

Evaluación geológica, geotécnica y ambiental de los fenómenos de volcanismo de lodos en la Costa Caribe Colombiana

Assessment geological, geotechnical and environmental phenomena of mud volcano in the Colombian Caribbean Coast

Cristian Herrera Atencio, Claudia Díaz Mendoza

Ingeniería ambiental, Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco, Cartagena, Colombia.

cjherrera8@gmail.com

Resumen— En la Región Caribe la presencia de diapirismo se relaciona con fenómenos de erosión y desertización de suelos, haciéndolos no aptos para construcción y otros usos estructurales. El presente estudio evalúa las características geológicas, geotécnicas y ambientales en seis zonas afectadas por fenómenos de diapirismo de lodos en la costa Caribe Colombiana. La investigación relaciona las características encontradas en las distintas zonas, determinando un patrón de comportamiento geotécnico y geológico que permite inferir presencia de este fenómeno en otros sitios de similares condiciones, para de esta forma evaluar posibles amenazas o factores de riesgo de suelos para algunas actividades antrópicas.

Palabras clave— Diapirismo, Estratigrafía, Erosión, Lodos, Resistividad.

Abstract— In the Caribbean Region the presence of diapirism is related to phenomena of erosion and desertification of soils, making them unfit for construction and other structural uses. The present study evaluates the geological, geotechnical and environmental characteristics in six zones affected by diapirism of sludge phenomena in the Colombian Caribbean coast. The research relates the characteristics found in the different zones, determining a geotechnical and geological behavior pattern that allows inferring the presence of this phenomenon in other sites of similar conditions, in order to evaluate possible threats or soil risk factors for some anthropic activities.

Key Word — Diapirism, Erosion, Mud, Stratigraphy, Resistivity.

I. INTRODUCCIÓN

La morfología por diapirismo de lodos es generada por diferencias de densidad de las rocas del subsuelo y además son estructuras geológicas intrusivas que proceden de niveles

estratigráficos muy plásticos sometidos a gran presión, ascienden por las capas sedimentarias de la corteza terrestre, atravesándolas y deformándolas, en un lento proceso medible en millones de años [1].

Los volcanes o manantiales de lodo, únicamente se asemejan a los volcanes de actividad magmática por su forma, aunque sus dimensiones son mucho más reducidas, tienen una elevación cónica con un cráter en la cúspide; a veces suelen ser montículos poco elevados, de cúspide plana, en la cual existen pequeñas salidas aisladas, a través de las cuales es expulsado el lodo, formado por arcillas finamente desmenuzadas, en el cráter de los volcanes de lodo o en las salidas aisladas de sus cúspides planas existe siempre un depósito de agua turbia, esporádicamente se desprenden burbujas de gas [2].

El gas se compone de metano y mezclas de H₂S, CO₂ y CO. A intervalos, el desprendimiento de burbujas se intensifica. El cráter se llena de lodo líquido, que comienza a derramarse por las vertientes. Estas corrientes de lodo líquido poseen una temperatura algo elevada. El agua que interviene en su composición contiene sales de cloruro y sulfato de sodio, boro, yodo y bromo mezclados con agua y trozos de diversas rocas sedimentarias.

Para el ámbito Caribe, la presencia de diapirismos de lodo se da tanto en zonas emergidas como en áreas costa afuera en el Mar Caribe colombiano, con elementos geomorfológicos característicos tales como domos, colinas, islas de arrecifes de coral y volcanes de lodo [3]. En el contexto histórico de dicho ámbito, la coincidencia espacial entre el diapirismo de lodo y fuertes cambios en el contorno costero ha sido evidenciada para áreas como la zona occidental del abanico del río

Magdalena, que presenta diferentes mecanismos de formación de volcanes de lodo asociados diversos regímenes de esfuerzo [4]; Cartagena-Galerazamba, en donde la erosión y formación de espigas litorales involucran cambios de la línea de costa del orden de los cientos de metros en los dos últimos siglos [5]; los bancos de Salmedina, que se originaron por colonización coralina de los levantamientos de domos diapíricos sobre la plataforma Caribe colombiana [6]; además de Córdoba-Antioquia, en donde la presencia de relieves positivos con emanaciones de gases marcan la actividad reciente de las intrusiones diapíricas, sobre las características sedimentológicas y geofísicas de su plataforma continental somera [7].

