



**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MORFODINAMICO Y GEOTECNICO DE LAS AMENAZAS GEOLÓGICAS
POTENCIALES DEL SECTOR NOROESTE DE TURBACO (URBANIZACIÓN EL RODEO) DEL AÑO 2005 AL 2018**



**Universidad
de Cartagena**
Fundada en 1827



Acreditación Institucional de Alta Calidad
Resolución 2583 del 26 de febrero de 2014. Ministerio de Educación Nacional



**Facultad de
Ingeniería**
Fundada en 1949

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MORFODINAMICO Y GEOTECNICO DE
LAS AMENAZAS GEOLÓGICAS POTENCIALES DEL SECTOR NOROESTE DE
TURBACO (URBANIZACIÓN EL RODEO) DEL AÑO 2005 AL 2018**

**TABATHA VICTORIA NAVARRO ALMEIDA
ADRIAN EDUARDO ORTEGA MARTINEZ**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL**

CARTAGENA DE INDIAS D. T Y C- OCTUBRE DE 2017



**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MORFODINAMICO Y GEOTECNICO DE
LAS AMENAZAS GEOLÓGICAS POTENCIALES DEL SECTOR NOROESTE DE
TURBACO (URBANIZACIÓN EL RODEO) DEL AÑO 2005 AL 2018**

Autores:

TABATHA VICTORIA NAVARRO ALMEIDA

ADRIAN EDUARDO ORTEGA MARTINEZ

TRABAJO DE GRADO PARA ASPIRAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Ing. GUILLIAM BARBOZA MIRANDA, MSc

Director del proyecto

ANALISIS DE GEOAMENAZAS EN CASCOS URBANOS Y RURALES
Línea de investigación

GEOMAVIT
Grupo de investigación



**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL
CARTAGENA DE INDIAS D. T Y C.**

2017



NOTA DE ACEPTACION

Firma del director
GUILLIAM BARBOZA MIRANDA

Firma del jurado
JAVIER MOUTHON BELLO

Firma del jurado
MODESTO BARRIOS FONTALVO



AGRADECIMIENTOS

DOCENTES

Guilliam Barboza Miranda, M. Sc. Docente de Ingeniería Civil. Director de Tesis de Grado

ASESOR

William Mendez, Ingeniero Civil – Universidad de Cartagena





CONTENIDO

RESUMEN	12
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN	14
1 MARCO REFERENCIAL	17
1.1 ANTECEDENTES	17
1.1.1 Estudios a nivel local:	17
1.2 ESTADO DEL ARTE	19
1.3 MARCO TEÓRICO	23
1.3.1 Placas tectónicas	23
1.3.2 Marco tectónico	25
1.3.3 Proceso Morfodinámico	29
1.3.4 Fallas geológicas	31
1.3.5 Volcanes de Lodo	34
1.3.6 Diapiros	35
1.3.7 Volcanismo de lodo en el caribe	36
1.3.8 Sismicidad	38
1.3.9 Suelos Expansivos	40
1.3.10 Presión expansión	40
1.3.11 ArcGIS	41
2 OBJETIVOS	42
2.1 OBJETIVO GENERAL	42
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	42
3 ALCANCE	43
4 METODOLOGIA	46
4.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	47
4.1.1 Recopilación de información secundaria	47
4.1.2 Recopilación de información primaria	47
4.2 DIAGNOSTICO GENERAL DE LA ZONA	49
4.3 ANALISIS DE LA INFORMACIÓN RECOLECTADA	49



4.3.1	Definición de las amenazas geológicas más importantes e identificación los factores que contribuyen a las amenazas geológicas.	49
4.3.2	Evolución de los factores que influyen en las amenazas presentes en la zona del año 2005 a 2018	49
4.3.3	Análisis retrospectivo de las amenazas geológicas más importantes.	50
4.4	MAPA DE AMENAZAS	52
4.5	POSIBLE ESCENARIO DE RIESGO CONCEPTUAL.....	53
5	RESULTADOS Y ANALISIS	54
5.1	ESTADO GENERAL URBANIZACIÓN EL RODEO	54
5.1.1	Caracterización geológica	56
5.1.2	Caracterización geomorfológica de la zona.....	56
5.1.3	Características geomorfológicas del “volcán de lodo” el rodeo.	59
5.1.4	Características climatológicas generales	60
5.1.5	Características sísmicas de la zona	61
5.2	DEFINICIÓN DE LAS AMENAZAS GEOLÓGICAS MÁS IMPORTANTES E IDENTIFICACIÓN LOS FACTORES QUE CONTRIBUYEN A LAS AMENAZAS GEOLÓGICAS.....	63
5.3	EXPLORACIÓN DE CAMPO Y ANALISIS DEL ESTADO DE LA ZONA.....	65
5.3.1	Componente geológico.....	65
5.3.2	Componente geológico - geotécnico.....	83
5.3.3	Componente social y estructural.....	90
5.3.4	Componente topográfico.....	97
5.3.5	Análisis de los resultados obtenidos en la modelación de la superficie en el ArcGIS.....	105
6	CONCLUSIONES	117
7	LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES.....	120
7.1	LIMITACIONES	120
7.2	RECOMENDACIONES	120
8	BIBLIOGRAFÍA	122
9	ANEXOS	126



9.1	FORMATO DE ENCUESTAS.....	127
9.1.1	Fotografías viviendas El Rodeo Sector 3.....	128
9.2	MAPAS URBANIZACIÓN EL RODEO.....	129

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.	Separación de placas.....	26
Ilustración 2.	convergencia de las placas.....	27
Ilustración 3.	Cizalladura.....	27
Ilustración 4.	Mapa tectónico regional de la esquina norte de Suramérica	29
Ilustración 5	Esquema falla normal	32
Ilustración 6	Esquema falla inversa.....	33
Ilustración 7	esquema de desplazamiento de rumbo	33
Ilustración 8.	domo de sal.....	35
Ilustración 9.	Mapa de localización del “Volcán de Lodo El Rodeo al Sureste de Cartagena de Indias. Nótese la localización de otros “Volcanes de Lodo” en la región (Servicio geologico colombiano, 2013).....	37
Ilustración 10	Ubicación barrio el rodeo	44
Ilustración 11	Zona de estudio.....	44
Ilustración 12	Esquema de la metodología desarrollada en esta evaluación.	46
Ilustración 13.	Esquema del proceso de modelación de la superficie en ArcGIS.	52
Ilustración 22.	área de influencia de diapirismo y suelos expansivos	54
Ilustración 23.	Evidencias de lodo barrio El Rodeo año 2013.....	55
Ilustración 24.	Evidencia de erupción barrio El Rodeo año 2013	55
Ilustración 25.	Mapa geológico Turbaco, Bolivar – Colombia	56
Ilustración 26.	Mapa Geológico del Caribe Central Colombiano.....	57
Ilustración 27.	Vista panorámica hacia el suroeste de la estructura domica del volcán de lodo El Rodeo.	60
Ilustración 28	leyenda de mapa de amenaza.	61
Ilustración 29	características sísmicas del país.....	61



Ilustración 30 leyenda de las condiciones sísmicas	62
Ilustración 31 condiciones sísmicas del municipio de Turbaco	62
Ilustración 32 Centro de emanación de lodos El Rodeo Año 2005	65
Ilustración 33 Fotografía aérea El Rodeo año 2013, zona de lodo indicada con circunferencia amarilla.....	66
Ilustración 34. Fotografías aéreas El Rodeo año 2005, 2009, 2013 y 2018.	67
Ilustración 35. Detalle bocas de lodo El Rodeo zona alta, 2005.....	68
Ilustración 36. Boca de lodo zona alta con escorrentía año 2005.....	69
Ilustración 37 Bocas de lodo año 2013 El Rodeo.....	70
Ilustración 38. Emanaciones y burbujas de gas liberadas por las bocas ubicadas en los domos en El Rodeo, 2018.....	71
Ilustración 39. Bocas de lodo ubicadas en la parte superior tipo O El Rodeo, 2018.	73
Ilustración 40 Bocas de lodo tipo O ubicadas en la parte superior del domo, El Rodeo 2018.	73
Ilustración 41. Detalles de una de las bocas tipo O presentes en la parte SW año 2018.	73
Ilustración 42 Vista de las charcas de lodo formadas por varias bocas tipo O y C en la parte alta de los flujos de lodo 2013.	74
Ilustración 43. Zona alta de los flujos de lodo El rodeo año 2018.....	74
Ilustración 44. desniveles en la zona por estratos de material de lodo en el domo del volcán de lodo de El Rodeo, 2018.....	75
Ilustración 45. Detalles del fracturamiento en líneas negras finas, generado por los procesos eruptivos de lodo de finales del 2012 y comienzos de 2013.	76
Ilustración 46. Hundimiento diferencial zona volcán de lodo, deforestación por quema de vegetación en la zona.	77
Ilustración 47. Grietas y hundimientos de 10 – 50 cm de altura, zona de volcán El Rodeo año 2013.....	78
Ilustración 48. cuencas de tracción año 2013 zona de volcán de lodo El Rodeo.....	78
Ilustración 49. Direccionamiento de fallas y ramas desprendidas de la falla principal (Falla Mamonal), los puntos indicados indican la ubicación de surcos y cárcavas con el direccionamiento paralelo a la falla principal y que se extienden en toda la longitud de la urbanización.	79
Ilustración 50. Zona alta del domo de El Rodeo, presencia del crecimiento de vegetación para el año 2018.....	80



