

Paleogeografía del canal y delta del Dique, Colombia

Germán Vargas Cuervo * 

Resumen

En la corta historia geológica y geomorfológica de la llanura de inundación, canal y delta del Dique, localizada en la costa Caribe colombiana, se han presentado, en los últimos 500 años, notables cambios por procesos naturales y antrópicos que han modificado la geometría del canal y la morfología del delta, que han repercutido notablemente en la alta sedimentación de las bahías de Barbacoas y de Cartagena en el mar Caribe colombiano, pasando de una bahía a un delta, lo que ha causado problemas ambientales. En este artículo se presenta una reconstrucción de la paleogeografía y sedimentología del canal y delta del Dique a partir de elementos químicos que evidencian la presencia del mar en la zona continental. Se utilizaron métodos de análisis de documentos, mapas históricos, procesamiento e interpretación digital de imágenes de satélite, exploraciones directas del subsuelo, levantamientos geológicos y geomorfológicos detallados de campo, muestreo y análisis geoquímicos de sedimentos y rocas por métodos de fluorescencia de rayos X.

Palabras clave: canal del Dique, Colombia, delta del canal del Dique, geología, geoquímica, paleogeografía, sensores remotos.

Ideas destacadas: artículo de investigación sobre paleogeografía y sedimentología del canal y delta del Dique a partir de elementos químicos que evidencian la presencia del mar en la zona continental.



RECIBIDO: 30 DE SEPTIEMBRE DE 2019. | EVALUADO: 5 DE MARZO DE 2020. | ACEPTADO: 21 DE SEPTIEMBRE DE 2020.

COMO CITAR ESTE ARTÍCULO

Vargas Cuervo, Germán. 2021. "Paleogeografía del canal y delta del Dique, Colombia." *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 30(1): 239-256. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v30n1.82585>.

* Universidad Nacional de Colombia. Bogotá – Colombia. ✉ gvargasc@unal.edu.co – ORCID: 0000-0003-2489-3993
✉ Correspondencia: Germán Vargas Cuervo, Calle 148#7h-10 Bogotá, Colombia.

Paleogeography of Canal and Delta of Dique, Colombia

Abstract

The delta of Dique, flood plain and channel, located in the Colombian Caribbean coast displays natural and anthropic changes in its geologic and geomorphologic history during the last 500 years. The changes are evident in the channel geometry, the delta morphology, the high sedimentation in the Barbaças and Cartagena bay that configured a delta in a previous bay, causing environmental problems. In this article, we present a paleogeographical and sedimentological reconstruction of the Dique's channel and delta, using elemental chemistry that demonstrate the previous presence of sea water in the continental zone. Conclusions are additionally supported by other methodologies such as historic documents and maps, consultation, processing and interpretation of satellite images, the exploration of the subsoil, a detailed geologic and geomorphic survey, sediment and rock sampling, and elemental chemical composition measured by a portable XRF equipment.

Keywords: channel of Dique, Colombia, delta of Dique's channel, geology, geochemistry, paleogeography, remote sensing.

Highlights: research article on paleogeography and sedimentology of the Dique channel and delta based on chemical elements that show the presence of the sea in the continental zone.

Paleogeografia do canal e delta do Dique, Colômbia

Resumo

Na história geológica e geomorfológica da planície de inundação, canal e delta do Dique, localizada na costa do Caribe colombiano, houve mudanças significativas nos últimos 500 anos devido a processos naturais e antrópicos que modificam a geometria do canal e a morfologia do delta, mudanças que tiveram um efeito significativo na alta sedimentação das baías de Barbaças e Cartagena no mar do Caribe colombiano, passando de uma baía para um delta, com notáveis problemas ambientais. Os resultados dessas investigações permitiram a reconstrução da paleogeografia e sedimentologia do canal e delta do dique com indicadores de elementos químicos que indicavam a presença do mar na zona continental. Foram utilizados métodos de análise de documentos e mapas históricos, processamento digital e interpretação de imagens de satélite, exploração direta do subsolo, levantamentos geológicos e geomorfológicos detalhados do campo, amostragem e análise geoquímica de sedimentos e rochas pelos métodos de fluorescência de raios-x.

Palavras-chave: canal do Dique, Colômbia, delta do canal do Dique, geologia, geoquímica, paleogeografia, sensores remotos.

Ideias em destaque: artigo de investigação sobre paleogeografia e sedimentologia do canal e delta do Dique a partir de elementos químicos que evidenciam a presença do mar na zona continental.

Introducción

Sobre la historia geográfica del sistema del canal del Dique, son varios los estudios realizados principalmente con enfoques ambientales. Entre ellos se destacan los de Alvarado (2001), Vargas (2001; 2014) y Mogollón (2013). Este último, en su libro *El canal del Dique, historia de un desastre ambiental* (Mogollón 2013), presenta un resumen cronológico de las seis obras de rectificación que ha tenido el canal del Dique en los periodos 1844-1850, 1891-1894, 1923-1930, 1934, 1951-1952 y 1981-1984. Asimismo, el autor analiza los impactos ambientales del canal Calamar–Mamonal, las interesantes historias de la región de Barbacoas antes de las grandes obras del canal del siglo XX, los primeros proyectos de esclusas, los primeros vapores y los efectos ambientales.

Alvarado (2001) presenta los resultados de los estudios de la primera etapa del plan de restauración ambiental del canal del Dique, que incluyen análisis de usos del suelo —principalmente del agua—, arqueología, historia, social, marco jurídico y socioeconómico, hidráulica fluvial, balance hídrico, suelos y geotecnia, modelos matemáticos, aspectos bióticos, diagnóstico ambiental de alternativas, entre otros.

Vargas (2001), en el marco de la primera fase del plan de restauración ambiental realizado con la Universidad del Norte, realiza un estudio geológico y geomorfológico y de la cuenca del canal del Dique, un análisis morfodinámico detallado de la llanura de inundación y delta del canal y una zonificación de la susceptibilidad a las inundaciones. Vargas (2014), en el marco del proyecto Restauración del Sistema del canal del Dique, del Consorcio Dique, actualiza los estudios geológicos, geomorfológicos y morfodinámicos del 2001, y realiza un análisis de la sedimentación asociada al sistema mediante técnicas de sensores remotos y trabajo de campo.

En la literatura científica, estudios paleogeográficos con diferentes enfoques hacen referencia a los trabajos de Gottfried et ál. (2009), que analizan la distribución de los peces pulmonares *Ceratodontid* en Gondwanana durante el Mesozoico, en el Norte y el Oeste de África, por medio de técnicas de palaeodiversidad y paleogeografía. Pierik, Cohena y Stouthamer (2016), utilizando técnicas de SIG y *scripts*, elaboran automáticamente mapas paleogeográficos para cualquier momento elegido, combinando la información anterior de mapeo. Rofes et ál. (2016) presentan un análisis morfométrico y morfológico que permitió la asignación de registros de la sima del Elefante, distinguiéndolos de las otras especies del Pleistoceno.

Manassero (2016) presenta un análisis sedimentológico detallado de la Formación Angostura (Cretácico Superior), en las áreas de Comallo Jacobacci Gastrón del sector occidental del Macizo Patagónico Norte.

Otros estudios paleogeográficos de sistemas fluviales y deltaicos investigativos relacionan los trabajos de Quintanar et ál. (2013), Pierik, Cohena y Stouthamer (2016), Yangyang et ál. (2018), Massuanganhe et ál. (2018), Pleuger et ál. (2019) y Gough, Hall y BouDagher-Fadel (2020).

Gough, Hall y BouDagher-Fadel (2020) presentan una reconstrucción paleogeográfica de la cuenca central en Myanmar, en la cual, por análisis de *facies* sedimentarias, sugieren que los sistemas fluviales que fluyen hacia el Sur obtuvieron sedimentos de la margen Norte de la cuenca, pero también hubo algunos canales que se unían al canal principal desde la margen occidental de la cuenca y en menor número desde el Noreste.

Pleuger et ál. (2019) presentan una reconstrucción de paleoambientes y paleogeografía del delta de Medjerda desde mediados del Holoceno, en la que destacan un episodio de inundaciones de alta intensidad alrededor del siglo IV d. de C., consistente con episodios de aumento en las tasas de sedimentación registradas en la cuenca al final del periodo romano.

Bhattacharya et ál. (2018) presentan una reevaluación paleogeográfica del delta de Ferron notom, delta dominado por ríos e influenciado por olas, en el sur central de Utah. Este estudio muestra que es crítico integrar análisis detallados de arquitectura de *facies*, para reconstruir paleogeografías a escalas adecuadas, e hipotetiza que los deltas dominados por bifurcación estable deberían ser más comunes que los deltas dominados por avulsión en un sistema delta de base baja.

Massuanganhe et ál. (2018) presentan una paleogeografía y dinámica del humedal deltaico del río Save, Mozambique, integrando datos sedimentológicos con análisis de microfósiles silíceos, combinados con datación por radiocarbono AMS y OSL. El estudio determina que desde hace aproximadamente 1.300 años (OSL), la sedimentación aluvial impactó el ecosistema de manglar y la retirada de los humedales del manglar coincidió con un descenso del nivel del mar.

Pierik, Cohena y Stouthamer (2016), presentan un nuevo enfoque SIG para la reconstrucción y el mapeo dinámico de la paleogeografía de la planicie costera del holoceno de los países bajos. El SIG almacena elementos arquitectónicos redigitizados (barreras de playa, canales de mareas, pisos intermareales, pisos supratidales y

costeros, turba de agua dulce) de mapeos anteriores en capas de mapa separadas.

Por último, Quintanar et ál. (2013) realizan un análisis de *facies* de la llanura de Tineh, Egipto, para determinar los restos del río extinto denominado Pelusiac, a partir de técnicas de sensores remotos. El presente trabajo representa un modelo integrado para la reconstrucción paleogeográfica de ambientes fluviales y deltaicos, con la utilización de diferentes métodos cartográficos, geológicos, geoquímicos y geomorfológicos.

Localización geográfica

El canal del Dique se presenta en la parte norte de Colombia, en la región Caribe. Este canal comunica el río Magdalena en cercanías de la población de Calamar, con el Mar Caribe en inmediaciones de la ciudad de Cartagena de Indias. Fisiográficamente está limitado al Este por el río Magdalena, al Oeste por el Mar Caribe en las bahías de Barbacoas y Cartagena, al Sureste por la cadena montañosa de la Serranía de San Jacinto y al Noroeste y Suroeste por la Serranía del Sinú. En la llanura de inundación del sistema del canal del Dique se pueden diferenciar tres sectores característicos: sector alto, con 594 km²; sector medio, con 360 km²; y el delta, con 319 km², para un total de 1.274 km² (Figura 1).