Tales influencias podrían incidir en las áreas de Arboletes y Damaquiel en el departamento de Antioquia, ambas con importantes manifestaciones diapíricas en su franja litoral y plataforma somera adyacente además que la presencia de gases y su difusión a través de los sedimentos pueden aumentar significativamente la estabilidad y resistencia de las capas y, por lo tanto, facilitar la erosión por los oleajes de las zonas de litorales; además del área comprendida entre Cartagena y Barranquilla, la cual presenta diferentes dimensiones de volcanes de lodo en función de los patrones de deformación en la zona oriental de abanico del río Magdalena y la zona terrestre contigua [4].

Proyectos de investigación más recientes relacionados con el fenómeno de diapirismo de lodos y la evolución costera del Caribe colombiano, dieron como resultado la caracterización y elaboración de mapas geomorfológicos y geofísicos con las manifestaciones de diapirismo de lodos en las zonas Canal del Dique – Galerazamba y Bocatocino – Ciénaga [8].

La Costa Caribe Colombiana se ha visto influenciada notablemente por el fenómeno de Diapirismo de lodos, presentándose en forma de chimenea al norte de Punta Canoas y en forma de domos al sur de esta [6], que es responsable de cambios a nivel morfológico del suelo y por tanto de los usos que se den del mismo, ya que las zonas que se han visto afectadas presentan vulnerabilidad y restricción para el establecimiento de estructuras físicas, así como también presentan susceptibilidad a erosión y formación de grietas, que permiten infiltración de agua durante épocas de lluvia y además aumento de fenómenos de remoción de masas por escorrentía superficial.

En el estudio realizado se tuvo como objetivo evaluar las características estratigráficas del subsuelo y las condiciones geológicas de las zonas afectadas por volcanismo de lodos en los sectores del Rodeo, Bayunca, Turbaco y Totumo (Departamento de Bolívar) y La Esmeralda y El Tesoro (Departamento de Córdoba) pertenecientes a la Región Caribe Colombiana, mediante la utilización de métodos directos e indirectos para la determinación de características geotécnicas y geológicas comunes en los suelos con presencia de diapirismo, lo cual nos permitirá establecer zonas de riesgo o amenaza geológica a nivel de la Costa Atlántica, donde el

fenómeno es común desde el golfo de Urabá hasta la Península de la Guajira.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología empleada en el desarrollo de la investigación comprendió primero la revisión bibliográfica para la elección de las zonas de estudio a lo largo de la Costa Caribe Colombiana, teniendo en consideración que fuesen sitios en los cuales existiera reporte de actividad geológica y/o grandes áreas erosionadas; esto permitió definir seis Zonas de Estudio: Volcán del Totumo (Bolívar), Bayunca (Bolívar), Turbaco (Bolívar), El Rodeo (Cartagena-Bolívar), Volcán de lodo El Tesoro (Córdoba) y Volcán de lodo La Esmeralda (Córdoba), tal como se muestra en la Fig. 1.

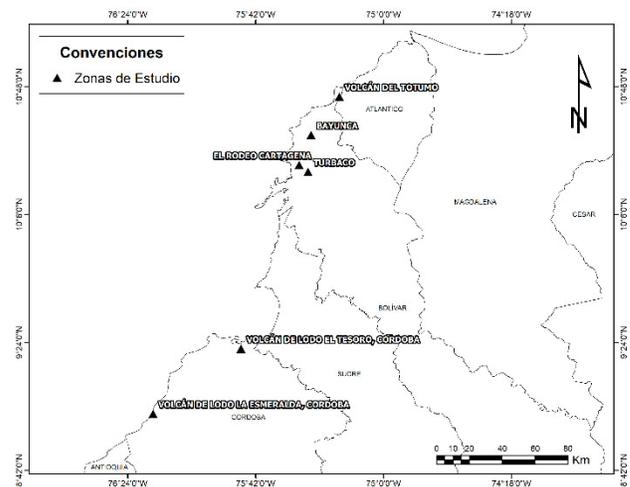


Figura 1. Localización de las Zonas de estudio.