Ilustración 51. Zona alta del domo de El Rodeo, Presencia de contenido de lodo.	80
Ilustración 52 Cárcavas georreferenciadas en el recorrido de campo del domo y sus alrededores en el volcán de lodo de El Rodeo, 2018.	81
Ilustración 53. Alineamiento estructural que controla el drenaje superficial. Dirección N 30° E, predominante, paralela a la Falla de Mamonal 2009.....	82
Ilustración 54. Fotografía de la quema por acción antrópica tomada en febrero de 2018 Volcán El Rodeo.....	83
Ilustración 55. Columna litológica generalizada.	83
Ilustración 56. Modelación geofísica en zonas de volcanes de lodo.	85
Ilustración 57. Mapa de gravedad observada línea 50, modelación geofísica en zonas de volcanismo de lodo.	86
Ilustración 58 Imagen de resistividades realizadas en El Rodeo.	86
Ilustración 59 Sondeo eléctrico realizado, zona usada para la construcción de la via Utb-Variante.	87
Ilustración 60 Abaco de Casagrande muestra 1 ensayo de potencial de expansión.	89
Ilustración 61 Levantamiento de casas del año 2018 sobre imagen aérea de Google Earth del año 2013 de la urbanización El Rodeo, en el mapa el color rojo señala las manzanas que no existían en el año 2013.	93
Ilustración 62 Levantamiento de casas del año 2018 sobre imagen aérea de Google Earth del año 2005 de la urbanización El Rodeo, en el mapa el color rojo señala las manzanas que no existían en el año 2005.	93
Ilustración 64 Total de daños urbanización El Rodeo – Año 2005 y 2018.	96
Ilustración 65 Área evaluada Barrio El Rodeo- Turbaco, Bolívar.....	97
Ilustración 66 Zonificación del área de estudio conforme a las topografías barrio El Rodeo-Turbaco, Bolívar.	98
Ilustración 67 Area extraida para modelar de la topografia del volcan de lodo de El Rodeo año 2005.....	99
Ilustración 68 Area extraida para modelar de la topografia del volcan de lodo de El Rodeo año 2018.....	100
Ilustración 71 Superposición de perfil longitudinal zona 1 año 2018 identificado con color Verde y año 2005 identificado con color rojo, sector del cono volcánico principal de El Rodeo.	101



Ilustración 74 Superposición de perfil transversal zona 1 año 2018 identificado con color morado y año 2005 identificado con color rojo, sector del cono volcánico principal de El Rodeo.	102
Ilustración 75 Trazado de perfiles longitudinal y transversal de la zona 3 vía UTB, tomada de la topografía del año 2013 El Rodeo.	102
Ilustración 76 Trazado de perfiles longitudinal y transversal de la zona 3 vía Utb, tomada de la topografía del año 2018 El Rodeo.	103
Ilustración 79 Superposición de perfil transversal 1 zona 3 año 2018 identificado con color morado y año 2005 identificado con color rojo, sector del cono volcánico principal de El Rodeo.	103
Ilustración 82 Superposición de perfil transversal 1 zona 3 año 2018 identificado con color morado y año 2005 identificado con color rojo, sector del cono volcánico principal de El Rodeo.	104
Ilustración 85 Superposición de perfil longitudinal zona 3 año 2018 identificado con color morado y año 2013 identificado con color verde, sector de la vía UTB.	105
Ilustración 86 Modelación de las pendientes de la zona del volcán de lodo El Rodeo extraído de la topografía 2005, distinguidas por colores en los rangos indicado en la imagen.	106
Ilustración 87 Modelación de las pendientes de la zona del volcán de lodo El Rodeo extraído de la topografía 2018, distinguidas por colores en los rangos indicado en la imagen.	107
Ilustración 88 Superposición de la superficie del año 2005 y 2018 de la zona 1, en la que se refleja la diferencia de altimetría (m) de estas dos topografías.	108
Ilustración 89 Modelación zona 3 El Rodeo Topografía 2013 a través de ArcGIS evaluada en metros.	109
Ilustración 90 Modelación zona 3 El Rodeo Topografía 2018 a través de ArcGIS evaluada en metros.	110
Ilustración 91 Superposición de la superficie del año 2013 y 2018 para la zona 3, en la que se refleja la diferencia de altimetría (m) de estas dos topografías.	111
Ilustración 92 Modelación de las pendientes de la zona de la vía UTB (zona 3), cerca del volcán de lodo El Rodeo extraído de la topografía 2013, distinguidas por colores en los rangos indicado en la imagen.	112
Ilustración 93 Modelación de las pendientes de la zona de la vía UTB (zona 3), cerca del volcán de lodo El Rodeo extraído de la topografía 2018, distinguidas por colores en los rangos indicado en la imagen.	112



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Movimiento de placas tectónicas	28
Tabla 2 Factores de las amenazas contribuyentes y detonantes en El Rodeo.	64
Tabla 3 Composición Química de gases del volcán de lodo de "El Rodeo"	70
Tabla 4 Inventario de bocas ubicación geográfica y tipología de acuerdo con Higgins y Saunders 1974.....	72
Tabla 5 Descripción litologica linea 50, perfil de resistividades.....	84
Tabla 6 Curva SEV 14.	87
Tabla 7 Muestras ensayos de potencial de expansión El Rodeo 2018	89
Tabla 8 Predicción del grado de expansión a partir del índice de plasticidad I. N. V. E.- 126.	89
Tabla 9 Predicción del grado de expansión a partir del límite líquido I. N.V. E -125	90
Tabla 10 Dictamen pericial 2013 El Rodeo	91
Tabla 11 Número de casas por sector y por año El Rodeo.....	92
Tabla 12 Concepto de daños para el levantamiento de viviendas El Rodeo.	94
Tabla 13 Daños de vivienda año 2005 El Rodeo.	95
Tabla 14 Daños de vivienda año 2018	95
Tabla 15 Distinción de la zona por topografías barrio El Rodeo – Turbaco, Bolívar	99



RESUMEN

Los escenarios de amenaza geológica potencial pueden ser una consecuencia de diferentes condiciones naturales que conforme al control y prevención que se lleve se verá el grado de afectación a la comunidad presente. En esta investigación se evalúa el comportamiento de estas amenazas conforme a los diferentes factores que le contribuyen y detonan.

El fenómeno de diapirismo de lodos en la región está relacionado con la convergencia de las placas Caribe-Suramericana y asociado al cinturón del Sinú (Duque, 2008), pero existen zonas que se ven amenazadas no solo por este fenómeno, como el caso de la Urbanización El Rodeo que se ubica entre el municipio de Cartagena y Turbaco, el cual presenta crecimiento de diapiros, suelos expansivos, y yace sobre la falla Mamonal.

Para llevar a cabo esta evaluación se realizó un estado general de la zona y un análisis dividido en componentes utilizando la metodología del Servicio Geológico Colombiano para la evaluación de amenazas geológicas; en el componente Geológico-geotécnico se realizó una exploración de campo donde se denotó una reducción de 60 bocas de lodo en el año 2013 a 28 bocas en el año 2018, ensayos de presión expansión donde los resultados fueron entre 1,5 kg/cm² a 2 kg/cm² que representan suelos de potencial expansivo alto (Ingeominas, 2001). Un levantamiento de daños en el componente social-estructural, donde se observa el ascenso urbanístico y un incremento de daños tipo bajo de un 43% a un 88% para el año 2018.

Se extrajeron perfiles topográficos de diferentes años, donde se observa en la zona más alta del domo un ascenso de altimetría debido al material de lodo y en las zonas más bajas una variación por las intervenciones antrópicas, de igual manera se ve el cambio de pendientes en la superficie a través de la modelación en ArcGIS.

