aumento relativo del nivel del mar de 4.5 mm/año (Figura 1), mientras que en el puerto de Cristóbal (Panamá) el registro solo mostró un aumento de 1.6 mm/año (Andrade, 2008).

Recientemente, un análisis más detallado mostró que el nivel relativo en Cartagena subió a una mayor velocidad (5.38 ± 0.5 mm/año) en los últimos 44 años con relación a Cristóbal que tuvo una tendencia de 2.0 ± 0.2 mm/año, Magueyes en Puerto Rico de 1.3 ± 0.6 mm/año, o Lime Tree en los Cayos de la Florida de 2.9 ± 1.5 mm/año (Torres y Tsimplis, 2013), mostrando que el nivel relativo del mar ha subido más rápido en Cartagena que en otros puertos vecinos.

Como puede verse, la sobreelevación medida en el área de la bahía de Cartagena, con relación al resto del Caribe, pareciera que hubiera venido aumentando y es más del doble respecto de los datos medidos en los costados del mar Caribe. Establecido el hecho que la superficie libre del mar debe ser parecido en partes relativamente cercanas. el que las pendientes del nivel del mar medidas en puertos como Cartagena y Cristóbal, separados por solo 300 millas sea tan diferente, indica que en el sector de la bahía de Cartagena existe un efecto adicional al del aumento del nivel del mar causado por el cambio climático que, como ya se dijo, hace que el nivel del mar aparente se eleve más rápido. Para entender las causas de estas diferencias se procedió a realizar una evaluación de la geomorfología de la bahía de Cartagena mediante una revisión de las variaciones morfológicas en la zona costera mediante el análisis del movimiento de la masa continental en el área de Cartagena y la caracterización espacial del fondo marino en el sur de la bahía.

METODOLOGÍA

Con el objeto de estudiar las características batimétricas del fondo en la bahía de Cartagena (Figura 1), se procedió a realizar una evaluación de la geomorfología mediante la revisión, tanto de las variaciones de las líneas de costa y de las profundidades medidas en diferentes épocas, como de la visualización detallada del fondo marino con sonda multihaz.

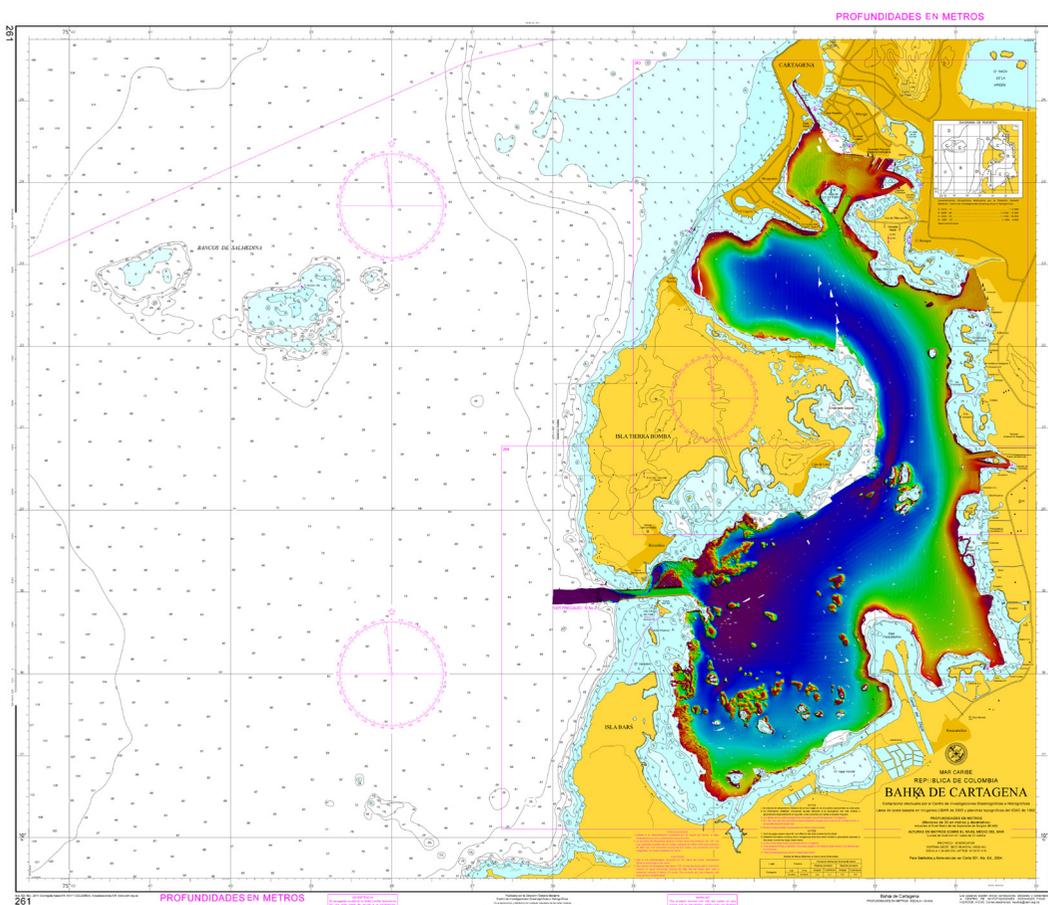


Figura 1. La bahía de Cartagena, los fondos y forma actual de la bahía sobre la Carta Náutica COL261 (CIOH, 2011).

Las estructuras subsuperficiales fueron encontradas y analizadas durante el levantamiento batimétrico de primer orden llevado a cabo con una ecosonda multihaz Reson 7125 en 200 y 400 khz 512 beams. Este equipo estuvo acompañado, tanto con un sistema de posicionamiento diferencial Trimble, como por sensores de movimiento Octans, utilizados durante las investigaciones realizadas por el CIOH en la bahía de Cartagena, entre 2015 y marzo de 2016.

El levantamiento con multihaz en el área del sur de la bahía mostró elevaciones muy abruptas que emergen de un fondo lodoso y plano y que rematan en su mayoría en cimas que apenas alcanzan la superficie del

mar (Figura 2). Muchas de estas numerosas estructuras tienen la apariencia de pequeños volcanes y se muestran como depresiones de formas redondas y circulares a manera de cráteres que son visibles en algunos casos (Figura 3).

El fondo de la bahía en ese sector es plano y se encuentra ocupado por un sinnúmero de marcas circulares en el lodo de alrededor de 20-30 m de diámetro y profundidades hasta 3 m (Figura 3). Estos "pockmarks" se interpretan como una zona de emanaciones activas de gas natural reciente y se muestran alineadas en muchos casos, y en otras dispersas pero en su mayoría se encuentran agrupadas formando localmente zonas circulares.