Materiales y métodos

Para el desarrollo de este estudio paleogeográfico, se consultaron y analizaron los registros de la cartografía histórica entre 1811 y 1953, existentes en el Archivo Nacional de Colombia y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), así como documentos que relacionan la historia de la navegación del río Magdalena y el canal del Dique. Se integraron técnicas de procesamiento digital de sensores remotos multitemporales entre 1973 y 2016, tipo Landsat (16 escenas), Rapideye (19 subescenas), ortofofos (2.583) digitales Lidar y un modelo digital de terreno Lidar, con resolución de 1 m/píxel.

Se realizaron levantamientos geológicos y geomorfológicos detallados, con la ejecución de 14 perforaciones del subsuelo, con recobro de núcleos con una profundidad media de 50 metros cada una, sobre las que se realizaron diferentes secciones litoestratigráficas. Muestras de núcleos de perforación fueron sometidas a análisis geoquímico de fluorescencia de rayos X, por tecnología portátil (DELTA-RX). Estos análisis se orientaron principalmente hacia la correlación geoquímica de elementos principales

y traza con sus ambientes de formación (fluviales, lacustres y marinos costeros). Esto se evidencia en la Figura 2.

Resultados

El análisis paleogeográfico del delta y canal del Dique se evalúa desde tres temáticas principales: (1) análisis histórico con documentos y cartografía, (2) reconstrucción de cauces con imágenes de satélite, y (3) indicadores geológicos y geoquímicos.

Historia

La historia reciente del canal del Dique data de 1650, cuando el gobernador de Cartagena, don Pedro Zapata, rompió el dique aluvial que separaba un complejo de ciénagas del río Magdalena, en cercanías de la población de Barranca, hoy Barrancanueva. Con esto se daba comunicación a la ciénaga salobre de Matuna, hoy en día desaparecida por la formación del delta del canal del Dique. De esta apertura o rotura del dique derivó su nombre del canal del Dique.

Eduardo Lemaitre en su libro *Historia del canal del Dique* (citado por Alvarado, 2001) indica:

desde esta ciénaga se abrieron dos mil cien varas de terreno en ancho de otras varas, y en cuatro y tres varas de fondo, siendo la más difícil de esta obra el hacer estacadas, abril canales, arrancando de debajo del agua raíces de mangles y gran maleza para dar Canal y cómoda disposición a esta navegación, y todo se ha ejecutado en seis meses de tiempo [...]

Para comunicar el canal con la Bahía de Barbacoas en el mar Caribe.

[...] se abrieron tres mil varas de terreno en fondo y casi ocho en lo que más y en cuatro en lo que menos; en once varas de ancho en casi cinco leguas de montaña espesa de arboleda para que quedara navegable en todo el tiempo del año, no solo para vaxeles de menor parte, sino para los de mayor [...].

El 20 de agosto de 1650 se dio la comunicación del río Magdalena con el mar Caribe a través del canal del Dique, en la cual el gobernador de Tenerife expresó, según Lemaitre (citado por Alvarado, 2001).

Como hoy día de la fecha, entre cuatro y cinco de la tarde al parecer, según el sol, vide que la gente trabajaba en el dique y río nuevo por orden de su señoría el Maesse de Campo D. Pedro Zapata rompieron la tierra que estaba en la boca del dicho dique y sobre la orilla del dicho río grande

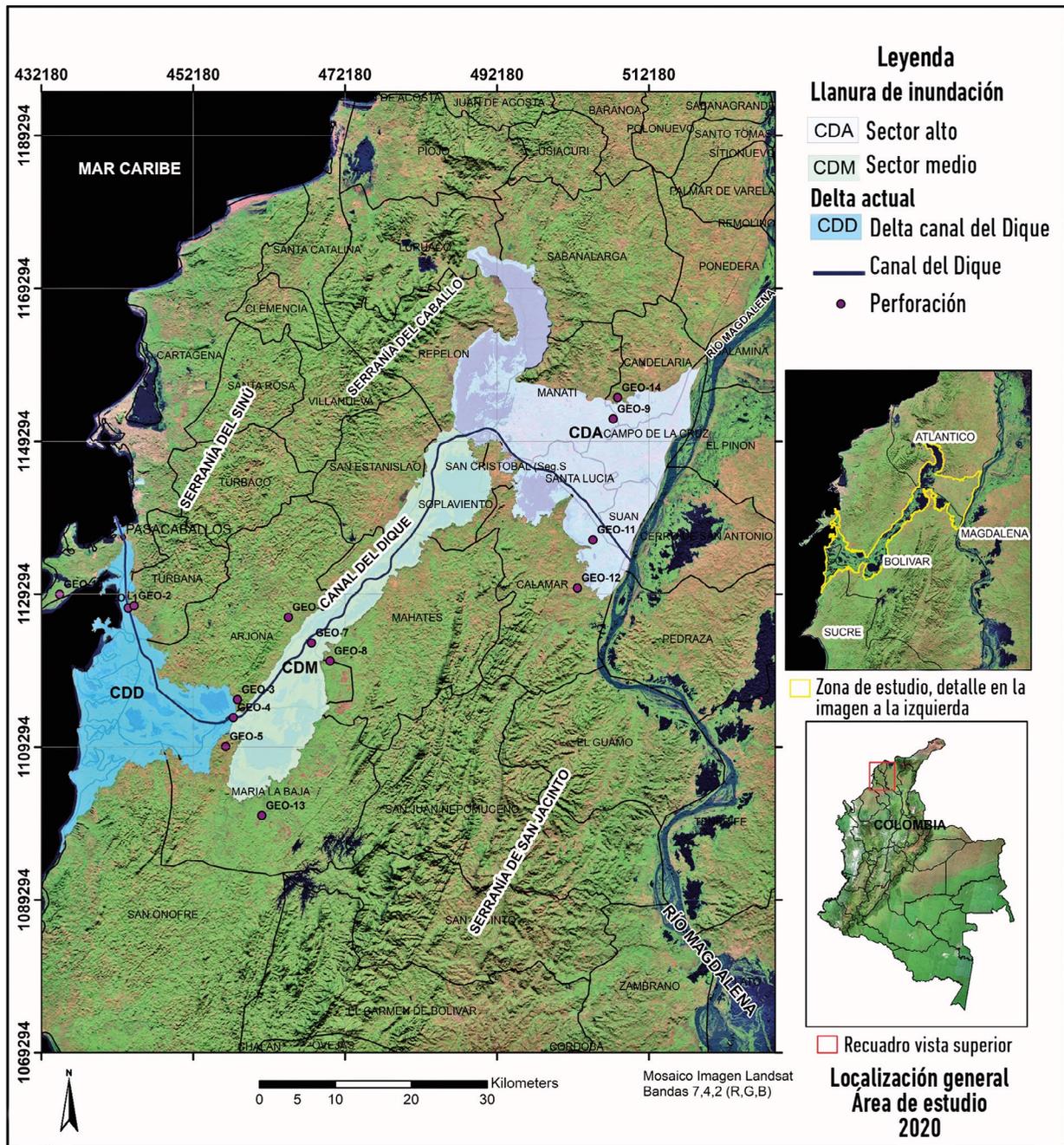


Figura 1. Localización geográfica del canal del Dique, 2020. Fuente: Imágenes Landsat, con procesamiento digital propio.

de la Magdalena, y habiéndolo hecho entró gran golpe de agua y corrió con gran violencia por el dicho río nuevo avaxo, según su corriente, y al parecer muy navegable por tener la voca sobre la tierra ocho palmos de agua que con mucha brevedad después de su rompimiento quedó en esta forma aunque al parecer el dicho río de la Magdalena está hoy muy bajo y sin ninguna corriente [...].

Sobre la conexión del canal del Dique del río Magdalena con la bahía de Cartagena, (Alvarado 2001), el autor cita que la apertura final del canal con el mar Caribe no se dio sino hasta 1934 por el dragado ejecutado por la firma Frederick Snare Co., la cual realizó el corte de Paricuica para conectar la ciénaga de Matunilla con el caño del Estero.