Luego se establecieron dos puntos de muestreo por Zona de Estudio, escogidos por contar con la presencia de diapirismo de lodos; en ellos se realizó una perforación manual con barreno y paladruga, recuperando muestras a 0,5 m y 1,0 m de profundidad, las cuales se sometieron a los siguientes ensayos de laboratorio: Granulometría (ASTM D421-58 y D422-63), límites de Atterberg (ASTM D423-66, ASTM D 424-59), contenido de humedad y contenido de material orgánico (ASTM D2216-71), para posteriormente obtener la clasificación de suelos mediante el método USC. Además, se realizó recuperación de muestras de lodo, dos muestras por zona; dichas muestras se recuperaron de cráteres diferentes en cada zona, y se les realizaron ensayos en el laboratorio de Calidad Ambiental mediante los métodos de digestión ácida para determinación de materia orgánica, Standard Methods (Ed 20) 4500-H-B para pH, Standard Methods (Ed 20) 2510-A para salinidad y Standard Methods (Ed 20) 4500-SO4 para sulfatos.

También se realizaron pruebas geoelectricas en tres sitios por punto de muestreo, usando un telurómetro digital MTD-

20KWe (MEGABRAS); con la configuración o arreglo de electrodos denominado Wenner, iniciando con electrodos de corriente a distancias iguales. Se obtuvieron como resultados la resistividad del terreno en función de la profundidad, los cuales fueron representados gráficamente en curvas de Sondeo Eléctrico Vertical (SEV). Con los datos obtenidos se realizó una interpretación de cada sondeo en dos etapas: con la primera se obtuvo una estratificación geológica y las resistividades verdaderas de cada capa, partiendo de las leyes físico-matemáticas; con la segunda se buscó el significado hidrogeológico de esas capas y resistividades, correlacionando los resultados obtenidos con los datos disponibles del subsuelo.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La información secundaria revisada permite decir que el diapirismo formado en la población de Bayunca no presenta un vulcanismo activo, en cambio los de Turbaco y el Rodeo cubren un área de 0,8 km² y 1 km² respectivamente, con una actividad permanente; el de Bayunca arroja pequeños flujos de lodo, que crea una superficie dómica sobrepuesta al relieve existente. Los diapiros que se manifiestan en el departamento de Córdoba localizados cerca del municipio de San Antero presentan una actividad permanente de un lodo aceitoso y con fuerte olor a petróleo, el área de influencia es pequeña, pero se presentan irregularmente distribuidos en una zona de una hectárea, aproximadamente. Al occidente de la falla de Villanueva. El totumo se caracteriza por la presencia de numerosos “volcanes de lodo”, en este sector se han identificado siete volcanes activos y por lo menos cinco inactivos [9]; el volcán El Totumo es el más conocido por su

atractivo turístico. Este fenómeno se extiende hasta la plataforma continental, donde es muy conocido como el volcán submarino de Galerazamba. El conocimiento de la existencia de este volcán de lodo submarino data desde 1794, y se ha reportado erupciones en los años de 1839, 1848, 1925, 1943 y 1958.

Los ensayos de Granulometría y Límites de Atterberg permitieron realizar la Clasificación de Suelos mediante el método USC, obteniendo una conformación estratigráfica uniforme en conformación y resistencia del terreno; entre la superficie y 1,0 m de profundidad, se encontraron estratos de arcilla de alta plasticidad, pardas con vetas grises y óxidos, con valores de humedad natural entre 18% y 45%.

El comportamiento del pH del suelo edáfico, oscila entre 7,0 y 8,5, lo cual es un indicador de suelos básicos. La tendencia de los suelos básicos en cuanto al desarrollo de la vegetación es baja, sólo se desarrollan aquellas especies que sean tolerantes a estas condiciones del suelo. Además, la presencia de pH altos es también asociada a contenidos de salinidad altos, lo que también explicaría la desertización en las zonas influenciadas.