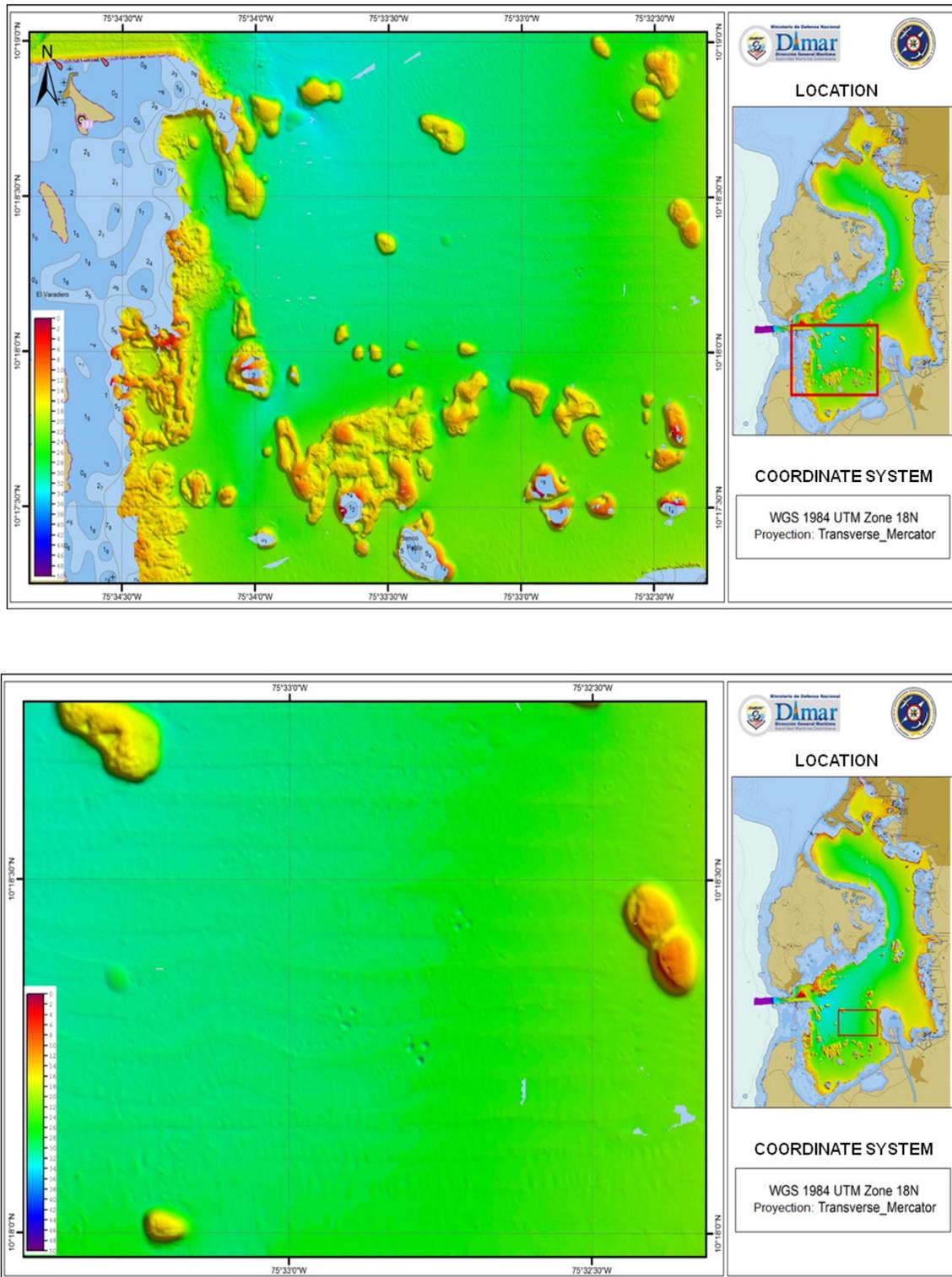


Figura 2. Vista del levantamiento multihaz en el área sur de la bahía de Cartagena. Obsérvese un fondo relativamente plano (en verde) salpicado por elevaciones que salen abruptamente hasta casi la superficie, lo cual se asocia con antiguos manaderos o bocas de volcanes de lodo, varias de las cuales aún conservan el cráter superior.

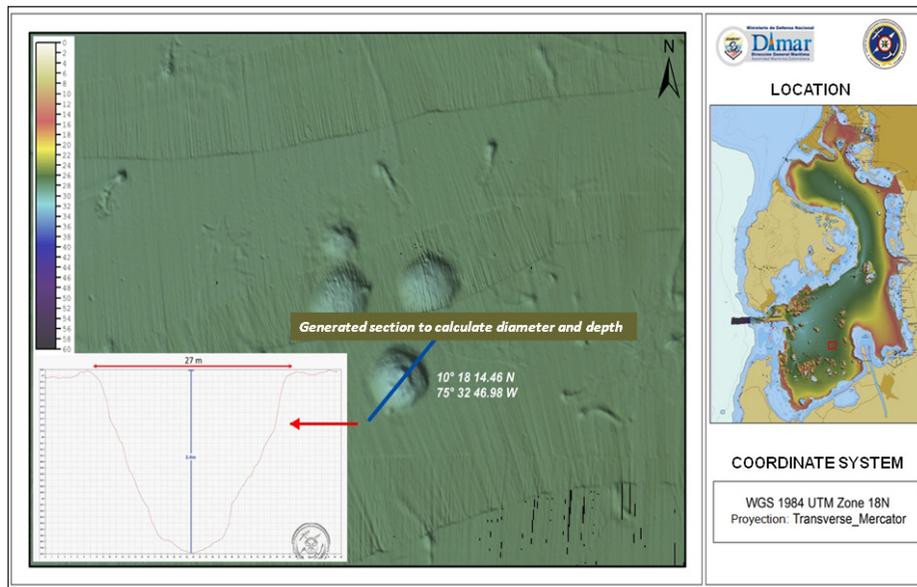


Figura 3. Detalles de las características encontradas en el fondo lodoso del área sur de la bahía de Cartagena de Indias. La mayoría de las bocas o manaderos de lodo tienen alrededor de 20 m de diámetro y se encuentran agrupadas o alineadas a 3 metros de profundidad como producto posible de un control estructural en profundidad.

También se detectaron las mismas marcas redondas en el tope de zonas hoy coralinas y de arenas carbonatadas como en el Bajo de la entrada de Bocachica (Figura 4) que presentan la misma apariencia de las marcas redondas,

con diámetros y profundidades similares. Así mismo, frente al área de Varadero se detectó la presencia de un domo con un cráter a manera de manadero de lodo y numerosas marcas de gas en el fondo lodoso más profundo (Figura 5).

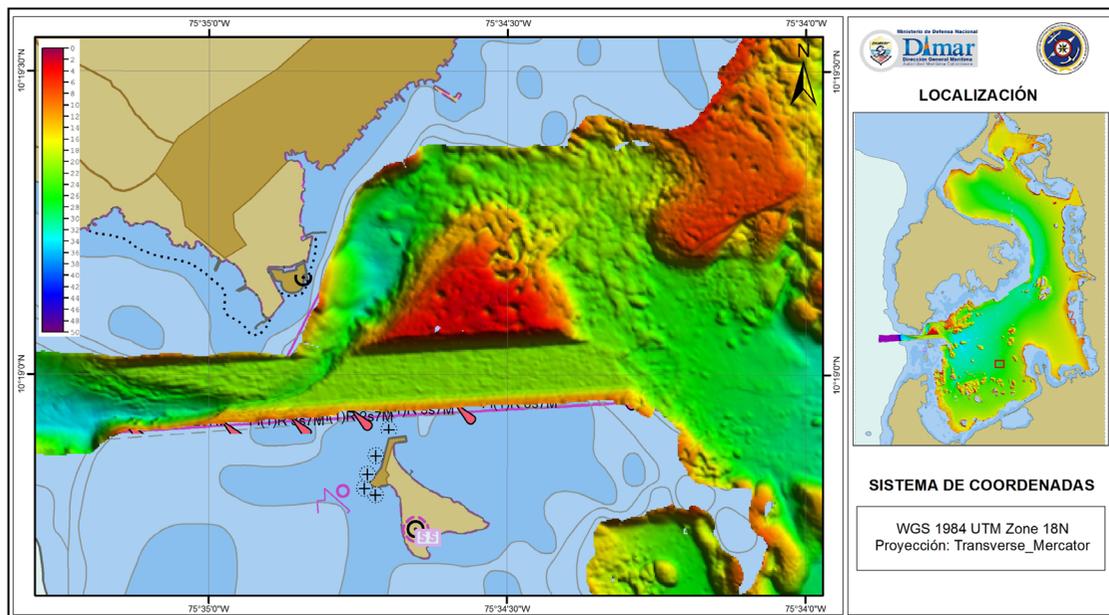


Figura 4. Las estructuras de emanación de lodo y gas también se encuentran en cercanías de las zonas arrecifales actuales como se puede observar en el bajo frente a Bocachica.