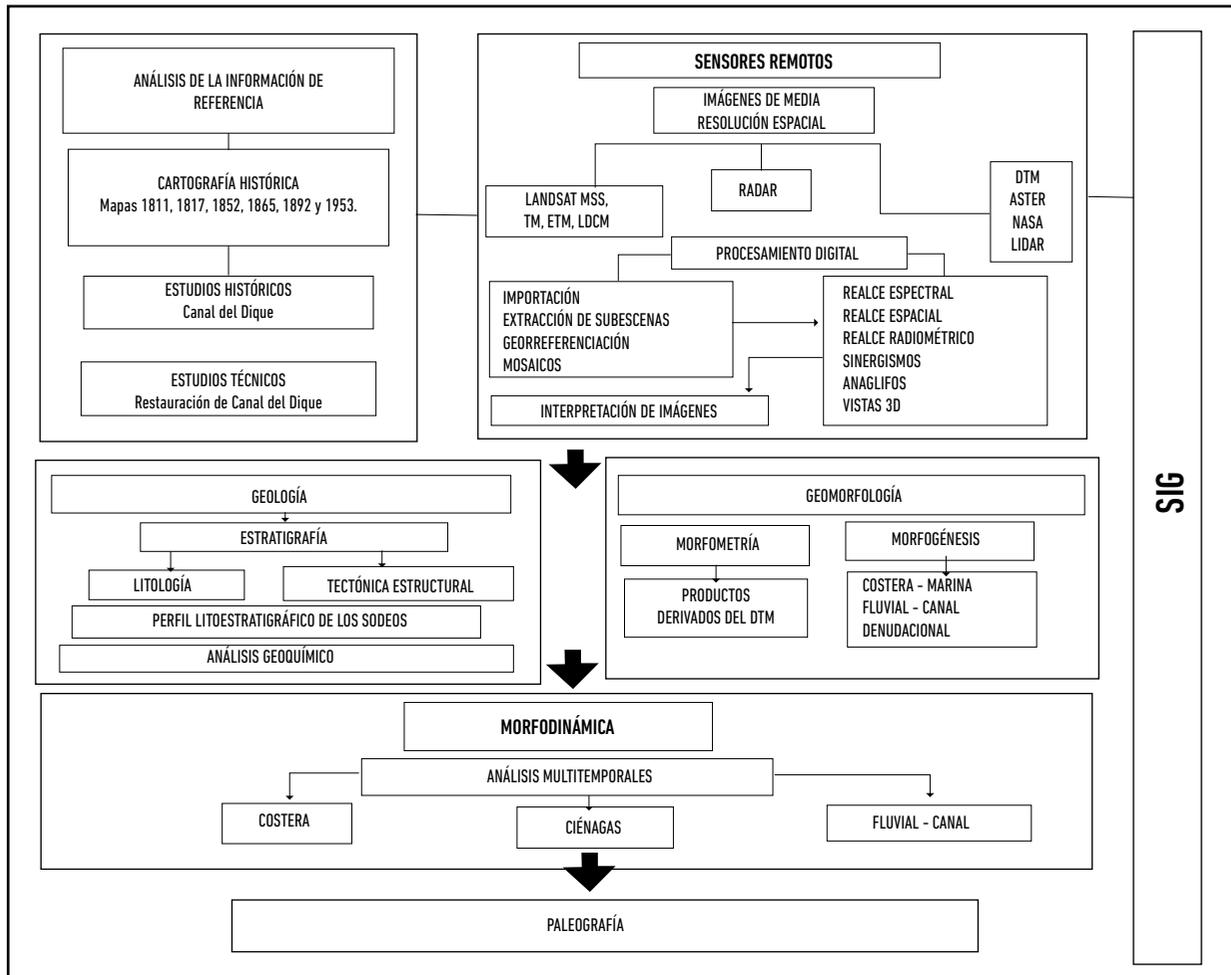


Figura 2. Marco Metodológico general.

La cartografía histórica del canal y delta del Dique registra información del sabio Caldas, quien fue ingeniero, astrónomo y geógrafo naturalista. Caldas dejó varios dibujos y mapas entre 1768 y 1816, compilados en varios atlas históricos, particularmente en el *Atlas de Mapas antiguos de Colombia, siglos XVI a XIX* (cuarta edición) de Eduardo Acebedo Latorre, (1997). Para el estudio se compilaron y procesaron digitalmente mapas históricos de los años: 1811, 1817, 1852, 1864 y 1892. La cartografía más reciente del canal y delta se registra las planchas n.º 23, 24, 30, 31, 36 y 37, escala 1:100.000, del IGAC de los años 1953 y 2001 (Figura 3).

De esta cartografía se pueden establecer varios aspectos sobre la evolución del canal y del delta del Dique. En 1811, se registra un pequeño atolón en la hoy península de Barbacoas, en la zona costera de la bahía del Dique, y la formación de un atolón con cuatro islotes. El canal del

Dique muestra dos sitios de inicio con el río Magdalena, uno al sur, en inmediaciones de la población de Barranca, y el otro al norte.

En la secuencia cartográfica desde 1811 a 1953, se evidencia la sedimentación de la bahía (Matuna, hoy Barbacoas), con la que se forma el delta del canal del Dique, mediante la densificación de islas marinas. El cierre de la bahía es el resultado de la formación de un atolón en su parte marina (Boca de Matuna).

El canal del Dique originalmente partía del río Magdalena en el sector conocido como Barranca Nueva, un afluente menor del Magdalena que se originaba al norte de Calamar en cercanías de Campo de la Cruz, llamado "Cenio Janaguare". Entre 1817 y 1852 el canal del Dique se observa menos sinuoso, con un aparente suavizado de meandros, y en 1965 aparece el lineamiento del canal del Dique en el sector de Calamar.

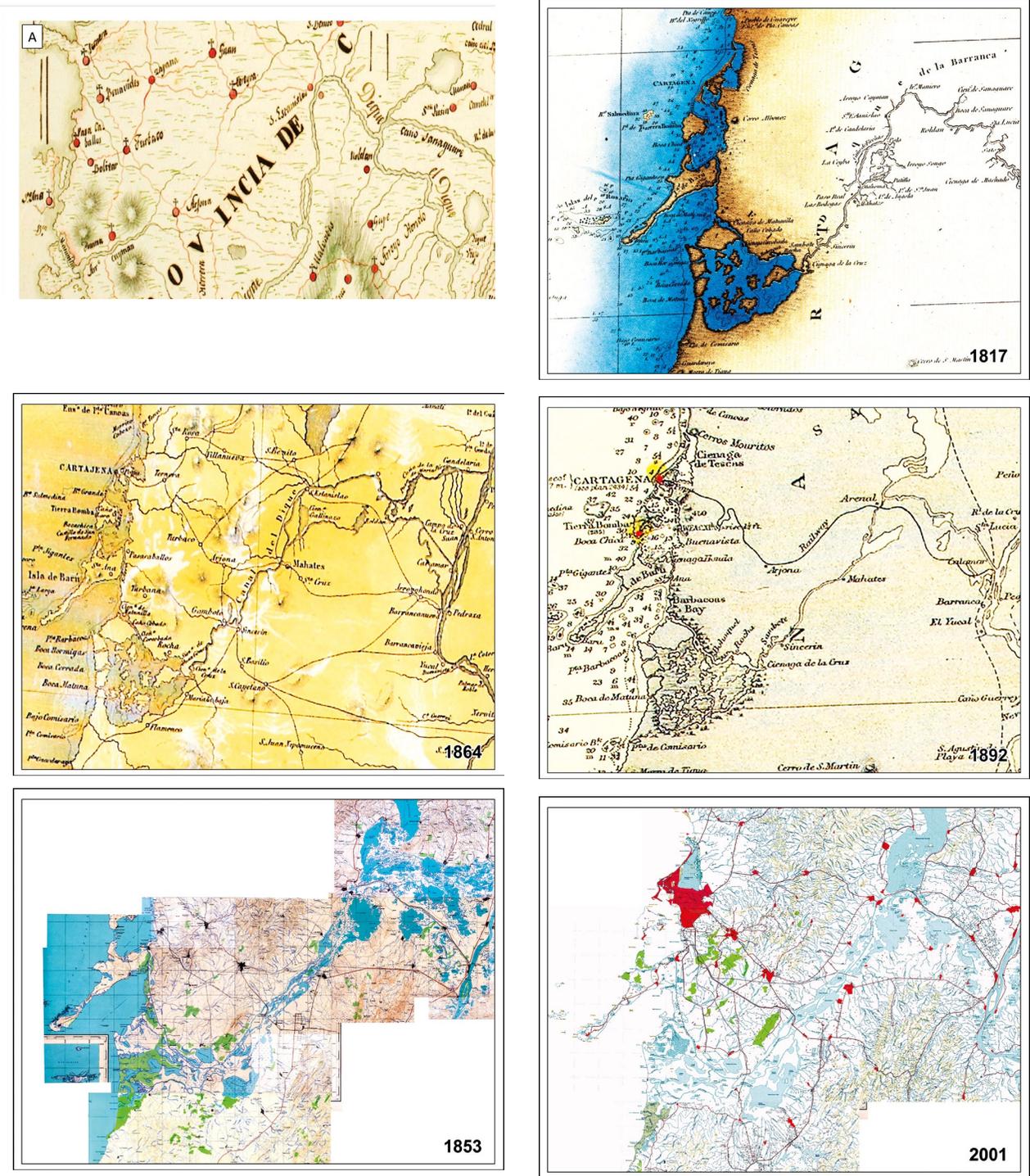


Figura 3. Cartografía histórica que muestra la evolución del canal y delta del Dique. Fuente: AGN (1864; 1892), IGAC (1953; 2001) y Acebedo Latorre (1997). Nota: a) extracto del Mapa de Caldas de 1811 (Lamina XLII) (Acebedo Latorre 1997); b) mapa de Caldas de 1817, cuarta hoja, Provincia de Cartagena (Acebedo Latorre 1997); c) carta geográfica del estado de Bolívar (Mapoteca n.º 6, ref. 11; Cape de la Vela to Chagres (AGN 1892); d) extracto tomado del AGN, sección Mapas y Planos Mapoteca n.º 4, referencia n.º 727 (AGN 1864); e) mosaico de planchas 23, 24, 30, 31, 36 y 37, escala 1:100.000 (IGAC 1953); f) mosaico de planchas 23, 24, 30, 31, 36 y 37, escala 1:100.000, (IGAC 2001).

Rectificaciones antrópicas del canal

El canal del Dique se vio afectado por rectificaciones del cauce que redujeron su longitud y sinuosidad para hacerlo más rectilíneo y mejorar su navegabilidad. Las cinco rectificaciones importantes que ha tenido en su historia son: 1944-1948, por G. M. Totten; 1923-1930, por la Foundation Co.; 1934, por la Frederick Snare Co.; 1951-1952, por la Standard Dredging; y 1981-1984, por la Layne Dredging y Sanz & Cobe (Mogollón 2013). Algunas de estas rectificaciones se evidencian en las imágenes de satélite y fotografías lidar de alta resolución (Figura 4).

Análisis geológico y geomorfológico

El sistema del canal del Dique se compone de cuatro zonas geomorfológicas: (1) zona de influencia de la cuenca hidrográfica, (2) zona inundable alta y media, (3) sector del río Magdalena en la zona de influencia del canal del Dique y (4) la zona marino-costera del mar Caribe que forma el delta.

En la cuenca hidrográfica del canal del Dique afloran rocas sedimentarias del Terciario (Paleoceno–Eoceno) de origen marino, continental, fluvial y lacustre, asociadas a los cinturones o terrenos San Jacinto y Sinú. Litológicamente se componen de areniscas cuarzosas y calcáreas, limolitas y arcillolitas, niveles de chert y conglomerados. Los depósitos cuaternarios inconsolidados son principalmente de tipo coluvial y aluvial. Los primeros se localizan en la base de las laderas y los aluviales en los lechos de pequeños cursos de agua que descienden desde las serranías.

La llanura de inundación del sistema del canal del Dique presenta una superficie total de 1.274 km², la cual se divide en tres sectores: alto, medio y delta, con características morfológicas, hidrológicas y geológicas diferentes.