Finalmente, los factores establecidos en esta investigación han evolucionado al modo de hacer emergente un control periódico del comportamiento de los diapiros, el suelo y fallas presentes y una delimitación de las intervenciones antrópicas y el crecimiento urbanístico como medida de prevención a la comunidad.



ABSTRACT

The scenes of potential geological threat can be a consequence of different natural conditions that in conformity in which is carried out the control and prevention, the degree of affectation to the present community will be seen. In this investigation it will be evaluated the behavior of these threats in conformity with the different factors that contribute and detonate.

The phenomenon of mud diapirism in the region that is related to the convergence of the Caribbean - South American plate and related to the belt of the Sinu (Duke, 2008), but there are zones that are not only threatened for this phenomenon, as the case of the Urbanization The Rodeo that is located between the municipality of Cartagena and Turbaco, which presents growth of diapirs, expansive soils, and lies on the fault Mamonal.

To carry out this evaluation it was realized a general state of the zone and an analysis divided in components using the methodology of the Geological Colombian Service for the evaluation of geological threats. In the Geological - geotechnical component a field exploration was realized where there denoted a reduction of 60 mouths at 2005 to 28 Mouths now 2018, essays of pressure expansion where the results were between 1,5 kg/cm² to 2 kg/cm² that represent soils of expansive high potential. A raising of damages in the social - structural component, where it was observed the urban development ascent and an increase of damages of low type from 43 % to 88 % for the year 2018.

There were extracted topographic profiles of different years, where an ascent of altimetry is observed in the highest zone of the dome due to the mud material and in the lowest zones a variation because the antropic interventions , of equal way it is seen the change of slopes in the surface across the modeling in ArcGIS

Finally, the factors established in this investigation have evolved to make emerge a periodic control of the behavior of the diapirs, the soil and present faults and a delimitation of the antropic interventions and the urban development growth as measure of prevention to the community.



INTRODUCCIÓN

Las catástrofes o desastres de origen geológico suceden generalmente porque en muchas poblaciones no se tiene un plan de control y prevención o un plan de riesgo adecuado que contenga las acciones mínimas para evitar las amenazas, es necesario que, dentro de estos planes se contemple la realidad de los posibles riesgos y amenazas geológicas y de las implicaciones que estos pueden tener en la comunidad gracias a su evolución y a las intervenciones en los suelos, así se genera la necesidad de realizar investigaciones acerca de las condiciones geológicas que propagan estas amenazas y exponen a las personas como, los suelos expansivos, crecimiento de diapiros, volcanes de lodos, emanaciones de gases, remoción en masa y sismicidad, entre otras. Y plantear las recomendaciones oportunas o más convenientes para cualquier medida o plan a realizar conforme a el bienestar de las comunidades que habiten cerca o sobre suelos con ese tipo de condiciones y características geológicas.

El fenómeno de diapirismo de lodos, se presenta en el noroccidente colombiano y se extiende desde el Urabá antioqueño hasta el delta actual del río Magdalena, enmarcado dentro de la zona de convergencia de las placas Caribe-Suramericana y asociado al cinturón del Sinú (Duque, 2008). Cartagena de Indias y Turbaco están contenida dentro de esta delimitación espacial, lo que responde a las apariciones de estructuras diapiricas entre estas como domos, bocas y volcanes de lodo, además yacen sobre rocas y suelos muy susceptibles a procesos de inundación, fenómenos de remoción en masa, erosión costera, expansividad en suelos arcillosos y potencial de licuación.

En el barrio de El Rodeo del municipio de Turbaco, están presentes varias de estas condiciones geológicas que dejan en total exposición a la comunidad y que se reflejan en fisuras, grietas y hundimientos en las viviendas, a lo largo del tiempo se han desarrollado estudios como el titulado “Valoración de los niveles de riesgos ambientales en el distrito de Cartagena” y el “Control neotectónico del diapirismo de lodo en la región de Cartagena, Colombia” realizado por el departamento de Geología LAGEMAR en el año 2009 del Instituto de Geociencias, Boa Viagem, Brasil. Donde se revela por tanto, que la formación de los volcanes de lodo, obedece al carácter híbrido de las estructuras secundarias, que



hacen parte de las estructuras neotectónicas del diapirismo de lodo presentes en la región inmersa de Cartagena o Bloque Sinú, debido a los esfuerzos compresivos regionales, asociados a las fallas distensivas; aunque se han realizado diferentes estudios como el anterior mencionado, la expansión urbana y el crecimiento poblacional en la ciudad ha sido un factor casi que descontrolado que agrava directamente los fenómenos geológicos en especial de El Rodeo; es importante resaltar que, uno de los causantes principales de catástrofes es la ausencia de control ante las amenazas y de la evaluación continua de su comportamiento a lo largo del tiempo, así como de los factores que influyen en estas.

Para buscar una forma más sostenible de abordar el problema de la exposición a las amenazas geológicas, en este proyecto se evalúa los factores que influyen en las amenaza y su evolución debido a las intervenciones antrópicas, para que se reconozca la afectación que tiene el crecimiento de la población y de las viviendas en la zona al desarrollo de una catástrofe, además de la incidencia de las características geológico-geotécnicas del área, debido a que la consistencia de los suelos expansivos y suelos licuables es bastante pequeña, además es muy crítica ante recurrencias sísmicas, así mismo para el caso de los volcanes de lodo que al extraer el suelo que se encuentra recubriéndolo este dejará de recibir la presión permitiendo que los flujos de lodo que ascienden, lo hagan con mayor rapidez provocando erupciones violentas.

En aras de evaluar la influencia de los de los factores en las amenazas geológicas, se realizó un estado general de la zona, con las condiciones geológicas, geotécnicas, sociales, climatológicas y sísmicas de la misma, a través de la información secundaria obtenida desde el año 2005 hasta el 2018, conjunto a información primaria como levantamiento de puntos topográficos, fotografías, exploración de campo, encuestas realizadas en la zona y ensayos de expansión de los suelos, así se establecieron los factores contribuyentes y detonantes que llevaron a la zona de estudio a las condiciones actuales, luego con la simulación que se realizó del cambio de la superficie usando las topografías obtenidas y el software ArcGIS, se denotaron los cambios de pendientes y así de la altimetría, también el estado y ubicación de las bocas de lodos, evidencia de lodo y emanaciones, esta información se relacionó con el tipo de intervenciones antrópicas que se han desarrollado



desde el 2005 hasta el 2018, obteniendo así una relación de los factores y los cambios de las amenazas geológicas en El Rodeo, que sirvieron para la generación de un mapa de amenazas geológicas, un escenario de riesgo conceptual y recomendaciones para intervenciones de prevención para los habitantes.

El trabajo presentado es de interés en el gremio de la ingeniería civil y geológica porque respalda y aporta nueva información sobre la evaluación del cambio de algunas condiciones geológicas debido al paso del tiempo y de intervenciones antrópicas, conjunto a las recomendaciones que implican el uso adecuado de los suelos y de estudios pertinentes para su evaluación, esta investigación es asequible porque se fundamentó en información secundaria como estudios geológico-geotécnicos y levantamientos topográficos, conjunto a información primaria como encuestas a las viviendas del barrio, fotografías, exploración de campo, ensayos de expansión de suelos y levantamiento de puntos del nivel de la superficie.

El desarrollo de esta investigación es una base adecuada para un plan de control y prevención de riesgos a las comunidades, en especial a la de El Rodeo y a las autoridades, y para ejercer las acciones pertinentes y necesarias ante las amenazas geológicas presentes. Además, permite el uso de información complementaria para futuros estudios y planes a ejercer en la ciudad, esta investigación debido a su enfoque geológico y a la evaluación de las afectaciones de las condiciones geológicas con respecto a la urbanización fue desarrollada con apoyo del semillero de investigación SIAN (semillero de investigación de amenazas naturales), del grupo de investigación GEOMAVIT que pertenece a línea de análisis de geoamenazas en cascos urbanos y rurales



1 MARCO REFERENCIAL

1.1 ANTECEDENTES

Regionalmente el Distrito de Cartagena se ubica en el llamado Cinturón o terreno del Sinú, el cual se halla limitado hacia el oriente por el lineamiento-falla del Sinú, al occidente por el lineamiento Colombia (limite talud continental y llanura abisal) y por el sur con la falla Dabeiba (Duque, 2008) (SGC, 2008). Debido a esto y a demás condiciones específicas de la zona de estudio (El Rodeo), como la generación diapiros y volcanes de lodos, el potencial de expansión, se han generado condiciones que dejan en total amenaza geológica a los habitantes del sitio trayendo consigo deterioro de sus viviendas y estabilidad. Así, la vista retrospectiva y/o evolutiva de estos riesgos geológicos, que constituye a todas las variables naturales y antrópicas que influyen directamente en la existencia de una amenaza geológica a la población de El Rodeo deja como evidencia la necesidad de planes de prevención y control de desastres de la ciudad de Cartagena.