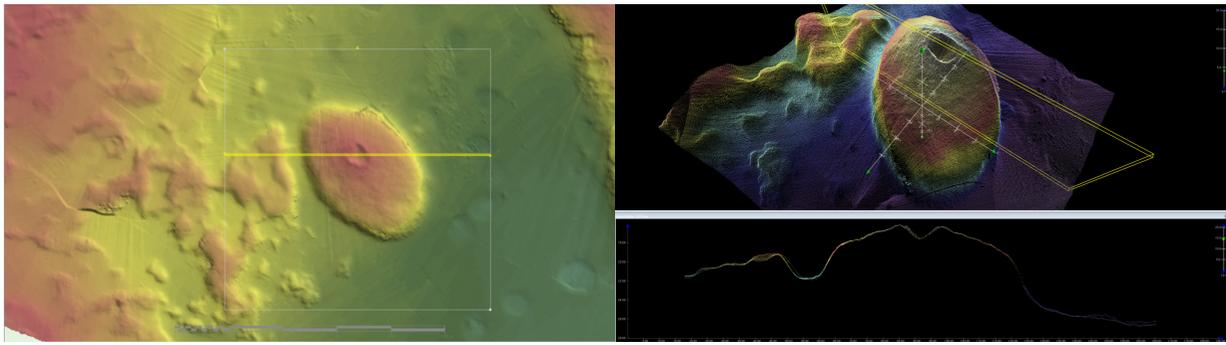


Figura 5. Nótese las bocas o manaderos de lodo encontradas en el sur de la bahía, con numerosas marcas de gas alrededor.

Análisis de los datos del DGPS

La estación geodésica GNSS permanente de operación continua CIOH se instaló en predios del Centro de Investigaciones Oceanográficas

e Hidrográficas en Cartagena a finales del año 2014. El procesamiento diario de los datos de dicha estación ha permitido estimar las respectivas series de tiempo tridimensionales para esta estación.

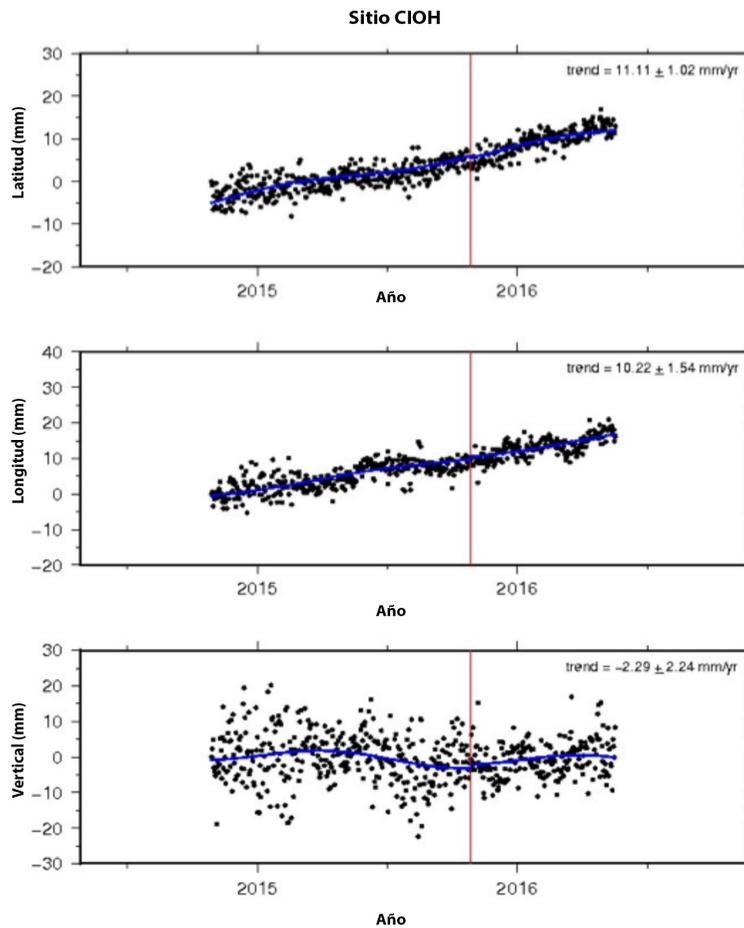


Figura 6. Serie de tiempo en el CIOH con señal estacional.

En el procesamiento que se ha realizado en los datos de casi dos años, se ha tenido en cuenta la señal estacional; la línea de tendencia se ajusta a esta señal, la cual arroja una velocidad anual de 11.11 mm para el norte, 10.22 mm para el este, y un descenso vertical de 2.29 mm por año.

El análisis del movimiento vertical de la corteza realizado con un GPS de alta resolución vertical de la red SONEL colocado cerca del mareógrafo de la isla Manzanillo, muestra que la zona descendió alrededor de 31 mm entre el año 2000 y 2014 (Figura 7) con un descenso neto de 2.2 ± 0.5 mm/año que se convierte en un factor importante.

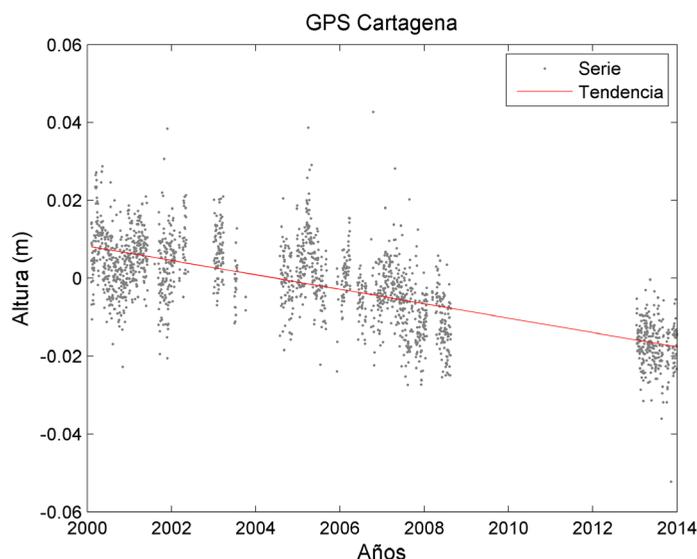


Figura 7. Movimiento vertical del sensor DGPS colocado en el CIOH (Isla Manzanillo). El sensor muestra un descenso de 2.2 ± 0.5 mm/año.

Por otra parte, tomando como referencia la estación permanente GNSS, se realizó la nivelación geodésica entre dicha estación y un punto "testigo" asociado al mareógrafo en el CIOH. Así, estimando si existen algunas diferencias que permitan observar las variaciones en posición vertical del mareógrafo, se empleó nivel laser con mira Invar para gran parte del trayecto, aunque no fue posible ser usada, esta mira en la parte final por el techo donde está el mareógrafo, lugar donde se encuentra el punto de referencia.

Este tramo final se realizó con mira convencional, lo que naturalmente no fue lo más conveniente porque se pierde la precisión de la otra parte del levantamiento. La diferencia que se encontró entre dos observaciones es de orden submilimétrico, lo cual ha permitido estimar que la lectura del mareógrafo no debería

ser objeto de corrección vertical diferente a lo observado en la serie de tiempo.

Finalmente, empleando la técnica de interferometría de radar de apertura sintética, se han encontrado algunos valores interesantes que nos evidencia igualmente una posible subsidencia en Cartagena, pero que debe ser confirmada con más datos. La Figura 11 muestra el resultado del interferograma para el período mayo 2015-marzo 2016, lo cual es un tiempo aún muy corto.