La llanura de inundación del canal del Dique, en su parte alta, es amplia al Este y se estrecha al Oeste. Limita al Este con el valle del río Magdalena y finaliza al Oeste en inmediaciones de la represa del Guajaro. Cubre una superficie aproximada de 594 km². Se caracteriza por formar un complejo de ciénagas aún existentes en su margen izquierda, y planicies de ciénagas desecadas en su margen derecha. En esta zona se presentan huellas de canales antiguos asociados al canal del Dique o conectores con ciénagas. Su paisaje varía notablemente en épocas secas y de inundaciones. Las principales ciénagas de esta zona corresponden al embalse del Guajaro y la ciénaga del Jobo, ambas son de aguas dulces. Por la alta influencia del río Magdalena en esta zona, los materiales son predominantemente arenosos y limosos. La llanura

de inundación del canal del Dique en su parte media se localiza entre la represa del Guajaro al Este hasta el sector de Rocha al Suroeste, cubre una superficie total de 360 km². Presenta una forma estrecha y tabular con un ancho variable entre 3 y 8 km, y forma una especie de bolsón en la zona de María La Baja. Las Ciénagas en este corredor estrecho se tornan ligeramente alargadas, son de menor dimensión y de aguas dulces. Las principales ciénagas de esta zona son Capote y María La Baja. Los materiales de esta zona son predominantemente limo-arcillosos a arcillosos ricos en materia orgánica.

El delta del canal del Dique se forma desde el sector más estrecho denominado como Rocha-María La Baja, y forma el ápice de un cono que se abre hacia el mar Caribe en su parte occidental. Cubre una superficie total de 324 km². Contiene ciénagas salobres y dulces, entre estas se destacan la Ciénaga Juan Gómez y Palotal. Aquí se desarrollan varios caños o canales conectores como el Caño Correa. Es un área de manglares y marismas con arcillas y lodos fluvio-marinos de color gris y verde. El canal del Dique actual presenta una longitud de 116.674 km.

Para realizar la reconstrucción paleogeográfica, se realizaron 14 perforaciones con recobro de rocas y sedimentos, a profundidades de 50 metros, y 19 perforaciones superficiales con profundidades de 15 metros. De estos registros se tomaron un total de 254 muestras sobre las cuales se realizaron análisis geoquímicos por el método de fluorescencia de Rayos X, Figura 5.

Con las perforaciones profundas, se realizaron cuatro secciones litoestratigráficas que representan la llanura de inundación en su parte alta, en su parte media, el delta y la llanura marina costera. En estas secciones se pueden identificar y caracterizar las siguientes unidades: depósitos aluviales, fluvio-lacustres, fluvio-marinos, marinos costeros, marinos y formaciones rocosas del Eoceno, como la formación San Cayetano, Tubará y Alférez.

En la sección geológica A-A' representativa de la parte alta de la llanura de inundación del canal del Dique en cercanías de Calamar se puede apreciar una litología predominante de arenas fluviales hacia la base de la cubeta y depósitos fluvio-lacustres con predominio de arcillas amarillentas plásticas en que se acuñan al sur y aumentan hacia el norte (Figura 6).

La sección B-B' representa la parte media de la llanura de inundación del canal del Dique, que se localiza en inmediaciones de la población de Gambote. Caracteriza una cubeta arcillosa en la que se diferencian tres unidades litológicas: una superior compuesta por arcillas plásticas de color amarillo con algunos niveles de limos

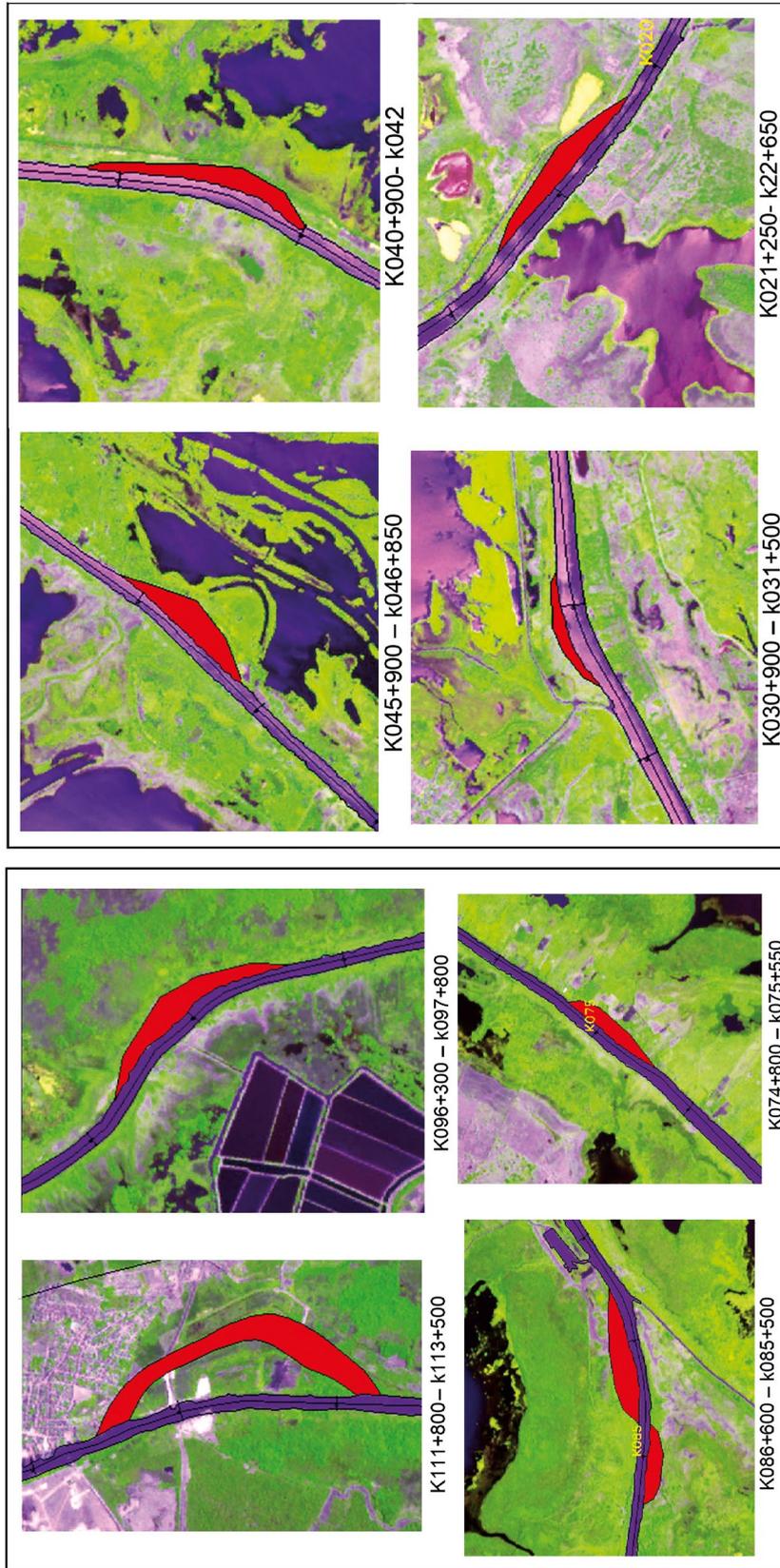


Figura 4. Ejemplos de cambios del cauce del canal del Dique por rectificación antrópica. Fuente: Vargas (2014).

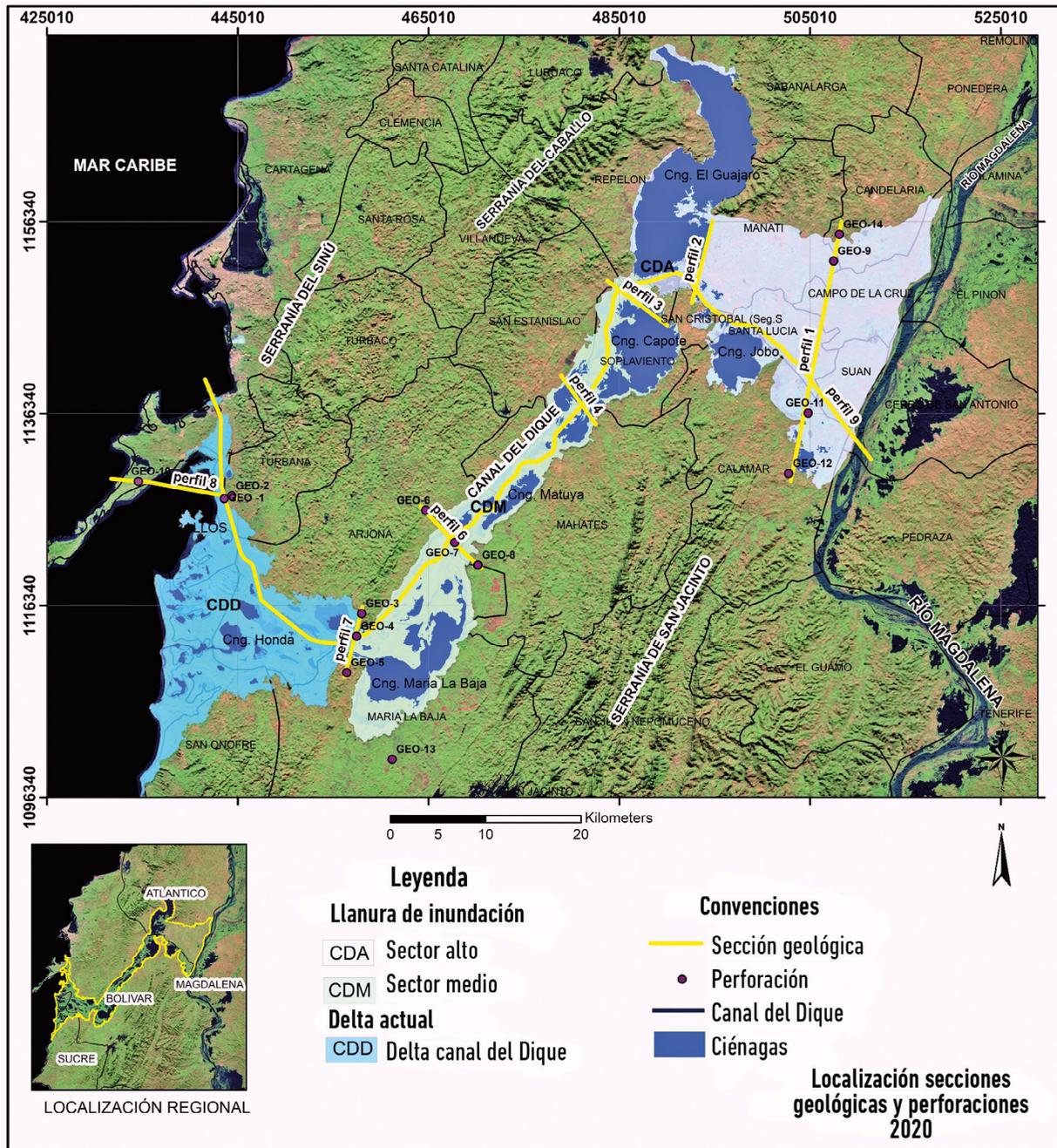


Figura 5. Localización en planta de las secciones litoestratigráficas y perforaciones del canal del Dique. Datos: Landsat 3D.

finos. Incluyen niveles gruesos (10 metros) de arcillas orgánicas a turbas de color negro. En la base se presentan niveles de arcillas verdosas de origen marino, en este sector en la paleogeografía de la antigua bahía de canal del Dique (Figura 7).