Las condiciones litológicas fueron revisadas mediante el análisis de información secundaria, de la cual se sintetiza por zona las condiciones indicadas en la Tabla 1, donde se muestra que las zonas estudiadas en términos generales presentan unidad litológica Lodos (DI) constituida por arcillas y limos lodosos de color parduzco con bloques de: (areniscas, arcillolitas, limolitas, calizas).

Zona de estudio	Litología
Bayunca	El subsuelo del área de estudio está ubicado sobre la unidad litológica formación Bayunca (Ngb) constituida por lodolitas grises oscuras, claras y negras, con oxidación amarillenta y capas delgadas a medias, además intercalaciones de arenisca de cuarzo, gris claro en capas delgadas. Además, según [10], y [11] esta formación se comprende entre el Mioceno y el Plioceno.
Volcán del totumo	Esta zona litológicamente se encuentra sobre depósitos coluvioaluviales (Qcal) Los depósitos coluvioaluviales agrupan la sedimentación fluvial intramontaña reciente y la generada por coluviones igualmente recientes, cubren un área de varios kilómetros cuadrados. Están constituidos por mezclas de gravas, arenas, limos y arcillas, de color pardo amarillo a gris pardo, y cubren las unidades rocosas y los cuaternarios más antiguos.
El rodeo Cartagena	Esta zona de estudio está ubicada sobre la unidad litológica Lodos (DI) constituida por arcillas y limos lodosos de color parduzco con bloques de: (areniscas, arcillolitas, limolitas, calizas) de tamaños entre 5 - 80 cm, embebidos en la masa lodosa producto de erupciones y emanaciones de los “volcanes de lodo”.
Turbaco	El subsuelo de área está ubicado sobre dos (2) unidades litológicas. La primera unidad corresponde a la Formación Popa (Qpp), constituida por Calizas arrecifales, amarillosas claras; masivas de corales y moluscos. La segunda unidad denominada Gravas de Rotinet (Qpr) que son arenas de cuarzo y gravas.

Córdoba (El Tesoro y La Esmeralda)	El subsuelo del área reposa sobre la unidad litológica formación Froresanto (Ngmf) constituida por arcillolitas y limolitas con intercalaciones delgadas de areniscas. Esta formación procede de la edad paleoceno superior [10].
------------------------------------	---

Tabla 1. Características litológicas de las zonas de estudio.

Los datos obtenidos de los sondeos geoelectricos fueron analizados y correlacionados con los valores de Resistividad indicados en la Tabla 2, con el fin de realizar una prospección geofísica de la estratigrafía encontrada en las perforaciones de suelo realizadas. De esta manera se obtuvo la correlación hidrogeológica resumida en la Tabla 3, la cual nos muestra una estratigrafía uniforme, con una tendencia a encontrar

superficialmente una capa de suelo seco salitroso, seguida de materiales cohesivos conformados por arcillas limosas y limos lodosos saturados con agua salobre, subyaciendo la anterior formación encontramos arenas secas y finalmente encontramos un estrato conformado por Basamento cuaternario (areniscas).

Material	Resistividad (Ohmios/metro)
Aguas subterráneas en granito	20-100
Aguas subterráneas en caliza	20-50
Aguas salobres	1-10
Aguas potables superficiales	20-300
Agua de mar	< 0,2
Agua destilada	> 500
Arcillas y margas	10-100
Calizas y arenisca	50-300
Pizarra	50-300
Rocas metamórficas	100-10.000
Gravas	100-10.000
Arenas	130-1000
Limos	30-500

Tabla 2. Resistividad para algunos materiales [12].