Los datos obtenidos para este período de tiempo han mostrado resultados considerados como fluctuantes con tendencias aparentemente subsidentes en sectores como Membrillal, El Rodeo y Mamonal. Dadas las características del terreno y las condiciones medioambientales y meteorológicas, la idea es correlacionar estos

datos con estudios geológicos, geomorfológicos, geotécnicos y de régimen de lluvias de la región con el fin de establecer preliminarmente su incidencia

en el comportamiento del terreno. Estos valores se deben correlacionar con otras estaciones de GPS, por ejemplo la del campo en el Club Naval.



Figura 8. Interferograma para el período mayo 2015-marzo 2016 en el área de Cartagena, los valores (en milímetros) muestran el descenso del terreno en el año de observación.

Para ambos grupos de datos se considera que es necesario más tiempo de observación. Es importante mirar cómo obviar el problema de la mira, porque la lectura con el nivel láser y la mira invar permite lecturas a escalas de décima de milímetro. Cautela debe tenerse en la asimilación de estos valores para Cartagena, y sus consecuencias deben ser objeto de mayor tiempo de observación y análisis.

DISCUSIÓN

Las emanaciones de lodo y gas son de común ocurrencia en la zona costera del Caribe

NW de Colombia entre el golfo de Urabá y Barranquilla incluyendo zonas continentales y marinas de plataforma continental cercana. En las manifestaciones más evidentes corresponden a los llamados volcanes de lodo que pueden encontrarse localmente alineados siguiendo la tendencia geológica estructural de la región y particularmente, en la región de canal del Dique a Galerazamba, donde se han identificado cerca de 40 estructuras volcánicas de lodo, muchas de las cuales se encuentran en los alrededores de la bahía de Cartagena (Figura 9).

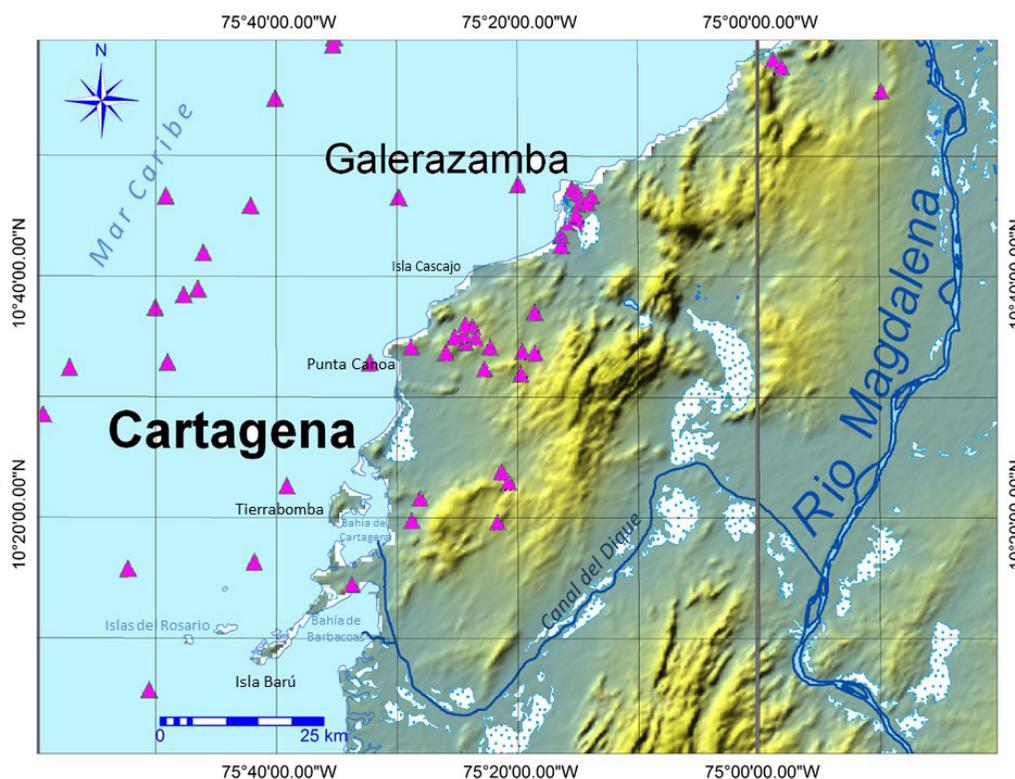


Figura 9. Localización de los volcanes de lodo presentes en la región de Cartagena de Indias. Nótese la concentración en la región de Galerazamba, Punta Canoas y sede Cartagena. Tomada de Carvajal (2017) y Carvajal y Mendivelso, (2017).

Los volcanes de lodo son colinas en forma de domo de diámetros entre 0.6 y 6 km y alturas variables entre 40 y 100 m, cuyo origen se asocia tanto a procesos de deformación vertical del terreno por el empuje de materiales arcillosos y gases confinados en profundidad, como a las periódicas erupciones de lodo, que se acumula y se desplaza lateralmente (Carvajal 2016 y 2017). Estas estructuras geológicas presentan en su parte alta, tanto bocas o manaderos de lodo como ventosas de gas que igualmente se encuentran localmente dispersas en los flancos de las estructuras “volcánicas”. Tienen diferentes formas dependiendo de las características de viscosidad y fluidez de los lodos y pueden tener formas desde cono de diámetros variables entre 1 - 20 m de diámetro y altura de 0.5 - 20 m (Tipos A, B, y C), hasta cráteres de 1 - 50 m de diámetro (Tipo D) o simples huecos o ventosas de pocos centímetros de diámetro (Tipo O), (Carvajal 2016, Carvajal 2017, Carvajal y Mendivelso, 2017).

Este tipo de bocas con las mismas características, también se pueden encontrar aisladas, dispersas o en grupos en zonas continentales y submarinas pero su ocurrencia es menos común. Particularmente, en zonas submarinas se evidencia la presencia de ventosas de gases identificadas en los perfiles como chimeneas (Verette *et al.*, 1992) e igualmente “pockmarks” que son depresiones de varias cm a metros por donde se expelen fluidos y gases a través de un conducto (Kopf, 2002).

En el sur de la bahía de Cartagena se han encontrado un número cercano a las 200 manaderos de lodo y gas y “pockmarks” dispersos, alineados o dispuestos en formas curvas en el fondo plano submarino del lugar, lo cual indica un control estructural en profundidad (Figura 10). Igualmente, es evidente la ocurrencia de bajos arrecifales, localmente colonizados de manglar, cuyas estructuras se consideran han sido favorecidas en su origen por las emanaciones de

lodo y gas como se ha evidenciado en islas como Arenas y bajos arrecifales como Salmedina y el mismo sur de la bahía de Cartagena (Ricaurte

et al., 2004 - Andrade *et al.*, 2017 - Vernet *et al.*, 1990, Vernet *et al.*, 1992, Carvajal 2017).