En la sección C-C', que representa el límite entre la parte media y el delta del canal del Dique, y con registro

de las perforaciones GEO-003, GEO-004 y GEO-005, presenta una zona de transición fluviolacustre a marina. La cubeta está limitada por las rocas de la Formación San Cayetano y se presentan cinco niveles característicos de base a techo, así: arenas y limos de color gris oscuro a negro muy permeables en los primeros 10 metros; depósitos fluviolacustres compuestos por arcillas

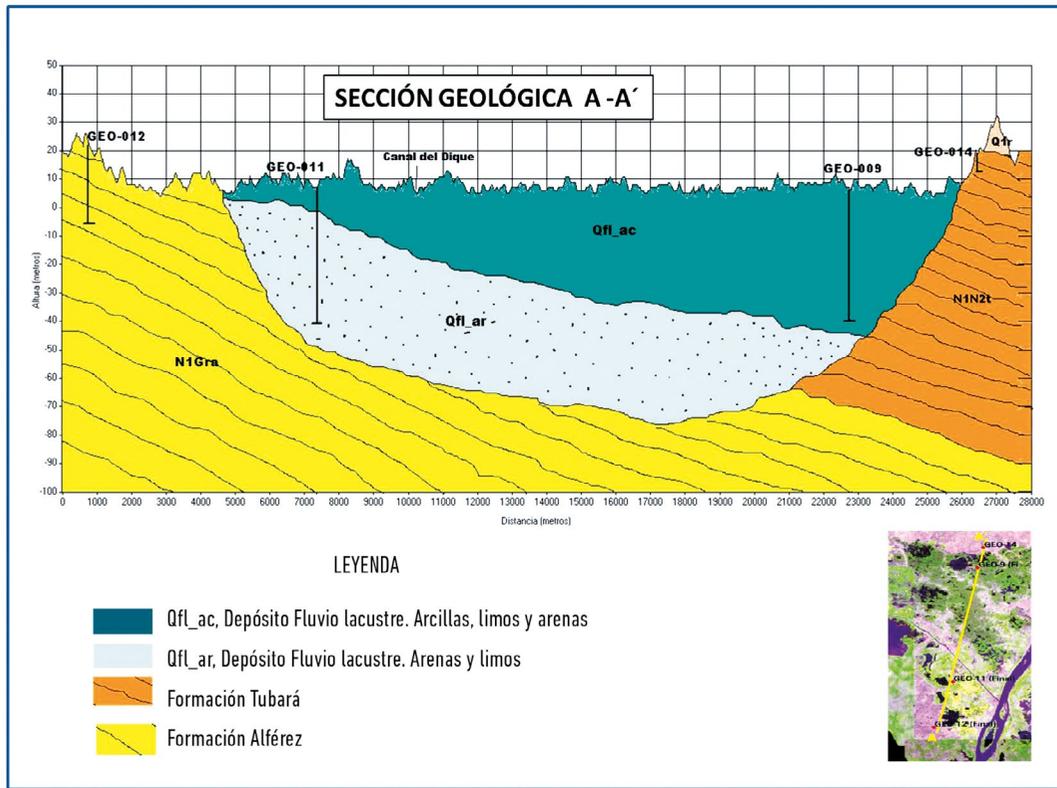


Figura 6. Sección litoestratigráfica A-A', parte alta del canal del Dique, 2020.

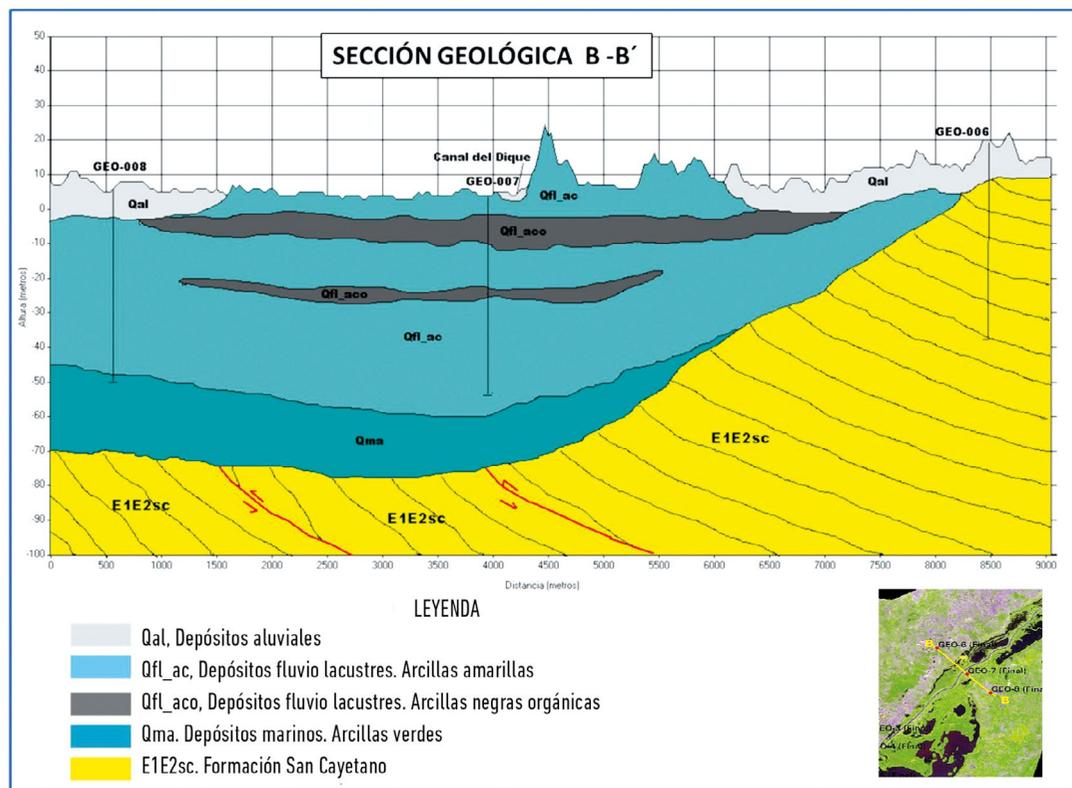


Figura 7. Sección litoestratigráfica B-B', parte media del canal del Dique, 2020.

y lodos negros orgánicos; nivel delgado de arcilla amarilla plástica y arenas gruesas de color amarillo verdoso con algunos clastos de rocas sedimentarias (limolitas amarillas); y arcillas verdosas de origen marino con un mayor porcentaje de clastos de rocas de la Formación San Cayetano, que evidencia su proximidad al contacto basal. Estas litologías evidencian una transición de base a techo de depósitos marinos de marismas a depósitos fluvioacústres (Figura 8).

La sección D-D' representa un ambiente marino costero con arenas y limos calcáreos y silíceos de color amarillento en la zona de transición como aporte de los deltas menores. Infrayaciendo, se observan arcillas y lodos marinos verdosos de fondo. Bajo estos materiales se presentan calizas coralinas de la Formación La Popa, la cual aflora en ambos costados de la bahía de Barbacoas (Figura 9).

Geoquímica

Los resultados geoquímicos por métodos de espectrometría de fluorescencia de rayos X, de las 254 muestras de sedimentos tomadas sobre los registros de perforación

realizados en la llanura de inundación y delta del canal del Dique, representan elementos mayores como calcio, hierro, potasio, titanio, azufre y cloro (Tabla 1).

El calcio asociado a ambientes marinos en las muestras analizadas está en el rango entre el 0,01 % y el 8,4 %; sin embargo, en los sitios El Porvenir, Sincerín, Barú y Gambote presentan valores altos que representan su influencia u origen a partir de aguas carbonatadas.

El contenido normal de azufre en las muestras analizadas presenta valores entre el 0,05 % y el 6,1 %, con concentraciones altas en Las Piedras y Sincerín. Estos altos valores se relacionan con la presencia de sulfuros en sedimentos limosos y arcillosos ricos en materia orgánica, probablemente provenientes de antiguas ciénagas.

Los elementos traza reportan la presencia de elementos bismuto (Bi) en 8 muestras, mercurio (Hg) en 6 muestras, molibdeno (Mo) en 27 muestras, antimonio (Sb) en 3 muestras, telurio (Te) en una 1 muestra, uranio (U) en 7 muestras y wolframio (W) en 5 muestras. De estos elementos se resalta la presencia de mercurio (Hg) por sus implicaciones ambientales, principalmente en la parte alta (GEO-009 y SL-1), parte media (GEO-005) y en la zona del delta (GEO-001) (Tabla 2).