Con el fin de analizar estos fenómenos, de manera local se han desarrollado diferentes estudios que han permitido describir las condiciones y la geología de la zona, así como estudios nacionales que describen situaciones semejantes, o enfoques de análisis multitemporales acerca de algún fenómeno dado.

1.1.1 Estudios a nivel local:

Existen diferentes estudios desarrollados en el municipio de Turbaco con referencia a la diversidad de los suelos y características geológicas del mismo, elaborados inicialmente como una zona perteneciente de Cartagena de Indias; una de las formas generales en las que se puede describir el riesgo es de acuerdo a distinciones y/o niveles, la zona estudiada prima como un área emergente para ser evaluada puesto que presenta potencial de expansión, licuación y eventualidades sísmicas, así caracterizada través de valoraciones que se hicieron en la formación de algunos cuerpos o formaciones como la Popa, Bayunca



y depósitos como el de Playa (Qmp), marino – aluviales y depósitos de origen marino, en las fallas que atraviesan la ciudad como la Falla Mamonal, los diapiros formados en algunas poblaciones como Bayunca además del vulcanismo activo en Turbaco y especialmente El Rodeo, ha logrado ser identificada y caracterizada con altos niveles de riesgo (Instituto de Hidraulica y Sanitaria Ambiental, 2010).

Pero no solo esta zona ha sido referenciada con amenazas potenciales o con altos niveles de riesgo, en los municipios que yacen sobre el Cintrón del Zinú también se presentan distintas amenazas geológicas potenciales, como es el caso del vulcanismo de lodo en la vereda de Membrillal distrito turístico y cultural de Cartagena de Indias. Membrillal está expuesto y es altamente susceptible a expulsiones y emanaciones volcánicas violentas que pueden afectar la infraestructura y la población de allí y que la explosión se tornaría violenta debido a la concentración de gases. Existen estudios en los que los resultados de sondeos geo-eléctricos en la zona y demás variables geológicas evaluadas para un diagnóstico de riesgo, sustentan la necesidad de analizar zonas de crecimiento de diapiros y presencia de volcanes de lodos por el riesgo potencial que representan a la comunidad, así como la medida de accionar a la misma y a los entes gubernamentales para la prevención de desastres (Bautista Manga & Rada Lopez, 2015).

En la región, El Rodeo y Membrillal no son las únicas zonas en presentar amenazas geológicas puesto a que existen otras problemáticas dadas a las mismas estructuras y características geológicas, de manera paralela la bahía de Cartagena no logra expulsar los sedimentos del sistema, esto se debe a aspectos geomorfológicos relacionados especialmente con el diapirismo de lodo en el Caribe, fenómeno natural activo en la región, con un análisis histórico de la evolución del delta del río Magdalena y una recopilación de datos que describen de manera general las condiciones de sismicidad de la región Caribe se genera un diagnóstico de todas las unidades de origen erosivo como las superficies de erosión, sistema de colinas, depósitos, las zonas activas e inactivas de vulcanismo y finalmente un diagnóstico de la evolución de estos fenómenos en la zona, que están ligadas directamente por la geomorfología de la región (Universidad Nacional de Colombia, 2007).



Todos estudios hacen en conjunto una relación directa entre las condiciones geológicas y las amenazas geológicas potenciales, ya que estas amenazas dejan en total exposición a la comunidad, pero ¿por qué es necesario relacionar todos estos estudios a lo largo del tiempo?, existe un factor primordial para generar este tipo de amenaza y es la población que en el tiempo el grado de urbanización ha ido creciendo, por eso todos estos estudios que con contenido y resultados bastante significativos para el conocimiento y caracterización de la zona, necesitan integrar la evolución de los factores que inciden en las amenazas mismas y denotar los cambios que traen estos en el estado de las amenazas actualmente.

1.2 ESTADO DEL ARTE

Internacionalmente se han realizado estudios acerca del diapirismo y la evaluación de este con respecto a su origen, uno de los principales controles que se tienen en relación a este fenómeno está ligado al neotectónico (LAGEMAR - Universidad Federal Fluminense, 2009); donde se revela por tanto, que la formación de los volcanes de lodo con exudaciones de gas, obedece al carácter híbrido de las estructuras secundarias, que hacen parte de las estructuras neotectónicas del diapirismo de lodo presentes en la región inmersa de Cartagena o Bloque Sinú, debido a los esfuerzos compresivos regionales, asociados a las fallas distensivas, que son estructuras en las que predominan fallas normales orientadas, producidas por la traslación consecuente de dirección ENE-WSW, entre las placas del caribe y de América del Sur.

Estas características geológicas que describen vulcanismo de lodos a causa de diapirismo de lodo y fallas, también están presentes en las Sierras Marginales (Santolaria & Casas, 2013), se describe la geomorfología de la zona como causa primaria del diapirismo y centra el estudio en el dominio de las Sierras Marginales las cuales presentan una mayor densidad de estructuras que incluye cabalgamientos, retrocabalgamientos, fallas de desgarre, relevos, y estructuras diapíricas. En un estudio desarrollado por Santolaria y Casas, se caracterizó la estructura del sector occidental de las Sierras Marginales con el fin de



establecer un modelo cinemático basado en la relación tectónica-sedimentación, definiendo así los posibles factores desencadenantes de este estilo deformacional, a través de una cartografía geológica.

Estas referencias acerca de las descripciones tectónicas de las zonas traen de manera concluyente la idea de, la presencia de volcanes de lodos y/o domos conforme y consecuentemente al comportamiento de las placas y al crecimiento de cuerpos o diapiros a raíz de estos, y hacen parte de los análisis evolutivos de los fenómenos de vulcanismo, así como la eventualidad sísmica y fallas generales.

Dentro de un marco global acerca de los volcanes de lodos, estos dependiendo de su causalidad pueden presentarse en diferentes sitios o suelos, así da razón a la existencia de muchos volcanes de lodos o domos en el mundo; estos han sido estudiados extensivamente por geólogos y demás relacionados a este campo, explorando en busca de hidrocarburos y también al interés reciente de estimar que los volcanes de lodos introducen gases invernaderos en la atmósfera, además el reconocimiento general de los volcanes de lodos como amenaza geológica (Soto & A.R Talukder, 2004).

Azerbaijan cuenta con cerca de 400 volcanes de lodo, cifra que representa la mitad de todos los que hay en el planeta. Por lo general se trata de volcanes de un tamaño pequeño que emiten barro frío, agua y gas casi de continuo. Algunos de los más grandes volcanes de este tipo en Azerbaijan son Turaghai y Boyuk Khanizadagh. No suponen ningún riesgo aunque se calcula que cada veinte años más o menos, un volcán de lodo puede explotar con gran fuerza, disparando llamas cientos de metros hacia el cielo, y depositando toneladas de lodo en la zona circundante (GeoJames, 2013). Los volcanes de barro son uno de los signos visibles de la presencia de las reservas de gas y petróleo bajo la tierra y el mar en la región del Caspio.

El Boyuk Khanizadagh en Azerbaiyán que tiene un diámetro de 10km. El 10 de octubre de 2001, estalló y disparó llamas a 300 metros en el aire, la altura de llama más alta registrada de una erupción de volcán de barro, la formación de este volcán de barro está estrechamente ligada a la "formación de escudos" de volcanes ígneos (Azerbaijan international, 2013).



Las observaciones realizadas indican que el vulcanismo de lodo en Azerbaiyán ha sido resultado de una combinación de diferentes factores, tales como la rápida sedimentación que se dio, la aparición de compresión tectónica y la presencia de la espesa y sobre presionada Serie Maikop sedimentos ricos en materia orgánica enterrada, que ha sido sometidos la maduración de hidrocarburos y de desgasificación (Bonini, 25 August 2010).