Localización	Sondeo	Capa N°	Resistividad. (Omh-m)	Espesor (m)	Profundidad. (m)	Correlación Hidrogeológica
Totumo	S-1	1	31,01	1,5	1,5	Suelo seco salitroso
		2	15,69	1,5	3,0	Arcillas limosas intercaladas con arenas
		3	6,49	4,5	7,5	Limos lodosos saturados de agua salobre intercalados con Arcillas
		4	50,01	38,25	45,75	Arenas secas
		5	129,67	-	-	Basamento Cuaternario (Areniscas)
Totumo	S-2	1	22,18	3,00	3,00	Suelo seco salitroso
		2	8,88	6,00	9,00	Limos lodosos saturados de agua salobre intercaladas con arcillas
		3	53,05	15,75	24,75	Arenas secas
		4	130,36	-	-	Basamento Terciario (Areniscas)
El Rodeo	S-1	1	4,84	5,25	5,25	Limos lodosos saturados de agua salobre
		2	26,76	3,00	8,25	Arcillas saturadas de agua salobre
		3	41,83	-	-	Arenas saturadas

El Rodeo	S-2	1	5,89	6,00	6,00	Limos lodosos saturados de agua salobre
		2	29,19	11,25	17,25	Arcillas saturadas de agua salobre
		3	54,61	-	-	Arenas saturadas
Bayunca	S-1	1	21,90	1,50	1,50	Suelo seco
		2	6,45	3,00	4,50	Limos lodosos saturados de agua salobre
		3	31,38	9,00	13,50	Arcillas saturadas de agua salobre
		4	65,70	-	-	Arenas saturadas
Bayunca	S-2	1	20,14	1,50	1,50	Suelo seco
		2	6,97	3,00	4,50	Limos lodosos saturados de agua salobre
		3	30,29	8,25	12,75	Arcillas saturadas de agua salobre
		4	61,67	10,50	23,25	Arenas secas
		5	93,16	-	-	Basamento Cuaternario (Areniscas)
Turbaco	S-1	1	11,84	1,50	1,50	Suelo seco
		2	9,82	6,00	7,50	Limos lodosos saturados de agua salobre
		3	35,60	6,75	14,25	Arcillas saturadas de agua salobre
		4	73,68	-	-	Arenas secas
Turbaco	S-2	1	11,84	1,50	1,50	Suelo seco
		2	9,82	6,00	7,50	Limos lodosos saturados de agua salobre
		3	35,60	6,75	14,25	Arcillas saturadas de agua salobre
		4	73,68	-	-	Arenas secas
El Tesoro	S-1	1	19,78	1,50	1,50	Suelo seco
		2	8,77	3,00	4,50	Limos lodosos saturados de agua salobre
		3	32,93	5,25	9,75	Arcillas saturadas de agua salobre
		4	82,36	10,50	20,25	Arenas intercaladas con gravas metamórficas
		5	146,14	-	-	Basamento Cuaternario (Areniscas)
El Tesoro	S-2	1	21,23	1,50	1,50	Suelo seco
		2	6,14	3,00	4,50	Limos lodosos saturados de agua salobre
		3	30,68	4,50	9,00	Arcillas saturadas de agua salobre
		4	81,43	11,25	20,25	Arenas intercaladas con gravas metamórficas
		5	147,74	-	-	Basamento Cuaternario (Areniscas)
La Esmeralda	S-1	1	12,88	0,75	0,75	Suelo seco
		2	7,16	3,75	4,50	Limos lodosos saturados de agua salobre
		3	34,73	6,75	11,25	Arcillas saturadas de agua salobre
		4	75,46	9,75	21,00	Arenas intercaladas con gravas metamórficas
		5	115,37	-	-	Basamento Cuaternario (Areniscas)
La Esmeralda	S-2	1	12,63	0,75	0,75	Suelo seco
		2	7,52	3,75	4,50	Limos lodosos saturados de agua salobre
		3	35,20	6,75	11,25	Arcillas saturadas de agua salobre
		4	73,25	8,25	19,50	Arenas intercaladas con gravas metamórficas
		5	112,10	-	-	Basamento Cuaternario (Areniscas)

Tabla 3. Correlación hidrogeológica de las zonas en estudio.