Tabla 1. Resumen estadístico de elementos mayores y traza en la llanura de inundación y delta del Canal del Dique, 2020

Nombre	Elemento	N° de datos	Mínimo	Máximo	Promedio	Mediana
Calcio	Ca_ %	253	0,01	30,18	1,72	1,09
Hierro	Fe_ %	254	0,02	7,04	3,10	3,18
Potasio	K_ %	254	0,08	2,09	1,04	1,05
Titanio	Ti_ %	254	0,01	0,58	0,36	0,40
Azufre	S_ %	212	0,05	21,02	0,91	0,26
Cloro	Cl	109	291 ppm	60 %	2 %	801 ppm
Arsénico	As_ ppm	112	2,7	16,7	5	4,75
Cromo	Cr_ ppm	250	12	220	108	113,5
Cobre	Cu_ ppm	238	6,9	220	36	34
Manganeso	Mn_ ppm	252	19	1911	425	389,5
Níquel	Ni_ ppm	202	14	69	34	32,5
Plomo	Pb_ ppm	244	3,7	29	14	13,3
Rubidio	Rb_ ppm	253	2,4	112,3	56	56
Estroncio	Sr_ ppm	254	5,2	668	172	154,5
Torio	Th_ ppm	93	26	87	49	47
Vanadio	V_ ppm	252	8	295	97	99
Itrio	Y_ ppm	250	2,2	37	19	19,15
Zinc	Zn_ ppm	250	7,9	206	87	88,5
Zirconio	Zr_ ppm	250	6,4	827	203	193,5

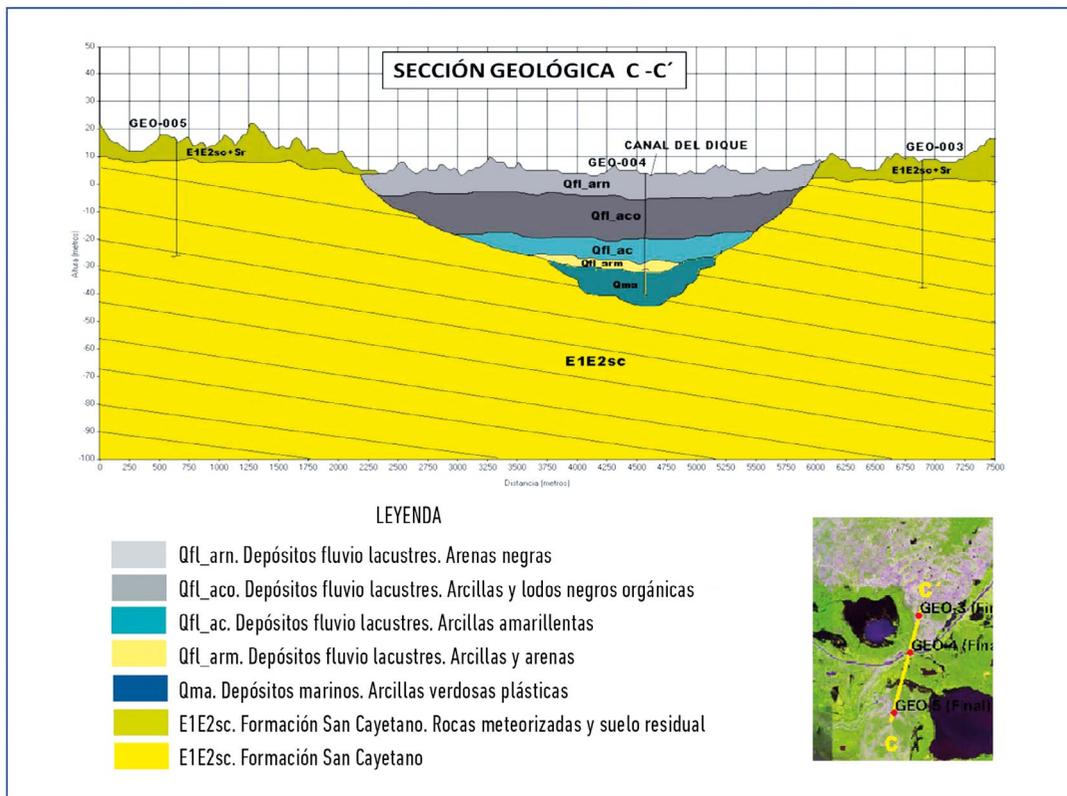


Figura 8. Sección litoestratigráfica C-C', zona límite de la parte media y delta del canal del Dique, 2020.

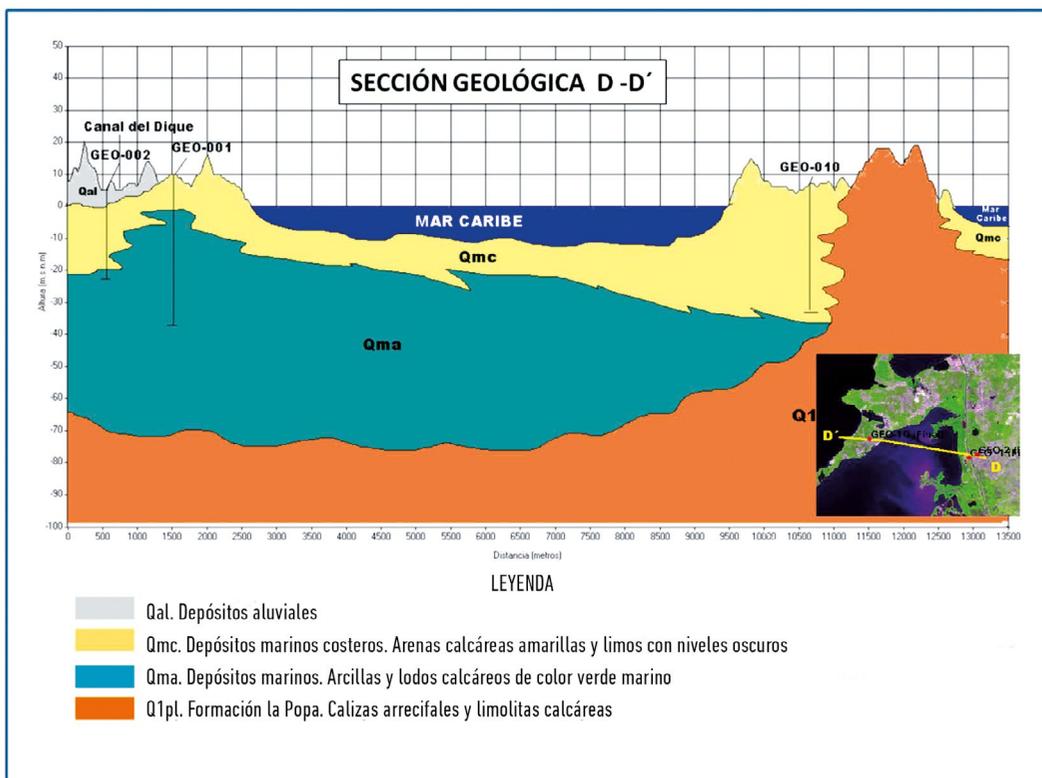
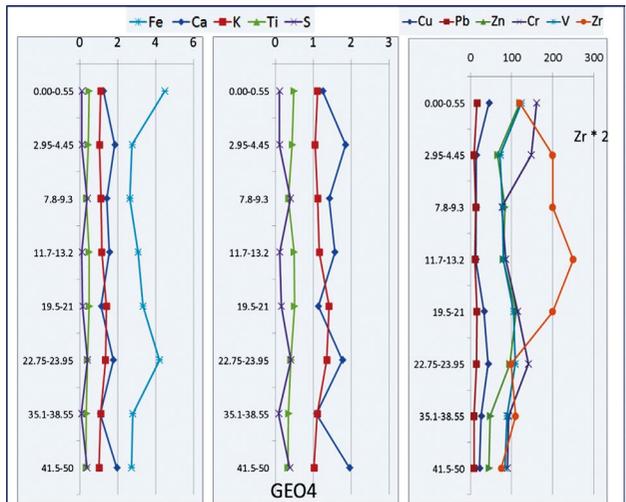
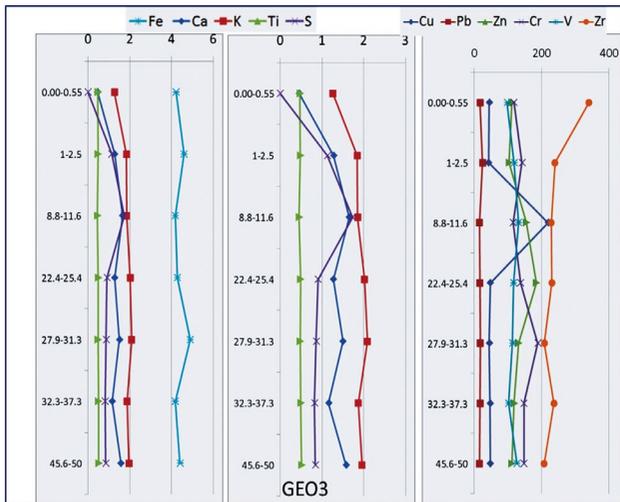
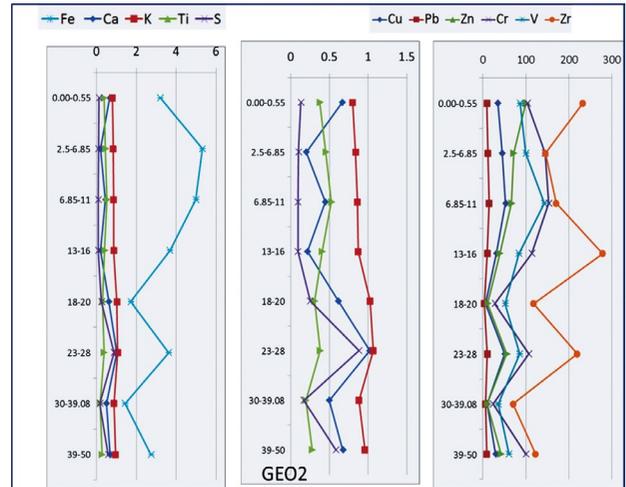
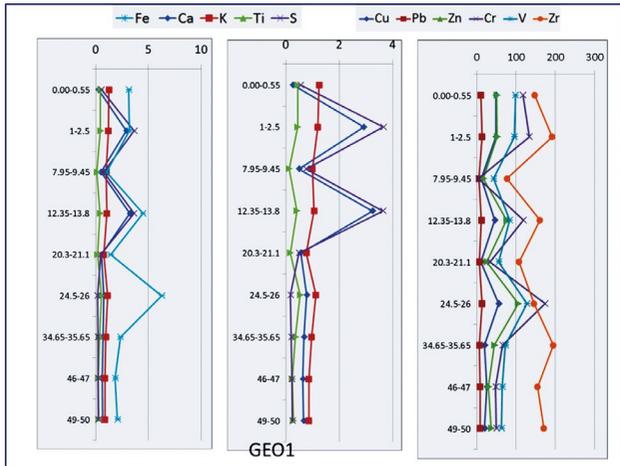
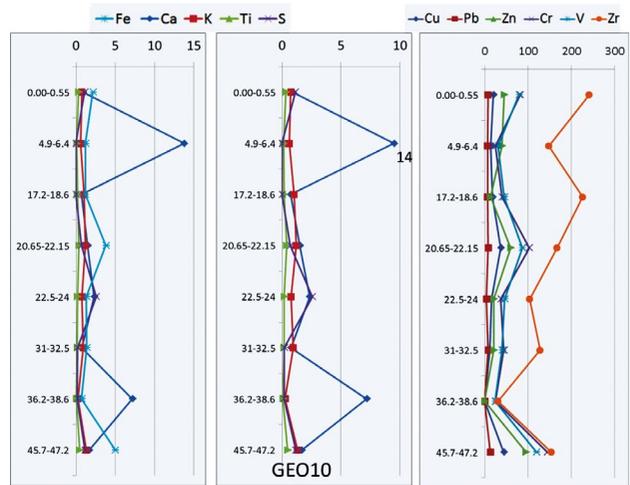
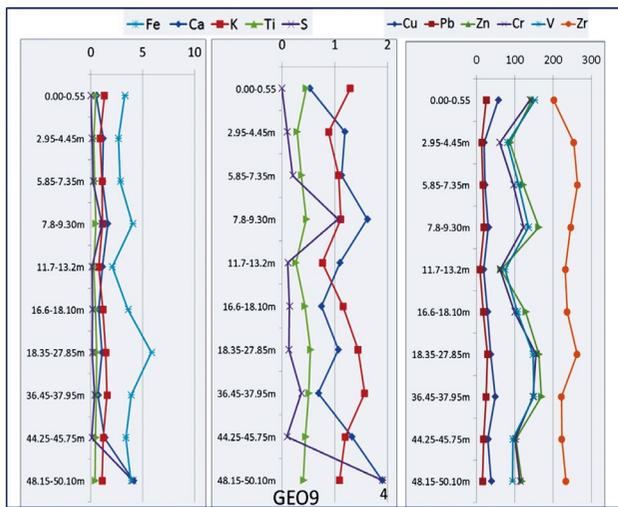
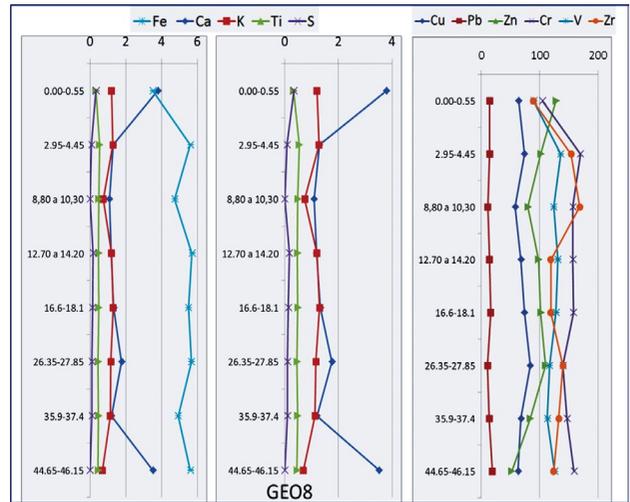
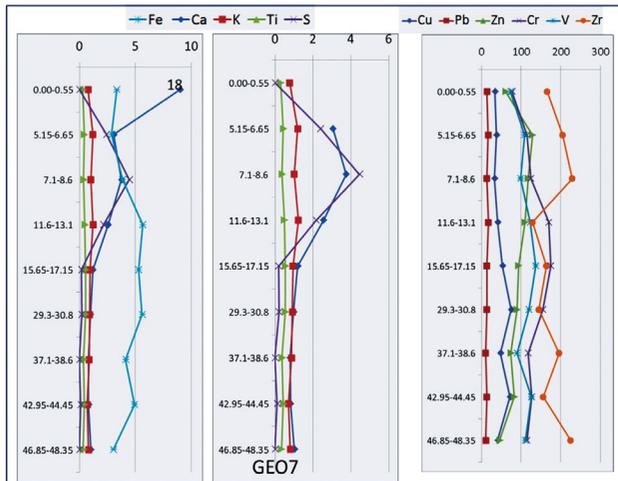
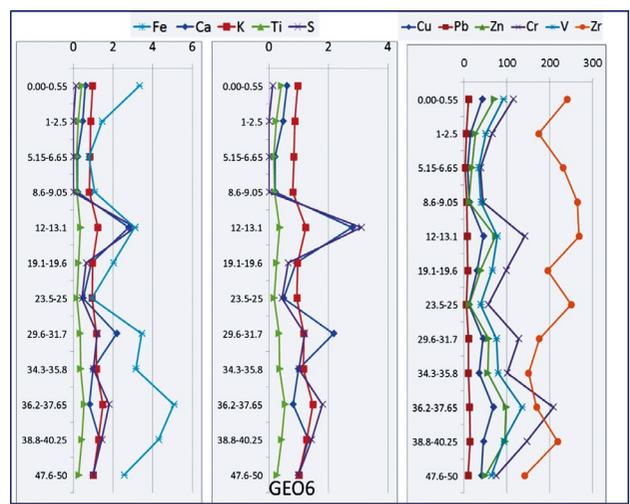
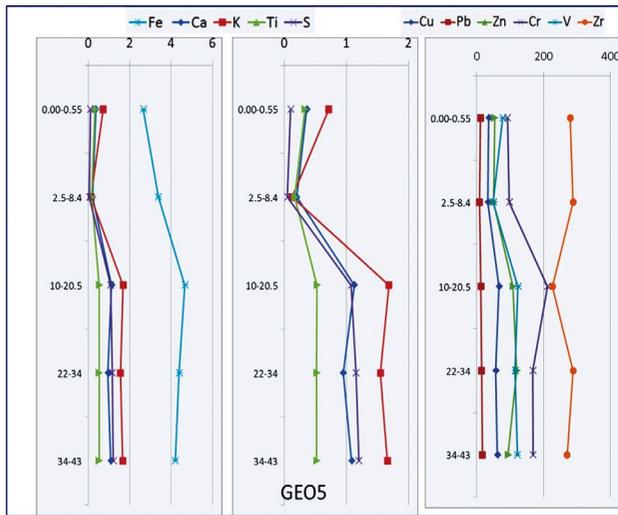