Sin embargo, cuando se habla de amenazas geológicas incluye una gran cantidad de situaciones y/o condiciones que la desarrollan, como el fenómeno de licuefacción, este tiene una gran responsabilidad en tanto a desplazamientos de obras dado al material sobre el que yacen ya que, este representa el aumento progresivo de la presión del agua dentro de los suelos granulares, bajo la acción sísmica, de manera que el esfuerzo efectivo se reduce eventualmente a cero y el depósito se comporta como un líquido haciendo que el comportamiento de elementos estructurales como las pilas, su análisis y diseño conformen uno de los problemas geotécnicos más sofisticados (Ahmed Mokhtar, 2014), Ahmed Mokhtar a través de un estudio evaluó la interacción sísmica de las pilas considerando las condiciones de sumergimiento del suelo, el diámetro de la pila, la longitud, la magnitud del terremoto y la duración. Este proyecto utilizo un modelo numérico avanzado para simular el sofisticado problema de la interacción sísmica mutua entre la formación de arena suelta licuable y las pilas y tiene como resultado que, el desplazamiento lateral de la pila debido a la excitación sísmica es relativamente alto debido a la baja resistencia lateral de la formación de arena suelta licuable superior y que el desplazamiento lateral es directamente proporcional a la aceleración máxima de la base (es decir, la energía asociada al terremoto), en un comportamiento no lineal para pilas flexibles y rígidas. Lo que equivale a que los suelos licuables representan un grado de rigurosidad bastante alto al momento de construir sobre ellos, acciones que no se han tenido en cuenta en el caso de la Urbanización el Rodeo que yace sobre suelos que presentan este tipo de características geológicas.

Existen otras condiciones que generan amenazas geológicas, como los suelos expansivos, el comportamiento de estos depende de ciertos factores como las condiciones estratigráficas y las propiedades intrínsecas del suelo, además de las condiciones ambientales. se presenta una investigación realizada para la caracterización geológica y



geotécnica del subsuelo y la evaluación de riesgos geotécnicos en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez - Chiapas, en la que se aplican métodos directos e indirectos para identificar, clasificar y determinar el potencial y la presión de expansión de las arcillas. Este proyecto dio como resultado mapas de riesgo a causa de la expansión de los suelos y la proposición del uso de geomaterial estabilizado, producto de la mezcla expansiva y materiales calcáreos para la disminución de expansión unitaria del 25% al 75% de acuerdo a sus resultados (Ordóñez, Auvinet Guichard, & Juarez Camarera, 2014).

Finalmente se reconoce la influencia directa de la caracterización geológica, fallas, sismicidad, licuación, potencial de expansión, diapiros, volcanes de lodo con respecto a las amenazas geológicas. Como se mencionó anteriormente en los diferentes estudios internacionales estos fenómenos pueden ser dados de acuerdo a las estructuras geológicas que se crean por la interacción entre las placas tectónicas y las características naturales de los suelos, además de las condiciones ambientales donde se presenten los mismos, haciendo inminente una amenaza geológica que debe ser reconocida y evaluada a lo largo de su desarrollo, bajo los parámetros geográficos, geológicos y geotécnicos que lo limitan y componen.



1.3 MARCO TEÓRICO

1.3.1 Placas tectónicas

Las placas tectónicas o placas litosféricas son planchas rígidas de roca sólida flotando sobre una capa semifluida (astenosfera). La litosfera o el conjunto de placas que forman la litosfera flotando sobre la astenosfera, son las placas tectónicas. Cada placa de la litosfera que flota sobre la astenosfera es una placa tectónica diferente.

Existe un puñado de placas principales y secundarias. Seis de las principales reciben el nombre del continente en el que se encuentran, como la Placa Norteamericana, la Placa Africana o la Placa Antártica. Las placas secundarias son más pequeñas, pero no menos importantes en cuanto a su influencia sobre la estructura del planeta. La pequeña placa Juan de Fuca, por ejemplo, es responsable de los volcanes presentes en la región del Pacífico Noroeste de Estados Unidos.

Las placas conforman la litosfera, la capa superficial de la Tierra (incluye la corteza y la parte superior del manto). Las corrientes de las rocas más blandas que tienen debajo las impulsan como si se tratara de una cinta transportadora en mal estado. La actividad geológica proviene de la interacción de las placas cuando éstas se acercan o separan.

El movimiento de las placas crea tres tipos de límites tectónicos: límites convergentes, donde las placas se acercan unas a otras, límites divergentes, donde se separan, y límites transformantes, donde las placas se mueven de lado en relación unas con otras (National Geographic, 2011).

El movimiento de las placas lo estudia la llamada Tectónica de Placas, el problema es que este movimiento muchas veces es impredecible. Pero algo se sabe y es como se pueden mover.



Tipos de Movimientos de las Placas Tectónicas:

1.3.1.1 Movimientos convergentes

Cuando las placas colisionan, la corteza se curva formando las cordilleras. India y Asia impactaron hace 55 millones de años, provocando la lenta formación del Himalaya, el sistema montañoso más alto del planeta. Mientras el choque continúa, las montañas se elevan cada vez más. Por ejemplo, el monte Everest, el pico más alto de la Tierra, podría ser mañana un poquito más alto que hoy.

Estos límites convergentes también tienen lugar cuando una placa oceánica se hunde bajo la placa continental en un proceso llamado subducción. Cuando la placa superior se eleva, también se forman sistemas montañosos. Además, la placa inferior se derrite y a menudo sale a borbotones a través de erupciones volcánicas como las que formaron algunas de las montañas de los Andes en Sudamérica.

Al hundirse una placa bajo otra, se suelen formar zanjas como la Fosa de las Marianas, en el océano Pacífico Norte, el punto más profundo de la Tierra. Este tipo de colisiones también provocan la formación de volcanes submarinos que pueden transformarse en arcos insulares como Japón.

1.3.1.2 Movimientos divergentes

En los límites divergentes de los océanos el magma surge en la superficie desde las profundidades del manto de la Tierra, separando dos o más placas y renovando el fondo oceánico. Así, montañas y volcanes se elevan por esta grieta. Una única dorsal oceánica (elevación submarina) conecta los océanos, convirtiéndola en el sistema montañoso más largo del mundo.

Profundas depresiones como el Gran Valle del Rift se forman en tierra donde se separan las placas. Si éstas continúan dividiéndose, en millones de años la región oriental de África se separará del continente formando una nueva masa continental. Así, una dorsal marcaría la separación entre las placas.



1.3.1.3 Movimientos transformantes

La Falla de San Andrés es un ejemplo de límite transformante, en el que dos placas friccionan la una con la otra a lo largo de fallas de desgarre. Estos límites no crean espectaculares fenómenos como montañas u océanos, sin embargo, pueden provocar terremotos como el de 1906 que asoló la ciudad de San Francisco (National Geographic, 2011).

1.3.2 Marco tectónico

La teoría de las placas tectónicas dice que la litosfera está conformada por placas rígidas denominadas placas tectónicas o placas litosféricas una especie de mezcla de casquetes esféricos, de naturaleza rocosa y frágil comportamiento. Las cuales tienen un gran espesor que se desplazan causando grandes e importantes fenómenos geológico en el planeta. Una de las características de las placas es su dinámica o movimiento, permitiendo así que el tamaño de los continentes y océanos cambie constantemente igualmente creando cadenas montañosas y volcanes. Una Gran parte de la superficie del planeta 94% está ocupada por el conjunto que forman siete grandes placas litosféricas: Euroasiática, Pacífica, Norteamericana, Sudamericana, Africana, Indoaustraliana y Antártica, el resto de la superficie está ocupada por placas más pequeñas como: Las de Nazca, Cocos y Filipinas, en el océano pacífico y las placas Caribe, Iraniana, arábiga y solaní (Moratalla, 2008). La litosfera se divide alrededor de 20 placas y existen dos tipos conforme a su ubicación:

- ✓ Placas oceánicas, placas de litosfera oceánica solamente.
- ✓ Placas Continentales-Oceánicas; placas de litosfera continental y oceánica.

Una gran parte de los fenómenos y actividades geológicas ocurren en los bordes de las placas, producto de los choques de estas ocasionando sismos o zonas volcánicas. Las placas tectónicas tienen tres tipos de movimientos, el de separación o divergencia, de



convergencia o acercamiento, y cizalla (deslizamiento lateral) o tres tipos de límites convergente, divergente y transcurrentes.

El movimiento de separación o de expansión del fondo oceánico que ocurre cuando dos placas se mueven en dirección opuesta formando así nueva litosfera como lo muestra la ilustración 1 ; el límite de las placas que se separa es, un borde constructivo o de acreción de placa, que consiste en la adición de depósitos sedimentarios o irregularidades topográficas que se unen a la placa oceánica o continental. El crecimiento de las placas o de la litosfera se presenta en las dorsales que se extienden en los fondos oceánicos, las dorsales son límites constructivos de las placas por donde el material nuevo, lava o magma asciende y se extiende a los lados de las hendiduras o riffs.