Los resultados de la caracterización física de lodos se indican en la Fig. 2; donde la Granulometría de lodos indica una distribución porcentual del tamaño de las partículas,

mostrando que el mayor porcentaje de partículas presentes en las muestras de lodos, corresponden a Arenas Finas, con tamaños de partículas entre 0,05 – 0,25 mm [13],

seguidamente encontramos una distribución porcentual entre el 20% y 40% de Arenas Gruesas y en menor proporción entre 8% y el 13% de partículas de Limos y Arcillas.

En tanto los resultados de la caracterización química de lodos se indican en la Fig. 3, evidenciando en estos que el 75% de las muestras de lodo estudiadas presentan valores de sulfatos

entre 1000 y 4000 mg/L, el 16,6% presenta valores superiores a 6000 mg/L y sólo el 8,3% presenta valor menor a 1000 mg/L de contenido de sulfatos. El sulfato sódico y magnésico es frecuente en los suelos salinos, de solubilidad variable que aumenta con la temperatura y genera toxicidad a las plantas [14].

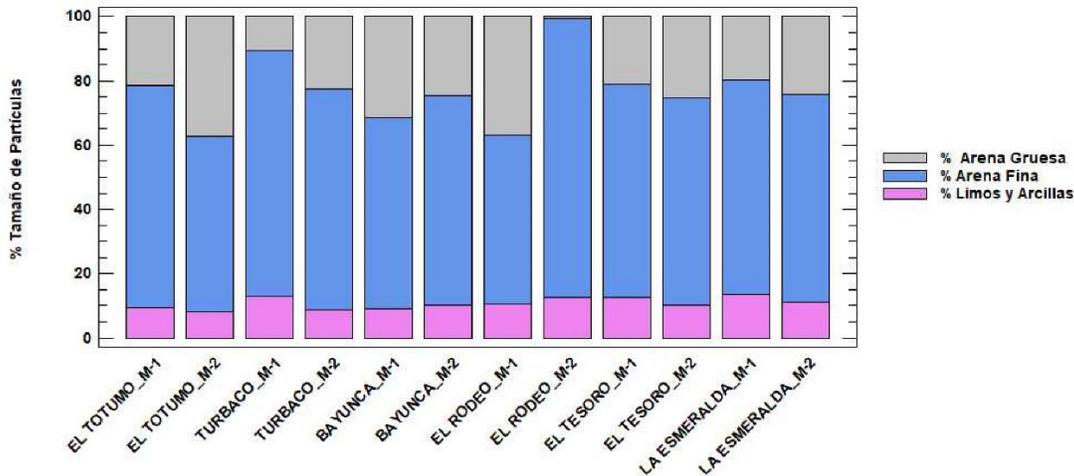


Figura 2. Distribución de tamaño de partículas en las muestras de lodos recuperadas en cada zona de estudio.