Figura 9. Sección litoestratigráfica D-D', zona del delta del canal del Dique, 2020.

Tabla 2. Elementos traza

Sitio	Perforación	Profundidad (m)	Muestra	Tipo	Anomalía	Hg (ppm)
Manatí	GEO9	7,80-9,30	GEO9-3	Arena-fina	Hg, Mo, Se	6,6
Manatí	GEO9	16,35-27,85	GEO9-6	Limo-gris	Hg	7
Santa Lucia	SL	0,00-0,55	SL-1	Arena-parda	Hg	6,5
CD_Caño Correa	GEO5	34-43	4-d	Limo-gris	Hg, Se	5,7
El Recreo	GEO1	12,35-13,80	C	Lodo-verde	Hg, Mo	6,2





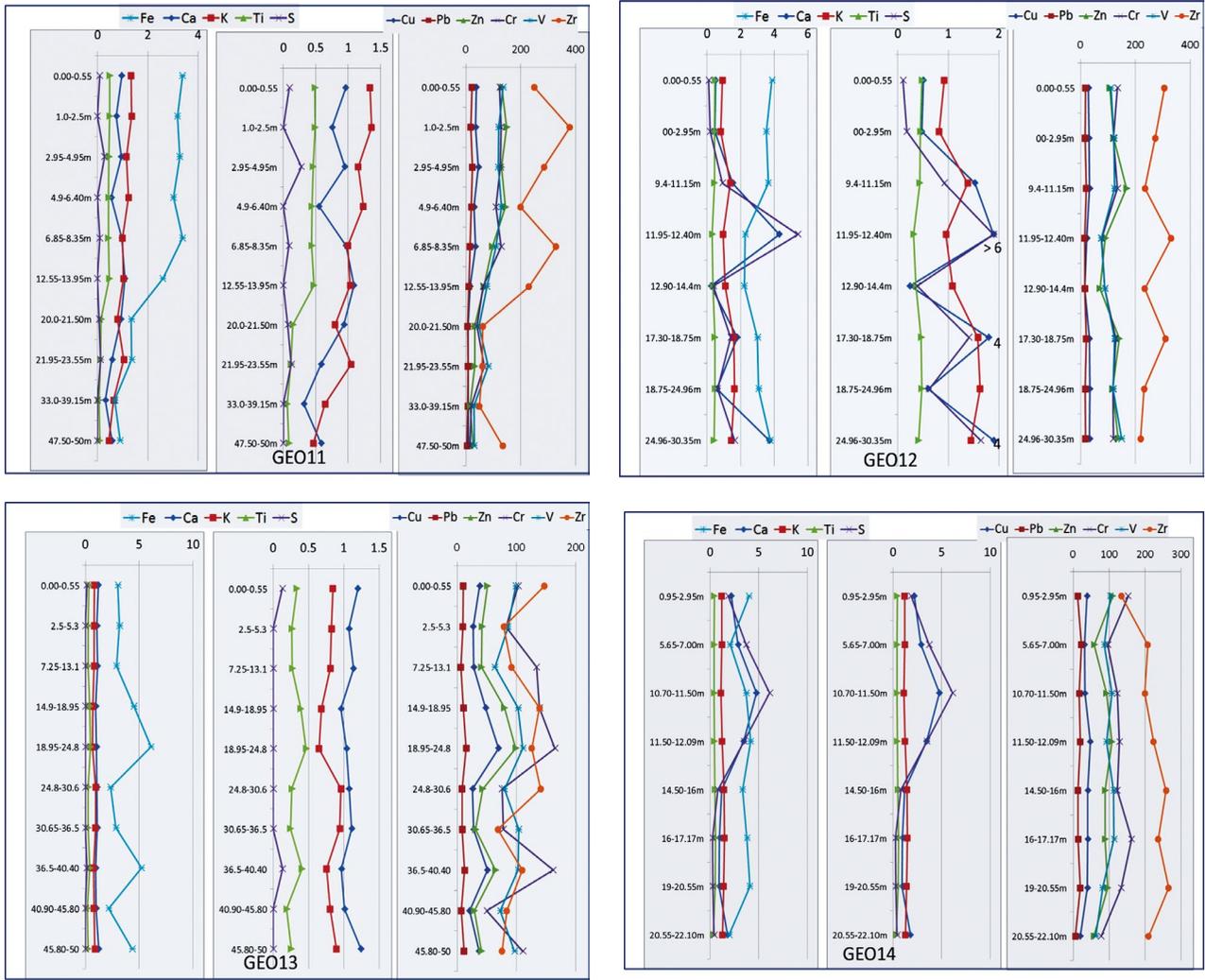


Figura 10. Gráficas que muestran el comportamiento estadístico de los elementos mayores en las perforaciones profundas.