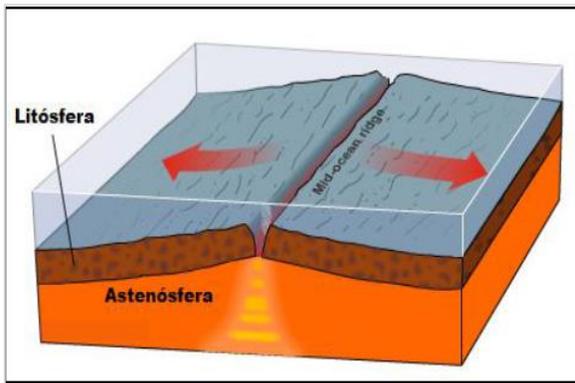


Ilustración 1. Separación de placas

Fuente: BIOGEO 4 ESO

Los movimientos de convergencia, destrucción o comportamiento de cabalgamiento donde la placa más densa y pesada que se desliza (Subduce) debajo de la más liviana consumiéndose en el manto, y la placa más liviana se coloca sobre la otra (Cabalgamiento) como lo muestra la ilustración 2. En este movimiento los límites de estas placas son destruidos y se encuentran ligados a una gran actividad sísmica, volcánica y formación de cordilleras. Existen tres tipos de límites convergentes:

- ✓ Convergencia de dos placas de litósfera oceánica
- ✓ Convergencia entre una placa de litosfera oceánica y litosfera continental.
- ✓ Convergencia de dos placas de litósfera continental.

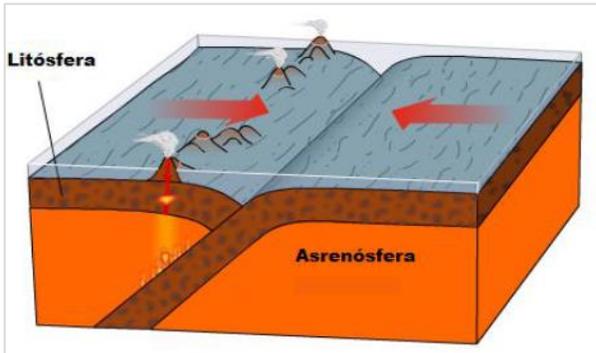


Ilustración 2.convergencia de las placas

Fuente: BIOGEO 4 ESO

Movimiento de cizalla o deslizamiento lateral u horizontal de sentido opuesto de placas que no origina nueva litosfera, ni la destruye, estas áreas también se llaman bordes pasivos o transformantes donde se producen sismicidad moderada creando una zona de alta presión formando rajaduras o fracturas de la corteza como lo muestra la ilustración 3.

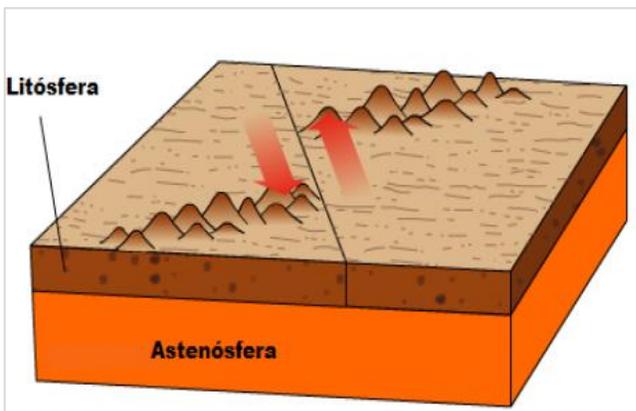


Ilustración 3. Cizalladura

Fuente: BIOGEO 4 ESO

1.3.2.1 Tectónicas en el Caribe

Acorde con el Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias (2001), los desplazamientos de las placas tectónicas originan diferentes fenómenos como los de comprensión y cizallamiento que dan como resultado en la



subducción de las placas Nazca y del Caribe bajo la placa Sudamericana formando la cadena del caribe o cinturones del Caribe. Además, este proceso tectónico da origen a las características morfológicas y sedimentológicas del área de Cartagena.

La Costa Caribe Colombiana se localizan un punto de triple acción interplacal, caracterizado por la subducción de corteza oceánica debajo de corteza continental, donde las placas Caribe y Nazca, se encuentran con la placa Suramericana con diferentes direcciones y velocidades además de estar afectada por las placas Cocos y del Pacifico (Aristizabal, 2009).

En la Tabla 1 suministrada por el plan de ordenamiento territorial de la ciudad de Cartagena de Indias se muestra la dirección y movimiento por año de las placas que afectan la región de Cartagena.

MOVIMIENTO DE LAS PLACAS TECTONICAS.			
PLACA	DIRECCION *	INGEOMINAS (1997)	JORDAN (1975); MINSTER ET JORDAN (1978); EN VERNETTE (1986)
Suramericana	Del E al O	6 cm / año	cm / año
Del Caribe	ESE **	1 a 2 cm / año	
De Nazca	ENE **	6 a 8 cm / año	6.3 cm / año
FUENTE: * Ingeominas (1997) ** Respecto a la Placa Suramericana			

Tabla 1. Movimiento de placas tectónicas

Fuente: (POT Cartagena, 2001-2005)

La zona de estudio se encuentra ubicada en la parte superior de la placa suramericana que colinda con la placa nazca y la placa caribe como lo indica la ilustración 4.

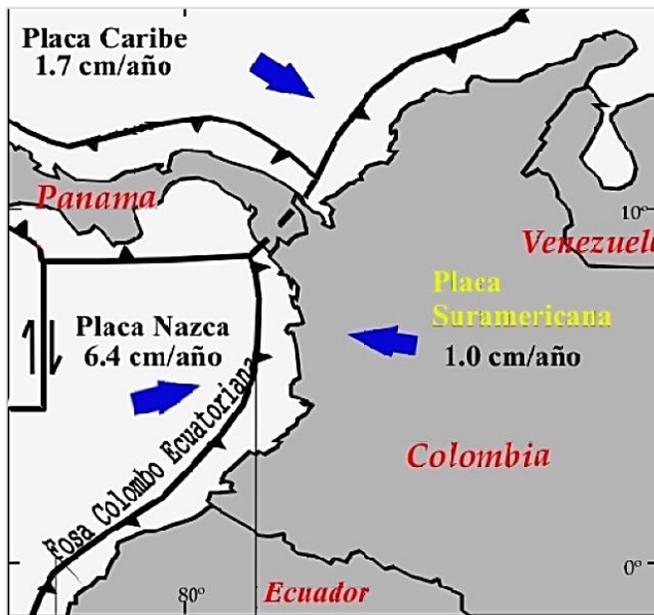


Ilustración 4. Mapa tectónico regional de la esquina norte de Suramérica

Fuente: Estudios e investigaciones de las obras de restauración ambiental y de navegación del Canal del Dique 2008.

1.3.3 Proceso Morfodinámico

Los procesos morfodinámicos corresponden a una serie de acciones sucesivas y/o simultáneas en la que participan varios agentes a través de las cuales los agentes morfogenéticos, principalmente los externos, son capaces de modelar las formas de la superficie terrestre. Los procesos morfodinámicos están asociados a una secuencia conformada por la erosión de las rocas, el transporte de los materiales removidos y la sedimentación de dichos detritos. En consecuencia, los procesos morfodinámicos dependen de una serie de factores externos relacionados con la energía del agente morfogenético y la posición geomorfológica y de factores internos tales como la composición mineralógica de las rocas, su textura y grado de cohesión (Universidad Católica de Chile- Instituto de Geografía, s.f.).



Los terminos usados en esta evaluación están relacionados con la forma y generación del relieve terrestre, así como el comportamiento del mismo y los factores que se asocia los comportamientos, tales como:

- **Morfodinámica**

Factores que generan la actividad modeladora del relieve terrestre, tanto externos como internos.

- **Morfogenético**

Factores que intervienen en la generación de las formas del relieve terrestre.

- **Factores contribuyentes**

Son aquellos que intrínsecamente forman parte de las propiedades y comportamiento del medio o que alteran las características de este. Estos factores son la Geología, Geomorfología Uso del suelo, Excavaciones, Deforestación, etc.

- **Factores detonantes**

Son los que inducen, desde el exterior, hacia un comportamiento activo de las masas de roca o suelo. Estos factores son la Intensidad de los sismos y la Intensidad de las lluvias.

- **Riesgo**

Es la probabilidad latente de que ocurra un hecho que produzca ciertos efectos, la combinación de la probabilidad de la ocurrencia de un evento y la magnitud del impacto que puede causar, así mismo es la incertidumbre frente a la ocurrencia de eventos y situaciones que afecten los beneficios de una actividad

- **Amenaza**

Potencial ocurrencia de un hecho que pueda manifestarse en un lugar específico, con una duración e intensidad determinadas, Se puede considerar que es la materialización del riesgo (E.P.N, s.f.).