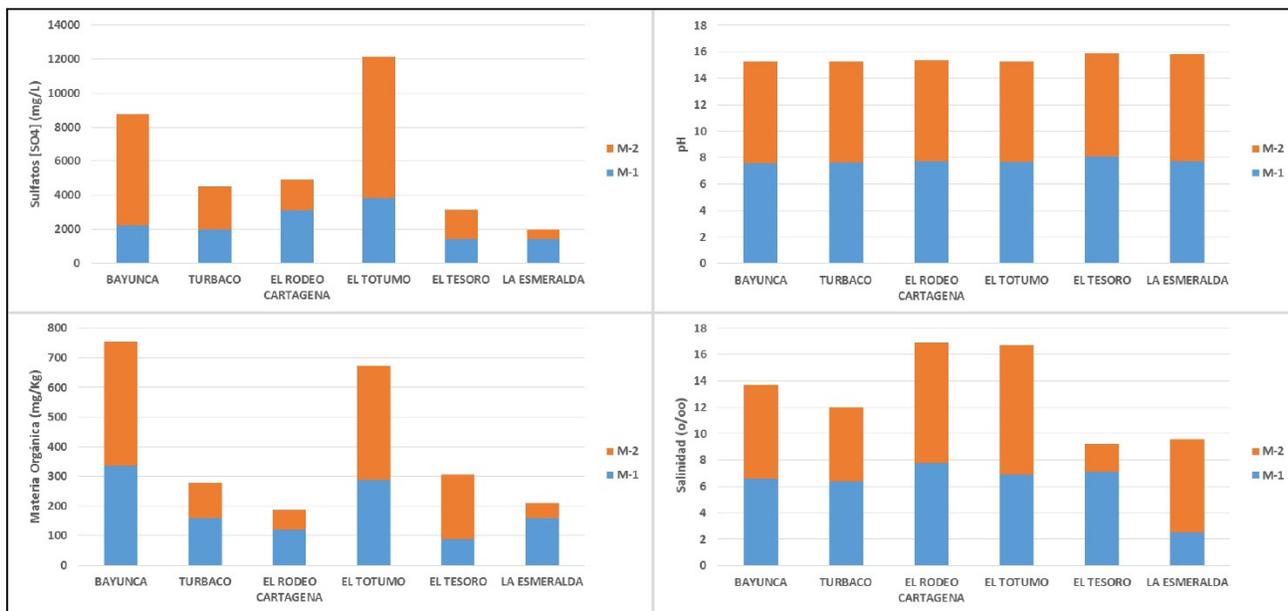


Figura 3. Caracterización química de lodos en las zonas de estudio.

IV. CONCLUSIONES

La parte superior de los volcanes de lodo estudiados, algunos son de morfología plana, suavemente ondulada y cubierta de los flujos de lodo de erupciones pasadas, otros se elevan hasta la plataforma continental. Es característica la presencia de numerosas ventosas con emanación de lodos grises muy

fluidos al igual que gases, igualmente es característico de las partes planas de la parte superior el fuerte carcavamiento y grietas de disecación locales. Los flancos de los domos están asociados a laderas convexas con pendientes entre 15 y 25 grados, donde es igualmente característico el fuerte carcavamiento.

Los lodos son acumulaciones de arcillas y limos arcilloarenosos de color gris oscuro a pardo con bloques embebidos (5 - 80 cm) de arcillolitas, limolitas, areniscas y caliza arrecifal. Su origen está asociado a antiguas erupciones en los “volcanes de lodo” y, en menor proporción, a las emanaciones de lodo que salen por las bocas o ventosas de los mismos. Se presentan principalmente en la parte alta de los domos activos estudiados (El Rodeo, Turbaco, El Totumo, La Esmeralda y El Tesoro) este lodo se emana por las bocas y es muy fluido, los pesos unitarios varían entre 1,4 y 1,7 g/cm³, tal característica de fluidez ha permitido que estos materiales se hayan encauzado por los drenajes naturales y se han acumulado en la base de las laderas del “domo volcánico”.

La información obtenida hasta el momento permite dar las siguientes conclusiones acerca del fenómeno del “vulcanismo de lodo” localizado al sureste de Cartagena: estructuralmente el volcán de lodo está asociado a la Falla de Mamonal, fractura de carácter regional de rumbo y con componente inversa de la cual se desprenden fallas menores que atraviesan y limitan en dirección NE el edificio volcánico, y a las cuales están relacionadas con un alto grado de fracturamiento que facilita la salida de lodos a superficie.

En las zonas estudiadas se evidencia la presencia de coluviones asociados a flujos de lodo encausados por los drenajes naturales hacia la parte norte de los conos volcánicos. La parte alta es normalmente plana con laderas convexas afectadas por fuerte carcavamiento y donde se desarrolla un drenaje radial.

Es evidente que se necesita más conocimiento sobre el comportamiento de los “volcanes de lodo” y las amenazas que puedan generarse del mismo. Las amenazas asociadas al fenómeno del vulcanismo de lodos pueden ser relacionados con los siguientes eventos: extrusión violenta de lodos y caída de bloques, emisión de gases e incendios, ondas de choque y fracturamiento del terreno circundante. Con base en los datos obtenidos hasta el momento sobre el fenómeno, se definen tres zonas con susceptibilidad a la erupción de los volcanes de lodo y caída de bloques. Los límites deben ser considerados como transicionales y susceptibles de ser ajustados en la medida que el conocimiento del fenómeno aumente.