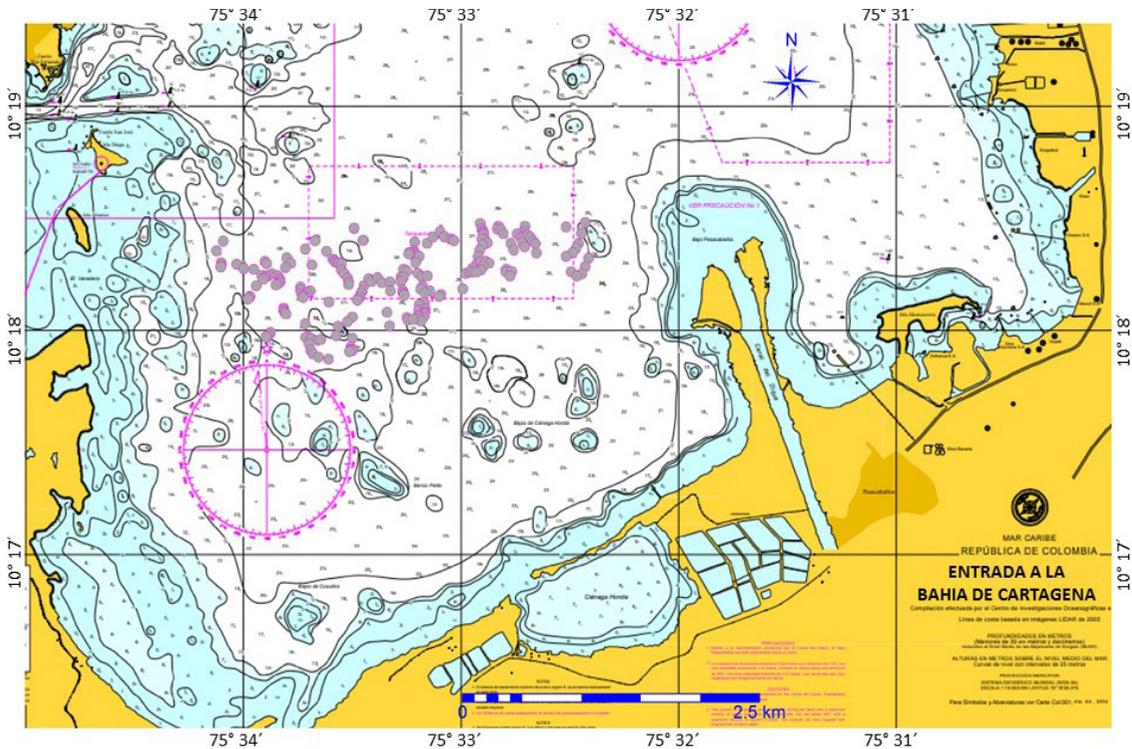


Figura 10. Batimetría de la parte sur de la bahía de Cartagena. Nótese, tanto la distribución de los manaderos de lodo y “pockmarks” (círculos grises) y los bajos arrecifales presentes en el sector, como la ubicación de la desembocadura del canal del Dique por el sector SE (Tomado y modificado de CIOH, 2011).

La bahía de Cartagena es considerada por Gayet y Vernet (1989), como una laguna costera generada por control tectónico y esta condición puede ser asociada con la presencia de una artesa sinclinal de dirección SW - NE que cabecea hacia el SW y se hunde hacia la bahía limitada parcialmente por un fallamiento de la misma dirección de características de rumbo dextrales.

La presencia de manaderos de lodo y “pockmarks” pueden ser considerados preliminarmente como un indicador de actividad neotectónica asociada con este fracturamiento (Figura 11). Igualmente, se relaciona con las evidencias de una estructura diapírica, definida en profundidad con métodos geofísicos en la región de Mamonal por Obando (2010) en Carvajal (2017), lo cual debe ser motivo de investigaciones futuras en la bahía de Cartagena.

La historia y evolución geológica y geomorfológica del caribe NW colombiano ha sido asociada con la interrelación tectónica de las placas Caribe, Nazca y Suramericana a través del tiempo geológico. No obstante lo anterior, con base en las últimas investigaciones adelantadas en la región, el fenómeno del diapirismo de lodo ha tenido y tiene mucha influencia en la conformación y dinámica geomorfológica y litoral entre el golfo de Urabá y Barranquilla, incluyendo tanto zonas continentales como submarinas de plataforma continental cercana (Carvajal 2016 y 2017 - Carvajal y Mendivelso, 2017).

El diapirismo como fenómeno, está asociado con la tectónica argilogenética (tectónica de las arcillas), que es de características muy regionales y se genera, tanto por la variación

lateral en profundidad del espesor de los estratos de constitución arcillosa, como por la mayor densidad de los materiales de la cobertera superior, los cuales determinan una carga diferencial que ocasiona en profundidad un flujo lateral de material arcilloso, y una zona de despegue dúctil desde zonas proximales a las distales. La movilidad del material sobre presurizado en profundidad está determinada

y favorecida por la relación de su porosidad y permeabilidad, espesores, la presencia de gases (tipo metano y CO₂) y lógicamente el efecto convergente oblicuo de las placas de Nazca y Suramérica que aún prevalece acorde con los resultados del monitoreo GPS con propósitos geodinámicos adelantados por el Servicio Geológico Colombiano (Albertz *et al.*, 2010 en Carvajal y Carrillo, 2018 - Mora *et al.*, 2018).

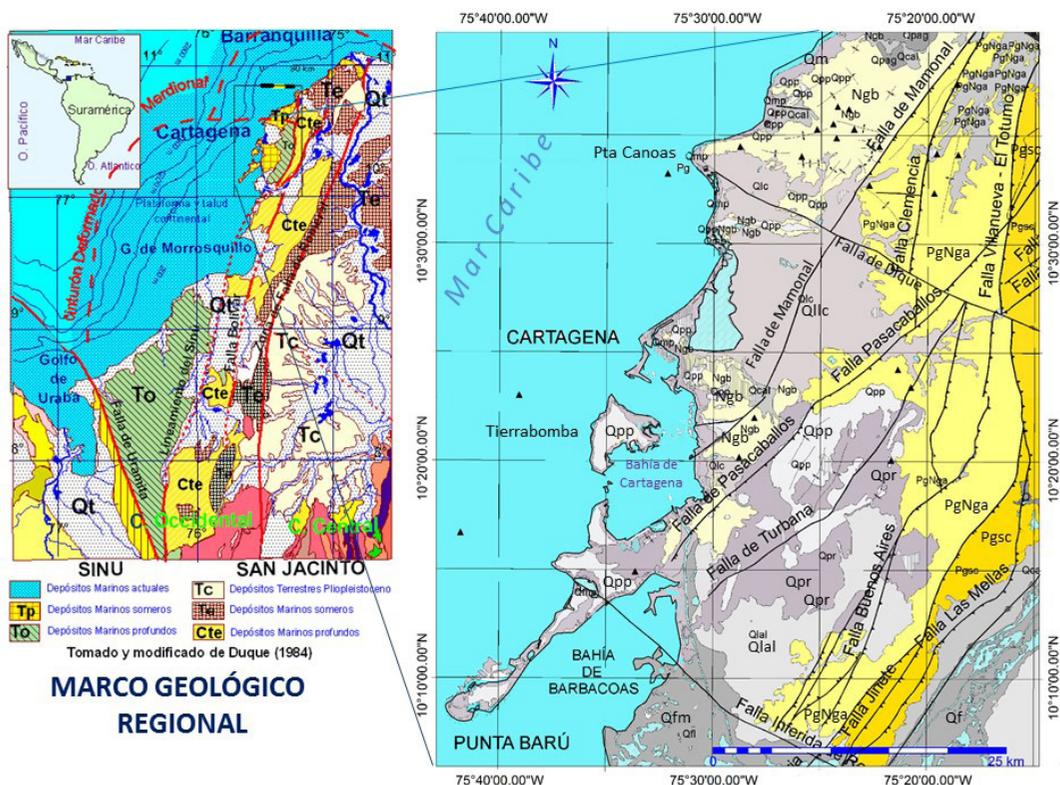


Figura 11. Marco geológico estructural y litológico de los alrededores de la bahía de Cartagena. Nótese el fallamiento y la alineación de las estructuras en dirección SW - NE. Pgsc = F. San Cayetano, PgNga = F. Arjona, Ngb = F. Bayunca, Qpp = F. Popa, Qpr = F. Rotinet, Qfl = Depósitos fluviales, Qmp = D. litorales, Qcal = Depósitos coluvioaluviales, Qlc = D. Costeros, Qlal = Depósitos aluviales subactuales, Qllc = Depósitos marino aluviales subactuales Qfm = Depósitos fluviomarinos deltaicos. Tomado y modificado de Duque (1984), Reyes y Otros (2001), Guzmán y Otros (1998), Reyes y Zapata (1996). Nótese la ubicación de los "volcanes" en triángulos negros.