1.3.4 Fallas geológicas

Las amenazas geológicas también tienen un constituyente que provocan los levantamientos - hundimientos de terrenos. Pueden ser graduales o súbitos, y relacionarse directamente con agrietamientos y fallas en rocas superiores y/o circundantes a los domos; En geología, una falla es una fractura o zona de fracturas a lo largo de la cual ha ocurrido un desplazamiento relativo de los bloques paralelos a la fractura, esencialmente una falla es una discontinuidad que se forma debido a la fractura de grandes bloques de rocas en la Tierra cuando las fuerzas tectónicas superan la resistencia de las rocas. El movimiento causante de esa dislocación puede tener diversas direcciones: vertical, horizontal o una combinación de ambas. El desplazamiento de las masas montañosas que se han elevado como consecuencia del movimiento provocado por fallas, puede ser de miles de metros como resultado de los procesos devenidos durante largos períodos de tiempo. La zona de ruptura tiene una superficie generalmente bien definida denominada plano de falla y su formación va acompañada de un deslizamiento tangencial de las rocas respecto a ese plano (Bates, 1987).

1.3.4.1 Clasificación de fallas de acuerdo a su movimiento

Si bien hay varios tipos de fallas, se puede decir que existen tres tipos de fallas principales, según sea la dirección del desplazamiento de las rocas que cortan. No hay una regla fija sobre qué escala de tiempo geológico se debe considerar la actividad de una falla, en particular, el WSSPC (Western States Seismic Policy Council) INSTITUTO NACIONAL DE PREVENCIÓN SÍSMICA –INPRES- 2 consorcios de científicos estatales y privados del oeste de EEUU, define tres clases de fallas activas:

1. Falla activa del Holoceno: una falla que se ha movido en los últimos 10.000 años.
2. Falla activa del Cuaternario tardío: una falla que se ha movido en los últimos 130.000 años.
3. Falla activa del Cuaternario: una falla que se ha movido en los últimos 1.600.000 años.



1.3.4.2 Clasificación de fallas de acuerdo con su movimiento

Si bien hay varios tipos de fallas, se puede decir que existen tres tipos de fallas principales, según sea la dirección del desplazamiento de las rocas que cortan:

Falla normal:

Este tipo de fallas se generan por tensión horizontal. Las fuerzas inducidas en la roca son perpendiculares al acimut de la falla (línea de ruptura superficial), y el movimiento es predominantemente vertical respecto al plano de falla, el cual típicamente tiene un ángulo de 60 grados respecto a la horizontal. El bloque que se encuentra por encima del plano de la falla se denomina techo, y se desliza hacia abajo; mientras que el bloque que se encuentra por debajo del plano de la falla se denomina piso, y asciende como lo muestra la ilustración 5.

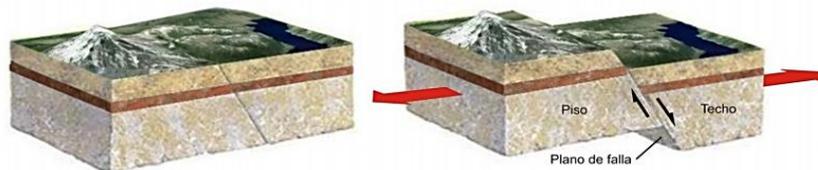


Ilustración 5 Esquema falla normal

Fuente: (INPRES, 2013)

Falla inversa:

Este tipo de fallas se genera por compresión horizontal. El movimiento es preferentemente horizontal y el plano de falla tiene típicamente un ángulo de 30 grados respecto a la horizontal. El bloque de techo se encuentra sobre el bloque de piso. Cuando las fallas inversas presentan un buzamiento (inclinación) inferior a 45°, éstas también toman el nombre de cabalgamiento (ilustración 6).

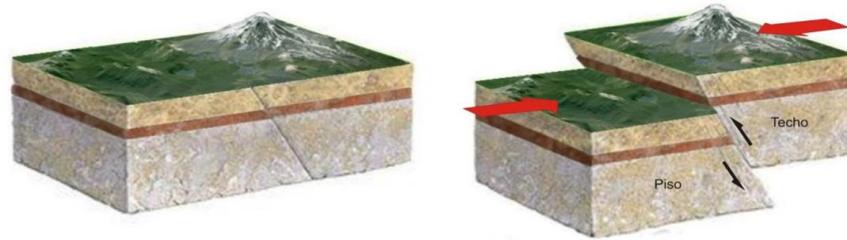


Ilustración 6 Esquema falla inversa

Fuente: (INPRES, 2013)

Falla de desgarre o de desplazamiento de rumbo:

Estas fallas se desarrollan a lo largo de planos verticales y el movimiento de los bloques es horizontal, son típicas de límites transformantes de placas tectónicas. Se distinguen dos tipos de fallas de desgarre: laterales derechas y laterales izquierdas. Laterales derechas o dextrales, son aquellas en donde el movimiento relativo de los bloques es hacia la derecha; mientras que en las laterales izquierdas o siniéstrales (ilustración 7), el movimiento es opuesto a las anteriores. También se las conoce como fallas transversales (Instituto nacional de prevención sísmica –INPRES, 2017).



Ilustración 7 esquema de desplazamiento de rumbo

Fuente: (INPRES, 2013).

La existencia de volcanes de lodo en un área determinada evidencia la presencia de mecanismos activos de deformación, producidos por el efecto de procesos tectónicos que inciden en el desarrollo de estas geoformas (Berndt, 2007).



1.3.5 Volcanes de Lodo

Un volcán de lodo es una formación creada por los gases y líquidos geo-excretados, y el proceso de su formación puede variar ligeramente. Este tipo de volcán por lo general se encuentra en las zonas de subducción en todo el mundo, y muchos han sido reconocidos. La mayor parte de los gases que se liberan de un volcán de lodo son metano, a pesar de que también liberan cantidades mucho más pequeñas de nitrógeno y dióxido de carbono. Generalmente las eyecciones de estos volcanes serán sólidos finos, suspendidos en líquidos que pueden incluir agua ácida.

1.3.5.1 Estructura.

Como se mencionó anteriormente, es más probable encontrar un volcán de lodo cerca de una zona de subducción, pero también son comunes cerca de los depósitos de petróleo. También es posible encontrarlos cerca de otros tipos de volcanes. Este tipo de volcán tiene una forma similar a otros tipos de volcanes y contiene varios conos.

Un volcán de lodo también puede contener conos de ceniza, que se forman cuando el barro se calienta durante los incendios. En general, estos volcanes no crecen tan grandes como otros tipos de volcanes.

1.3.5.2 Emisiones.

Cuando un volcán de lodo entra en erupción, el principal gas que emite es generalmente metano, pero en los casos en que están situados cerca de otros volcanes por lo general desprenden gases incombustibles, tales como el helio. Aunque la mayor parte del material se emite durante las erupciones, algunos se filtran, incluso cuando el volcán está inactivo.

1.3.5.3 Formación.

Existen varios modelos diferentes para la formación de un volcán de lodo, pero la más fácil de entender es la siguiente. El proceso comienza cuando se produce una



descompactación (lo contrario de compactación) que crea los gases a altas velocidades. Los gases hacen que el barro adquiera una forma boyante, el lodo sale de la estructura a través de rejillas de ventilación o fracturas, y toma algo del gas para aliviar la presión (Volcanpedia, s.f.).

1.3.6 Diapiros

Un diapiro es un cuerpo de roca que se ha movido hacia arriba atravesando y desplazando las rocas suprayacentes. La palabra deriva del vocablo griego diaperein, que significa perforar. La ascensión de tales cuerpos de roca tiene una causa gravitatoria: la menor densidad de las rocas que ascienden, en relación con la densidad de las rocas atravesadas, les confiere una fuerza ascensional. Para que la ascensión se produzca se necesita, además de una menor densidad, que proporciona la fuerza, la existencia de rocas suficientemente dúctiles como para poder fluir y la posibilidad de que las rocas superiores o suprayacentes puedan hacer sitio a la masa ascendente deformándose. Los diapiros más comunes son los de evaporitas, rocas formadas por concentraciones excesivas de sales como cloruros, sulfatos o nitratos, que precipitan formando capas de espesor a veces considerable (ilustración 8).

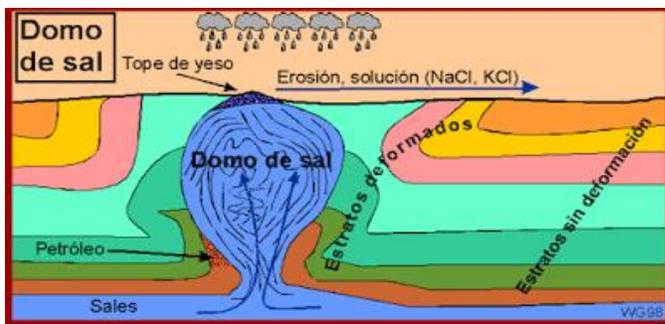


Ilustración 8. domo de sal

Fuente: (*Geología Estructural*, 2016).