Susceptibilidad alta: zona donde las manifestaciones de emanación de lodos son activas y las erupciones pasadas han dejado remanentes en superficie. Están asociadas particularmente a los centros de emisión evidenciados en una zona cercana a los 150 m alrededor de los mismos. En esta zona hay fracturamiento reciente que permite asumir actividad tectónica.

Susceptibilidad media: zona extendida entre 50 y 400 m a partir del límite exterior de susceptibilidad alta. En esta zona hay evidencia de conductos de lodo en profundidad, asociado al fracturamiento regional del área. Los daños en esta zona se relacionan con la deformación del terreno generada por la probable actividad volcánica de lodos.

Susceptibilidad baja: corresponde a las zonas bajas de ladera y la parte más distal de los coluviones asociados a los domos volcánicos. En estas zonas no se evidencian manaderos ni erupciones volcánicas de lodo. Los daños que se puedan generar por una eventual erupción de lodo se consideran mínimos y están relacionados con problemas menores y locales de estabilidad del terreno.

REFERENCIAS

- [1] Instituto Colombiano de Geología y Minería [INGEOMINAS], *Diagnóstico de la amenaza por vulcanismo de lodos en el sector de la Lorenza El Guineo municipio de Canalete departamento de Córdoba*. Bucaramanga, Colombia, 2001.
- [2] M. M. Chariguin, *Geología general*. Barcelona, España, 1964.
- [3] O. González Morales and A. Rodríguez Madrid, “Estudio Experimental Sobre Diapirismo de Lodo: ‘Relación entre la Materia Orgánica Presente en el lodo y la Altura de los Domos Diapíricos,’” Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2005.
- [4] R. J. Quintero, “Interpretación sísmica de volcanes de lodo en la zona occidental del abanico del delta del río Magdalena, Caribe Colombiano,” Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, 2012.
- [5] F. Ramírez and A. González, “Interpretación sísmica de volcanes de lodo en la zona occidental del abanico del delta del río Magdalena, Caribe Colombiano,” in *Memorias del I simposio suramericano de deslizamientos*, 1989, pp. 174–192.
- [6] G. Bernal Franco, A. C. Agudelo, S. M. López, and J. G. Domínguez, “Textura, Composición y Foraminíferos Bentónicos de los Sedimentos Superficiales en los Bancos de Salmedina, Caribe Colombiano,” *Boletín Científico CCCP*, vol. 12, pp. 95–112, 2005.
- [7] I. Restrepo, G. Ojega, and I. Correa, “Geomorfología de la plataforma somera del departamento de Córdoba, costa caribe colombiana,” *Boletín de Ciencias de la Tierra*, no. 20, pp. 39–52, 2007.
- [8] Instituto Colombiano de Geología y Minería [INGEOMINAS], “Informe de Gestión 2009,” Bogotá, 2010.
- [9] T. Cadavid and A. Rico, “Amenazas geológicas por vulcanismo de lodos para las áreas de Arroyo de piedra y Galerazamba – Departamento de Bolívar,” Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 1992.
- [10] H. Duque Caro, “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, 1984.
- [11] G. Guzmán, “Geología regional del Caribe

- Colombiano. Problemática estratigráfica,” in *Memorias del VI congreso colombiano del petróleo*, 1995, pp. 57–63.
- [12] J. R. Barboza Gudiño, A. Zavala Monsiváis, G. Venegas Rodríguez, and L. D. Barajas Nigoche, “Late Triassic stratigraphy and facies from northeastern Mexico: Tectonic setting and provenance,” *Geosphere*, vol. 6, no. 5, pp. 621–640, 2010.
- [13] C. Crespo Villalaz, *Mecánica de suelos y cimentaciones*, 5a Ed. Monterrey, México, 2004.
- [14] J. Porta, M. López, and C. Roquero, *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. España: S.A. MUNDI-PRENSA LIBROS, 2003.