Esta dinámica tectónica ha permitido a través del tiempo geológico desde el Paleoceno hasta la actualidad, la conformación de dos franjas de rocas plegadas dispuestas en dirección SW - NE, llamadas de oriente a occidente, cinturón plegado de San Jacinto y cinturón plegado del Sinú (Duque 1979 y 1984). En estas franjas rocosas son evidentes los volcanes de lodo, en

particular en el cinturón del Sinú donde son abundantes las manifestaciones de emanación de lodo y gas, tanto en zonas continentales como en zonas submarinas (figuras 8 y 10).

El cinturón del Sinú, donde se encuentra Cartagena, está formado por una serie de pliegues anticlinales angostos de dirección NNE que limitan

artesas sinclinales amplias particularmente en la región de Córdoba - Antioquia; mientras en la región de Galerazamba - Cartagena - canal del Dique, el territorio se caracteriza, por la conformación de sinclinales amplios y curvos, acuñados y limitados por anticlinales estrechos asociados localmente con fracturamiento fallados inversos con componente de rumbo, en cuyos trazos se encuentran los volcanes de lodo (Carvajal, 2017).

La disposición estructural general de estos pliegues en dirección NNE-SSW y NEE - SWW, está interrumpida y afectada localmente por fallas de rumbo sinestrales (desplazamiento horizontal izquierdo) de dirección predominante NWW -SEE, entre las cuales se destacan en Cartagena las fallas, El Dique y Rocha, las cuales definen bloques y la conformación de cuencas de distensión aisladas (Carvajal, 2017; Vernet *et al.*, 1992).

Las rocas que constituyen el cinturón del Sinú en general corresponden a una secuencia de 5000 m aproximadamente de sedimentitas de origen marino profundo (pelagitas hemipelagitas, turbiditas) de edad Mioceno Superior-Plioceno, plegadas y falladas por diapirismo y convergencia de placas. Sobre estas rocas descansan aproximadamente 4000 m de arcillolitas, areniscas y conglomerados de origen marino transicional continental, siendo particularmente notoria la ocurrencia de calizas de origen arrecifal en los altos estructurales generados por la tectónica imperante en la región (Duque, 1979).

Los depósitos cuaternarios presentes en la región son arcillas y arenas y gravas clásticas y bioclásticas de origen marino aluvial y costero. Igualmente, es muy notoria la presencia de bajos y cuerpos arrecifales franjeantes subactuales, localmente colonizados por manglar, lo cual es evidencia de condiciones anteriores propicias para la colonización de los corales en la bahía, que como se indicó previamente es favorecida por la expulsión de fluidos y gases por zonas de debilidad.

Aunque no se conocen hasta el momento las características de los materiales expulsados por las bocas y *pockmarks* evidenciados en este trabajo, se consideran pueden ser muy similares a las encontradas en los materiales expulsados por los volcanes de lodo de los alrededores de Cartagena.

Acorde con Carvajal y Mendivelso (2017), en los volcanes presentes en la región predomina la expulsión de arcillas predominantemente del tipo caolinita e illita, y en los gases predomina el metano con cantidades más bajas de CO₂.

Los materiales expulsados durante las erupciones de los volcanes de lodo tienen incluidos bloques y fragmentos diseminados de rocas (arcillolitas, areniscas y calizas) que son arrastrados desde profundidades aproximadas entre 1 y 4 km. En ese sentido es importante conocer la composición de los materiales asociados con las bocas y *pockmarks* encontradas en el sur de la bahía de Cartagena, porque la actividad diapírica evidenciada puede estar asociada al menos en parte con la progradación de los materiales traídos por el canal del Dique sobre los sedimentos finos de origen marino lagunar costero.

En la región de Cartagena, de más antiguo a reciente afloran rocas de las formaciones Arjona (PgNga), Bayunca (Ngb) y Rotinet (Qpr), y localmente la Popa (Qpp), cubiertas parcialmente por sedimentos actuales y subactuales de origen marino fluvial, eólico y coluvial (Figura 10). La formación Arjona, presente en la parte oriental de Cartagena, se constituyen de una secuencia alternante de arcillolitas arenosas, areniscas feldespáticas y lodolitas de origen turbidítico (Reyes *et al.*, 2001; Guzmán *et al.*, 2004).

Discordantemente o en contacto fallado, sobre las rocas anteriores, con una amplia distribución entre el casco urbano de Cartagena y los límites con Turbaco, se encuentra una secuencia de ambiente marino transicional de lodolitas en capas finas de color gris oscuro, con yeso diseminado y en capas delgadas, con niveles de areniscas grises de grano fino hacia la parte media, dispuestas en capas delgadas interestratificadas con limolitas y lodolitas de color gris a pardo hacia la parte superior, pertenecientes a la formación Bayunca de edad Mioceno Superior (Carvajal, 2017).

Al norte de Cartagena de Indias y al SE de Turbaco se encuentra una secuencia de gravas y arenas de origen fluvial y localmente con influencia deltaica de la formación Rotinet, las cuales fueron acumuladas por el río Magdalena cuando desembocaba por la región de Cartagena. Corresponden a una secuencia inconsolidada de

capas y lentes gruesos de gravas con tamaño variable (1-3 cm) de cuarzo, chert negro, rocas volcánicas, neises y limolitas, con locales intercalaciones de areniscas cuarzosas de grano fino a medio, deleznales (Barrera, 2001; Reyes *et al.*, 2001; Guzmán *et al.*, 2004).

Los altos estructurales, particularmente se encuentran ocupados por rocas de origen arrecifal de la formación La Popa de edad Pleistoceno - Holoceno. Esta formación está conformada de dos conjuntos rocosos constituidos por bancos de areniscas de grano fino conglomeráticas calcáreas y calizas arrecifales (localmente con bioclastos abundantes de coral, algas y moluscos), separados hacia la parte media por una alternancia de capas delgadas de limolitas, arcillolitas grises claras y areniscas de grano fino a muy fino, calcáreas (Guzmán *et al.*, 2004; Carvajal, 2016).

La distribución y disposición estructural de las rocas aflorantes en la región de Cartagena indican levantamientos y hundimiento diferenciales del

orden de varios cm/ año a través del Cuaternario reciente. Tal situación se ha evidenciado recientemente, tanto con el monitoreo de estaciones Gps - GNSS en el sector de la isla e Manzanillo, como el análisis de la evolución geomorfológica en la bahía de Cartagena (Andrade *et al.*, 2017).

La dinámica tectónica argilogenética asociada con diapirismo de lodo, además de las manifestaciones de volcanismo de lodo, se manifiesta con procesos de deformación del terreno. Acorde con Carvajal (2016 y 2017), entre las geoformas morfoestructurales presentes en los alrededores de la bahía de Cartagena, que deben su origen en gran parte a la ocurrencia de esta tectónica, se destacan el semi paleoatolón asociado con el cerro de Albornoz, la plataforma arrecifal de Turbaco - Turbana, el cerro de la Popa y las plataformas de abrasión elevadas y terrazas marinas de 20 y 3 m de altura respectivamente de la isla de Tierrabomba (Figura 12).