El azufre (S) es proporcional al Ca en las perforaciones GEO1, GEO2, GEO3, GEO5, GEO6, GEO12 y GEO14. El GEO7 es similar, excepto en el nivel superior. El Ca es mayor al S en los perfiles GEO 4, GEO8, GEO9, GEO11 y GEO13. En el perfil 10, el Ca es mucho más alto en los niveles 4,9 a 6,4 y 36,2 a 38,6, quizás por corresponder a niveles calcáreos. En el perfil GEO5 la concentración de los elementos mayores es proporcional entre sí, siendo la excepción el Zr, el cual es inversamente proporcional. La concentración se reduce en el intervalo 2,5 a 8,5 m, mientras que el Zr se incrementa en este intervalo. El GEO3 presenta una relación similar en contenido de Zr al GEO5; estas dos perforaciones atraviesan las mismas unidades asociadas a la Formación San Cayetano.

En general, los elementos traza son proporcionales entre sí a lo largo de los perfiles, excepto por el Zr, el cual es de mayor concentración que los demás; esto es más

evidente en los perfiles GEO9, GEO10, GEO12 y GEO14. Lo anterior se puede observar en la sección A-A'. En el perfil GEO11, el contenido de Zr se reduce drásticamente en la unidad fluviolacustre de arenas y limos.

El Zr en el GEO1 se incrementa en el intervalo 34,65-35,65. En el GEO3 disminuye con la profundidad, mientras que en el GEO5 parece comportarse inversamente proporcional a los demás elementos. El Pb es muy bajo y no cambia en ningún perfil. El Pb y Cu son proporcionales y de contenido similar en los perfiles GEO4, GEO9, GEO11, GEO12 y GEO14. Estos elementos son aportes del río Magdalena, cuya fuente correspondería a los sedimentos de la Serranía de San Lucas, en donde son conocidos los yacimientos y extracción de oro.

El hierro está asociado a:

1. Limos con niveles oscuros de Qmc. En la sección D-D' se observa esta relación en los perfiles GEO1 y 2. En el

GEO10 el hierro se encuentra en baja concentración, lo cual explica por qué los niveles oscuros no están presentes en este perfil.

2. En la sección C-C' se presentan los perfiles GEO5 y GEO 3 de litología similar: rocas meteorizadas de la Formación San Cayetano; es evidente el alto contenido de Fe en esta unidad. En el perfil GEO4, las demás unidades evidencian un alto contenido de Fe debido a la fuente de aporte por la degradación de la Formación San Cayetano.
3. En la sección B-B' se presentan los perfiles GEO8 y GEO7, en los que el Fe está asociado a las arcillas amarillas de los depósitos fluviolacustres, mientras que en GEO6 se asocia a la Formación San Cayetano, como ya se describió.
4. En la Sección A-A' se encuentran los perfiles GEO12 (que solo corta la Formación Alférez), GEO9 y GEO11; en ellos el hierro está asociado a los depósitos fluviolacustres.

Conclusiones

Teniendo en cuenta los registros de los paleocanales o madrevejas evidenciados sobre diferentes imágenes de satélite y la cartografía histórica, se realizó una reconstrucción paleogeográfica del canal del Dique y su bahía costera. El canal muestra un patrón morfológico sinuoso que le permitía reducir su velocidad de flujo.

Por otra parte, la hidrografía del canal del Dique ha sido modificada por las variaciones de los cauces menores, cuya reconstrucción por medio de la interpretación de imágenes de satélite muestra una red de canales paralelos a la dirección de flujo Este-Oeste.

Agradecimientos

El autor agradece a todas las entidades y organismos que han apoyado los estudios del canal del Dique como la Universidad del Norte, el Consorcio Canal del Dique, Gómez & Cajiao, Cardique y Cormagdalena. Asimismo, a las personas que han aportado su conocimiento con sus comentarios y sugerencias, en especial a Fortunato Carvajal, Manuel Alvarado y Álvaro Díaz.

Referencias

Acebedo Latorre, Eduardo. 1997. *Atlas de mapas antiguos de Colombia, siglos XVI a XIX* (4.ª ed.). Bogotá: Editora Arco.

Alvarado M. 2001. "Canal del Dique. Plan de restauración ambiental I etapa." En *Colombia 2001*, editado por M. Alvarado, 328. Barranquilla: Ediciones Uninorte.

AGN (Archivo General de La Nación). 1852. "Mapa de la Provincia de Cartagena. Con extracción de la zona del Canal del Dique." En *Atlas de mapas antiguos de Colombia. Siglos XVI a XIX*, editado por Eduardo Acebedo Latorre. Cuarta Edición, Litografía Arco, Sección Mapas y Planos, Mapoteca n.º 6, referencia 130, Bogotá.

AGN. 1864. "Mapa del estado de Bolívar. Con extracción de la zona del Canal del Dique." En *Atlas de mapas antiguos de Colombia. Siglos XVI a XIX*, editado por Eduardo Acebedo Latorre, Litografía Arco, Sección Mapas y Planos, Mapoteca n.º 6, referencia 11, Bogotá.

AGN. 1892. "Mapa del Canal del Dique." *Atlas de mapas antiguos de Colombia. Siglos XVI a XIX*, editado por Eduardo Acebedo Latorre, Litografía Arco, Sección Mapas y Planos Mapoteca, n.º 4 referencia 727, Bogotá.

Yangyang Li, Janok P. Bhattacharya, Sumiyyah Ahmed, y Daniel Garza. 2018. "Re-Evaluating the Paleogeography of The River-Dominated and Wave-Influenced Ferron Notom Delta, Southern Central Utah: An Integration of Detailed Facies-Architecture and Paleocurrent Analysis." *Journal of Sedimentary Research* 88 (2): 214-240. <https://doi.org/10.2110/jsr.2018.9>.

Gough, Amy, Robert Hall, y Marcelle BouDagher-Fadel. 2020. "Mid-Cenozoic Fluvio-Deltaic to Marine Environments of The Salin Sub-Basin, Central Myanmar." *Journal of Asian Earth Sciences* 190. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2019.104143>.

Gottfried, Michael, Nancy Stevens, Eric Roberts, Patrick O'Connor, y Remigius Chami. 2009. "A New Cretaceous Lungfish (Dipnoi: Ceratodontidae) from the Rukwa Rift Basin, Tanzania." *African Natural History* 5 (1): 31-36.

IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 1959. Planchas topográficas 16, 17, 23, 24, 29,30, 31, 36 y 37. Escala 1:100.000. Año 1953.

Manassero, Marcelo L. 2016. "Sedimentology of the Upper Cretaceous Red Beds Colorada Formation in The Western Sector North Patagonian Massif, Argentina of Angostura of The North Patagonian Massif, Argentina." *Journal of South American Earth Sciences* 10 (1): 81-90. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(97\)00007-2](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(97)00007-2).

Massuunganhe, Elídio A., Annika Berntsson, Jan Risberg, Lars-Ove Westerberg, Marie Christiansson, Frank Preusserd, Stefan Bjursäter, y Mussa Achimoa. 2018. "Palaeogeography and dynamics of the deltaic wetland of Save River, Mozambique." *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 489: 64-73. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.09.021>.

- Mogollón, J. V. 2013. "Los grandes daños ambientales son imperceptibles: los impactos visibles del canal Calamar-Mamonal." Trabajo presentado en el *Primer Simposio Internacional sobre la Administración Sostenible de las Islas del Rosario y San Bernardo*. Cartagena de Indias. Del 23 al 25 de octubre.
- Mogollón, J. V. 2013. *El canal del Dique. Historia de un desastre ambiental*. Bogotá: El Ancora Editores.
- Pierik, H. J., K. M. Cohena, y E. Stouthamer. 2016. "A New GIS Approach for Reconstructing and Mapping Dynamic Late Holocene Coastal Plain Palaeogeography." *Geomorphology* 270: 55-70. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.05.037>.
- Pleuger, E., J.-Ph. Goiran, I. Mazzini, H. Delile, A. Abichou, A. Gadhoun, H. Djerbi, N. Piotrowska, A. Wilson, E. Fentress, I. Ben Jerbania, y N. Fagel. 2019. "Palaeogeographical and Palaeoenvironmental Reconstruction of The Medjerda Delta (Tunisia) During the Holocene." *Quaternary Science Reviews* 220: 263-278. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.07.017>.
- Quintanar, Jessica, Shuhab D. Khan, Mohamed S. Fathy, y Abdel-Fattah A. Zalatb. 2013. "Remote Sensing, Planform, and Facies Analysis of The Plain of Tineh, Egypt for the Remains of The Defunct Pelusiac River." *Sedimentary Geology* 297: 16-30. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2013.09.002>.
- Rofes, Juan, Raquel Moya-Costa, Maria Bennàsar, Hugues-Alexandre Blain, y Gloria Cuenca-Bescós, 2016. "Biostratigraphy, Palaeogeography and Palaeoenvironmental Significance of *Sorex Runtonensis* Hinton, 1911 (Mammalia, Soricidae): First Record from The Iberian Peninsula." *Palaeogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 459: 508-517. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.07.021>.
- Vargas Cuervo, Germán. 2014. *Proyecto restauración del sistema del Canal del Dique. Componente Geológico, Geomorfológico, Morfodinámico y concentración de sedimentos. Informe Técnico*. Consorcio Dique (Royal haskoning DHV, y Gómez & Cajiao).
- Yangyang, Li, Janok Penner Bhattacharya, S. Ahmed, y Daniel Garza. 2018. "Re-Evaluating the Paleogeography of The River-Dominated and Wave-Influenced Ferron Nottom Delta, Southern Central Utah: An Integration of Detailed Facies-Architecture and Paleocurrent Analysis." *Journal of Sedimentary Research* 88 (2): 214-240. <https://doi.org/10.2110/jsr.2018.9>.

Germán Vargas Cuervo

Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia. Maestría en Teledetección y doctorado en ciencias de la Tierra por la Universidad Pierre et Marie Curie. Fue jefe de la Oficina de Gestión Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia. Director de Minas del Ministerio de Minas y Energía. Director del Departamento de Geografía de la Universidad Nacional. Subdirector General Ideam. Jefe de sección y asesor de Ingeominas. Gerente de Geosensing Ltda. Actualmente es profesor titular y jefe de la Oficina de Gestión Ambiental, sede Bogotá de la Universidad Nacional.