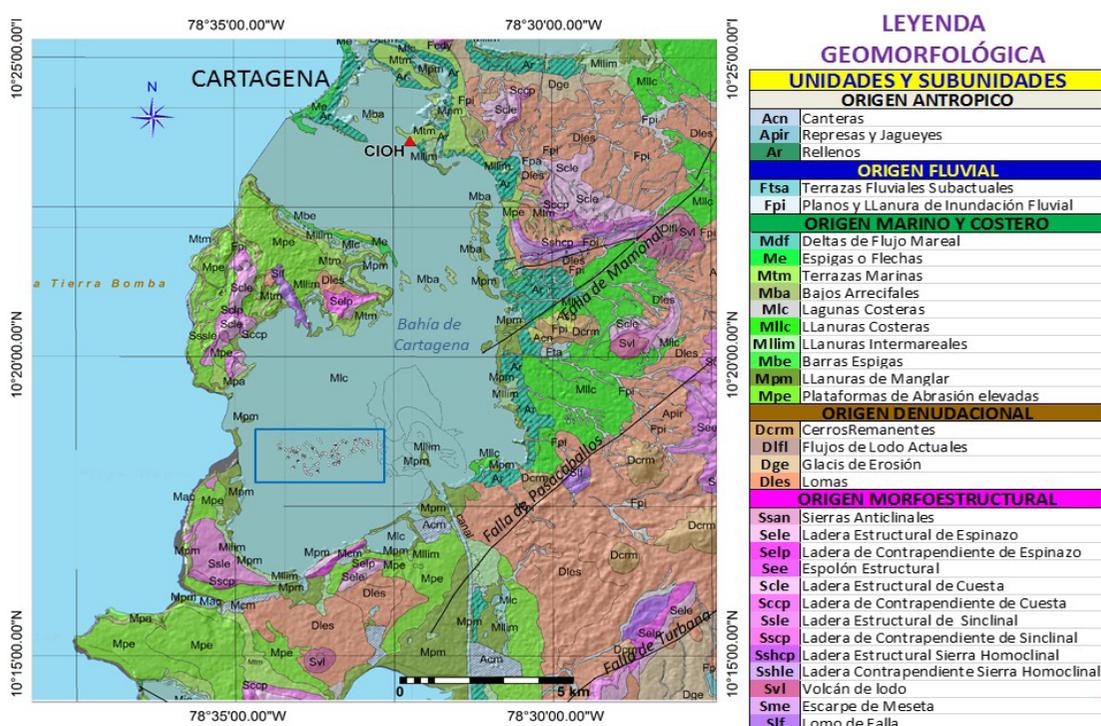


Figura 12. Mapa geomorfológico de los alrededores de la bahía de Cartagena. Nótese el recuadro azul con la ubicación de las manifestaciones submarinas de bocas de lodo y *pockmarks* y la pluma de sedimentos traídos a la bahía a través del canal del Dique. Tomado y modificado de Carvajal (2017) y Andrade *et al.*, (2017).

Las investigaciones hechas por Martínez *et al.*, (2010), con base en análisis y estudios paleontológicos de macrofósiles y microfósiles (Moluscos, ostrácodos, corales y foraminíferos) obtenidos en el nivel bajo de la terraza marina de Tierrabomba determina levantamientos en el sector del orden de 3.11 mm/año. Mientras tanto, los primeros datos obtenidos con GPS – GNSS en la isla de Manzanillo localizada al NE, en el otro lado de la bahía de Cartagena evidencia actualmente descensos del orden de -2.2 mm/año, lo cual se ha confirmado preliminarmente con los primeros resultados obtenidos con interferometría.

Estos resultados confirman la actividad diapírica en la región manifestada con movimientos diferenciales de ascenso y descenso en la región de la bahía de Cartagena. Tal situación se asocia preliminarmente con el basculamientos y hundimiento hacia el NE de la artesa sinclinal limitada por fallas de dirección SW – NE, que conforma el sector sur de la bahía de Cartagena (Figura 11).

El área alrededor de Cartagena se encuentra activa en cuanto a la entrega de gas natural en la zona norte y en las zonas más al sur como también se encuentra documentado en Vernet *et al.*, (2012). La presencia de estas marcas de gas, de diapires y la pérdida de línea de costa en el interior de la bahía respaldada por los datos de DGPS, indicarían que en el sector hay subsidencia.

CONCLUSIONES

En el sur de la bahía (desde el Canal del Dique hasta el Varadero), los datos de la sonda multihaz evidencian manifestaciones de diapirismo de lodo activo en el área, en las formas de:

- Elevaciones muy abruptas en forma de cono que se levantan de un fondo lodoso.
- Presencia de *pockmarks* o depresiones de formas redondas y circulares a manera de cráteres.
- Marcas circulares en estos fondos lodosos que aparecen como consecuencia del escape de fluidos y gas.

La disposición espacial y su conformación local en formas curvas, son indicativas de un control estructural en profundidad de las manifestaciones diapíricas reportadas. Igualmente, es evidente su localización en el flanco occidental de una estructura sinclinal hundida de dirección SW - NE, afectada por fracturamiento fallado asociado con la posible prolongación de la falla de Mamonal hacia el SW.

La presencia abundante de bajos y cuerpos arrecifales, tanto actuales como antiguos en la bahía de Cartagena, se asocian al menos en parte a la presencia de las emanaciones de fluidos y gases que favorecen su crecimiento.

Las mediciones recientes con sistemas de posicionamiento de error submilimétrico y los trabajos de procesamiento de imágenes satelitales (interferometría), preliminarmente muestran cómo el área de Cartagena se encuentra subsidiendo diferencialmente, lo que explica las mayores tendencias de ascenso del nivel relativo del mar en la bahía de Cartagena.

Las medidas actuales indican que la subsidencia en el sector sería de alrededor de 2 mm por año.

RECOMENDACIONES

Es importante en fases posteriores de la investigación, llevar a cabo la caracterización físico química de las materiales emanados por las bocas (lodos y gases) con el fin de definir su procedencia profunda o somera. Igualmente, es fundamental investigar en profundidad toda la bahía de Cartagena con el fin de definir las estructuras geológicas del subsuelo mediante investigación geofísica (sísmica 3D, gravimetría y magnetometría).

Es recomendable establecer una red de monitoreo de estaciones permanentes y de campo bordeando la bahía de Cartagena con el fin de establecer la dinámica de subsidencia y levantamientos locales de la Bahía.

Ante las evidencias obtenidas en este trabajo de materiales sobrepresionados en profundidad, es recomendable evitar cualquier intervención antrópica en la región, con el fin de evitar el

desconfinamiento de estas estructuras y generar movimientos peligrosos de material, al menos mientras se conocen con mayor detalle el origen de las manifestaciones diapíricas.

REFERENCIAS

- Albertz, M., Beaumot C. y Ings S. (2010). Geodynamic Modeling of sedimentation induced overpressure, gravitational spreading, and deformation of passive margin mobile shale basins. In Wood, Ed, Shale Tectonics. AAPG Memoire 93, p 29 - 62.
- Andrade, C.A. (2008). Cambios recientes del nivel del mar en Colombia, en: Deltas de Colombia: morfodinámica y vulnerabilidad ante el Cambio Global, J.D. Restrepo (editor), ISBN 978-958-720-020-1, Fondo Editorial Universidad EAFIT, COLCIENCIAS, pp. 101-121.
- Andrade C.A. y R. Franco, (2016). Sobre la desaparición de isla Abanico y otros terrenos emergidos en el sur de la bahía de Cartagena entre 1735 y 2015, Fundación Terra-Firme, (en impresión), 21pp.
- Andrade, C.A., Thomas, Y.F., Nicolae-Lerma A., Durand P., Anselme, B. (2013). "Coastal flooding hazard related to storm surge events in Cartagena de Indias, Colombia". En: Journal of Coastal Research, volume 29, issue 5, pp. 1126-1136.
- Andrade C.A, Ferrero A, León H, Mora H y Carvajal J.H. (2017). Sobre cambios en la línea de costa entre 1735 y 2011 y la subsidencia de la bahía de Cartagena de Indias, Colombia. Revista Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. Vol 41 (158). 94 - 106. Bogotá.
- Carvajal, J.H. (2016). Mud diapirism in the Central Colombian Caribbean Coastal zone. in Landscapes and Landforms of Colombia. Michel Hermelin (ed.) Springer International Publishing 2016. Chapter 3. p 35 - 53.
- Carvajal, J.H. (2017). Características del volcanismo de lodo del Caribe central colombiano. En volcanismo de lodo del Caribe central colombiano. Colección Publicaciones especiales. Servicio Geológico Colombiano. P 7 - 43. Bogotá.
- Carvajal J.H. (2018). La dinámica del caribe NW colombiano, ¿tectónica de placas o diapirismo?. Documento en preparación. SGC. Bogotá.
- Carvajal J.H y Mendivelso D. (2017). Catálogo de "volcanes de lodo del Caribe central colombiano. En volcanismo de lodo del Caribe central colombiano. Colección Publicaciones especiales. Servicio Geológico Colombiano. P 45 - 85. Bogotá.
- Carvajal J.H. y Carrillo E. (2018). Características de la actividad eruptiva reciente del volcán de lodo San Diego - La Lorenza, Municipio de Canalete - Córdoba. Lineamientos para la evaluación de amenazas y riesgos asociados al volcanismo de lodo. Servicio Geológico Colombiano. Informe de atención de emergencia. 68 p. Bogotá.
- CIOH. (2011). Carta batimétrica 264, escala 1:15.000. Entrada a la bahía de Cartagena. Compilación hecha por CIOH. Dirección General Marítima Dimar. Cartagena.
- _____. (2012). Carta batimétrica 264, escala 1:15.000. Bahía interna de Cartagena. Compilación hecha por CIOH. Dirección General Marítima Dimar. Cartagena.
- Duque H. (1979). Geotectónica y Evolución de la Región Noroccidental Colombiana. Informe 1750. INGEOMINAS. pp 1 - 36. Bogotá.
- _____. (1984). Estilo Estructural, Diapirismo y Episodios de Acrecimiento del Terreno Sinú - San Jacinto en el Noroccidente de Colombia. Boletín geológico. Ingeominas, Vol. 27, No. 2. pp 1-29. Bogotá. Duque, H. y Guzmán, G. 1991. III Simposio de geología regional - Costa Norte. Registro de carreteras. Ingeominas. Inédito - Subdirección Exploración Geológica. 63 p. Bogotá.
- Gayet, J. y Vernet G. (1989). Les lagunes côtières. Bull. Inst Geol. Bassin D'Aquitaine N° 45. Pg 107 - 121. Bordeaux.

- Guzmán, G., Gómez, L. y Serrano, S. (2004). Geología de los Cinturones Sinú – San Jacinto y borde occidental del valle inferior del Magdalena. Un mapa escala 1: 300.000. Ingeominas – Université de Liège. Belgique.
- IPCC. (2013) – International Panel for Climate Change, Informe de evaluación del cambio climático, en: www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/
- Kellogg James y otros (1983). Gravity Anomalies and Tectonic Evolution of Northwestern South America. Memorias 10a. Conferencia Geológica del Caribe. pp. 18-31, Cartagena- Colombia.
- Koft, A. J. (2002). Significance of mud volcanism. *Review of Geophysics* 40 (2), 50p. 1005. Doi : 10, 1029/2000RG000093, 2002.
- Mantilla A. M., Jentzsch G., Kley J. y Pava C. (2009). Configuration of the Caribbean margin: Constraints from 2D seismic reflection data and potential field's interpretation. S. Lallemand and F. Funicielo (eds). *Subduction zones geodynamics*. P. 247 – 271. Springer – Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Martínez I., Y. Yokoyama, A. Gómez, A. Delgado, H. Matsuzaki y E. Rendon , 2010. Late Holocene marine terraces of the Cartagena Region, southern caribbean: The product of neotectonism or a former high stand in sea level?. *Journal of South American Earth Science* 29. p. 214 – 224. Elsevier.
- Mora-Páez, Hé., Kellogg, J.N., Freymueller, J.T., Mencin, D., Fernandes, R.M.S., Diederix, H., LaFemina, P., Cardona-Piedrahita, L., Lizarazo, S., Peláez-Gaviria, Juan.-Ramó., Díaz-Mila, F., Bohórquez-Orozco, O., Giraldo-Londoño, L. y Corchuelo-Cuervo, Y., (2018) Crustal deformation in the northern Andes – A new GPS velocity field, *Journal of South American Earth Sciences*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.11.002>.
- Nicolae, A., Y.F. Thomas, P. Durand, R.R. Torres y C.A. Andrade. (2008). Variabilidad del nivel del mar desde 1950 hasta el 2000 y riesgos asociados a episodios de mar de leva en las penínsulas de Bocagrande y Castillogrande, Cartagena de Indias, Colombia, *Boletín Científico CIOH* No.26, 71-84.
- Reyes, G. (2000). Marco geológico regional del Caribe colombiano. Informe preliminar. Ingeominas, 28p. Santa fe de Bogotá.
- Reyes, G., y Barboza, G. (1996). Memorias geológicas de las plancha 29 y 30. Informe borrador inédito. Santafé de Bogotá.
- Reyes, G. y Clavijo, J. (1996). Geología estructural de los cinturones de San Jacinto y Sinú norte. VII Congreso Colombiano de Geología. Ingeominas Santa fe de Bogotá.
- Reyes, G. y Zapata, G. (1996). Geología de la plancha 24, Sabanalarga. Ingeominas, Informe interno. Bucaramanga.
- Reyes, G., Guzmán, G., Barboza, G. y Zapata, G. (1999). Geología de las Planchas 23, Cartagena y 29-30, Arjona. Informe técnico Ingeominas:1-96. Bogotá D. C.
- Torres, R. y Tsimplis, M. (2013). Sea-level trends and interannual variability in the Caribbean Sea, *Journal of Geophysical Research, Oceans*, Vol. 118, 2934-2947, 2013.
- Torres, R., Gómez, J. y Afanador F. (2006). Variación del nivel medio del mar en el Caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH* (24): 64-72.
- Vernette, G., Correa, I.D. y Bernal, G. (2012). Introducción a los cambios del nivel del mar y sus consecuencias sobre la zona costera, Universidad Nacional de Colombia, ISBN: 978-958-761-402-2, 171pp.
- Vernette G. (1989). Examples of Diapiric Control on Shelf Topography and the Sedimentary Patterns on de Colombian Caribbean Continental Shelf. *Journal of South American Earth Science*. Vol. 2 No. 4 pp. 391-400.
- Vernette, G. (1985). La Plate-forme continentale caraïbe de Colombie. Importance du diapirisme argileux sur la morphologie et la sédimentation. Tesis de Estado, Universidad de Bordeaux, 153pp.

Vernette, G., Gayet, J., Bobier, C., Briceño, L. Mauffret, A. y Molina, A. (1990). El frente de Deformación Sur-Caribe en la Región de Cartagena, Posición y Relación con la Plataforma. Memorias del VII Seminario Nacional de las Ciencias y Tecnologías del Mar. pp. 155-209.

Vernette, G., Mauffret, A., Bobier, C., Briceño, L., Gayet, J. (1992). Mud diapirism, fan sedimentation and trike slip faulting Caribbean Colombian. Margin, tectonophysics. 202 (1992), pp 335-349. Elsevier Science publisher, B.v Amsterdam.

Walker, M.; Johnsen, S.; Rasmussen, S. O.; Popp, T.; Steffensen, J.-P.; Gibbard, P.; Hoek, W.; Lowe, J.; Andrews, J.; Björck, S.; Cwynar, L. C.; Hughen, K.; Kershaw, P.; Kromer, B.; Litt, T.; Lowe, D. J.; Nakagawa, T.; Newnham, R. y Schwander, J. (2009). «Formal definition and dating of the GSSP (Global Stratotype Section and Point) for the base of the Holocene using the Greenland NGRIP ice core, and selected auxiliary records». Journal of Quaternary Science, 24: 3–17.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó con base en la información suministrada por el Servicio Hidrográfico Nacional del Centro de Investigaciones Oceanográficas CIOH, para la toma y procesamiento de los datos del ecosonda multihaz. Se agradece a los profesionales del Sistema GeoRed que permiten publicar lo que es parte de su trabajo institucional. Los autores le expresan un especial agradecimiento al Dr. Georges Vernet por sus valiosos aportes y crítica al presente manuscrito.