También son comunes los diapiros de arcilla y barro, materiales muy plásticos y poco densos cuando están empapados de agua. Estos y los salinos son característicos de



depósitos sedimentarios en la parte superior de la corteza terrestre, a profundidades menores de 15 km en general.

Así mismo, Las geoformas tales como domos, colinas e islas, localizadas en el borde occidental del Caribe Colombiano deben su origen, tanto a los levantamientos diferenciales del terreno generados por el efecto transpresivo continental de las placas Caribe y suramericana, favorecido por fenómeno del diapirismo de lodo, el cual facilita los procesos de deformación y movimiento de materiales en profundidad. Acorde con Carvajal y Otros (Carvajal, 2013), los “Volcanes de Lodo” son “cerros de morfología colinada con laderas convexas y cima plana o en artesa, formados, tanto por la acumulación de lodos producto de erupciones anteriores, como por la deformación del terreno, generada por el empuje vertical de los materiales confinados en profundidad, y disparados, ya sea por uno o varios de los siguientes factores: compresión tectónica, alto contenido de gases o por la diferencia de densidades entre los materiales confinados en profundidad y la cobertera sedimentaria superior más densa”.

1.3.7 Volcanismo de lodo en el caribe

La región del Caribe Colombiano se caracteriza por dos grandes zonas geológicamente diferentes: Una región estable o de plataforma y una región inestable. La región de plataforma involucra los terrenos planos y cenagosos del valle inferior del Río Magdalena, constituida por una corteza continental no plegada, alterada por una zona tectónica de bloques que definen altos y depresiones en profundidad.

Hacia el occidente y limitada por el lineamiento de la falla de Romeral, se encuentra la región inestable o geosinclinal la cual está constituida por dos elementos estructurales mayores llamados Cinturón fragmentado de San Jacinto y Cinturón del Sinú producto de la convergencia de las placas del Caribe y la margen noroeste de la placa Suramericana. Estos dos elementos estructurales corresponden a dos prismas de acrecimiento producto de la interacción convergente de las placas Caribe y suramericana que empezó en el Eoceno - Oligoceno hace aproximadamente 36 millones de años (Pelgrain, 2007).



1.3.7.1 Localización de volcanes de lodo en la costa caribe

Según informes de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá 2008 la mayor concentración de volcanes de lodo se encuentra en Córdoba en la ciudad de Montería y al Noroccidente de Antioquia, son 47 sitios identificados hasta la fecha, luego sigue la Ciudad de Cartagena con 20 lugares distribuidos en la región de Bayunca- Arroyo Piedra, Galerazamba, en Turbaco, en Santa Catalina, al Noreste de Clemencia, en Cañaveral, en Flamenco y loma Bonita al sur del canal del Dique, y al Suroccidente dela ciudad de Cartagena como los de Membrillal. También se conocen concentraciones de volcanes submarinos frente a la comunidad de Damaquiel en octubre de 1992 y frente a Punta Canoas, también se encuentra cercano a la ciudad de Cartagena el Volcan de lodo de El Rodeo (Ilustración 9).

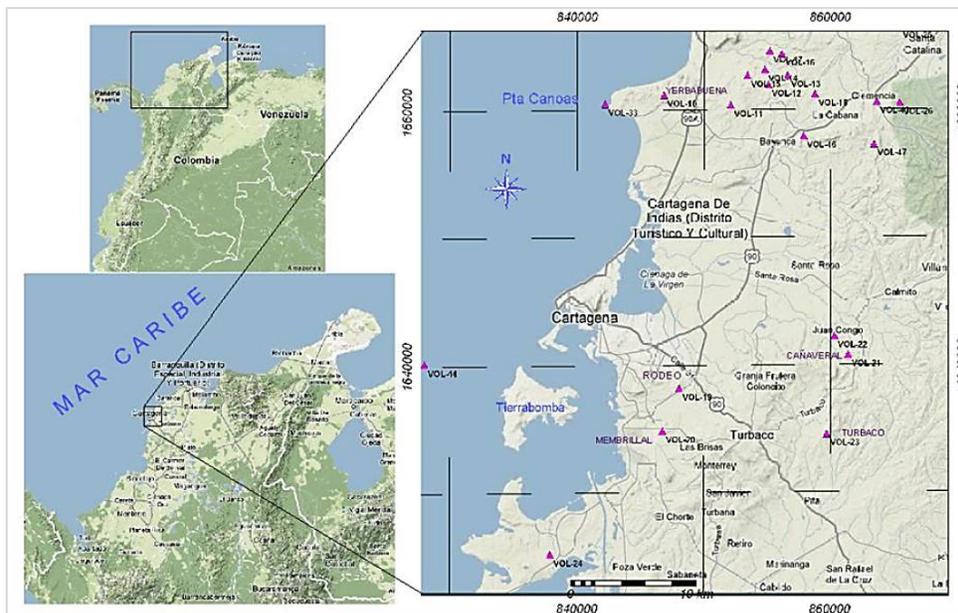


Ilustración 9. Mapa de localización del “Volcán de Lodo El Rodeo al Sureste de Cartagena de Indias. Nótese la localización de otros “Volcanes de Lodo” en la región (Servicio geologico colombiano, 2013).



1.3.7.2 Cinturón de san Jacinto

El Cinturón de San Jacinto comprende las franjas montañosas y de colinas de la serranía de San Jacinto y Luruaco.

Su límite W es el Lineamiento del Sinú, y al E el nombrado Lineamiento de Romeral. Desde la estratigrafía, la estructura de Romeral está controlando la sedimentación de las unidades litoestratigráficas del pre-Mioceno medio (SGC, 2008). Las unidades del post-Mioceno medio afloran al E de este rasgo estructural, pero se describen dentro del Cinturón para darle continuidad estratigráfica. El Cinturón de San Jacinto ha sido separado en dos subregiones definidas por presentar secuencias estratigráficas, especialmente en el intervalo Eoceno medio-Mioceno inferior. Estas subregiones están divididas por dos lineamientos NWW que se han llamado, de S a N, Lineamiento de Loba y Lineamiento del Dique. Una subregión de este cinturón se ha llamado Anticlinorio de Luruaco, y limita al S por el Lineamiento del Dique y al N por la línea de costa del Caribe. La otra subregión es el Anticlinorio de San Jacinto Norte y está limitada por el Lineamiento de Loba al S y por el Lineamiento del Dique al Norte (Duque, 1979).

1.3.8 Sismicidad

La sismicidad es el estudio de los sismos que ocurren en algún lugar o región geográfica determinada. Según la frecuencia de estos sismos la sismicidad se puede clasificar como alta o baja. Un estudio de sismicidad es aquel mapa que muestra los diversos epicentros y el número de sismos que ocurren en un determinado período (Surei, 2014). Para determinar la frecuencia de estos sismos se puede hacer uso de una serie de leyes que ayudan a entender y explicar estos fenómenos. Una de las más usadas es la ley de Charles Francis Richter que relaciona el número de sismos con la magnitud (Geografía, 2014).

2.3.8.1 Sismo

Se denomina sismo, seísmo o terremoto a las vibraciones del terreno generalmente producidas por disturbios tectónicos o volcánicos. En algunas regiones de América se utiliza la palabra temblor para indicar movimientos sísmicos menores y terremoto para los



de mayor intensidad. En ocasiones se utiliza maremoto para denominar los sismos que ocurren en el mar (Surei, 2014).

Cuando se produce un sismo, en este se libera una cantidad muy grande de energía que producen unas fallas o fracturas. Este tipo de energía es transmitida por ondas sísmicas que se propagan en todas las direcciones, lo que da lugar a la vibración del terreno produciendo caídas de las casas, edificios, se produzcan incendios, inundaciones (por fallas en los diques), avalanchas, liberación de materiales tóxicos o radiactivos, etc., que pueden empeorar la situación (Chaverra, 2015).

2.3.8.2 Ondas Sísmicas

Las ondas sísmicas son un tipo de onda elástica fuerte en la propagación de perturbaciones temporales del campo de tensiones que generan pequeños movimientos en las placas tectónicas durante un sismo la energía es liberada en forma de ondas que viajan desde el punto de origen del sismo llamado *foco*. Las ondas sísmicas causan un temblor intenso en la superficie de la Tierra, estos temblores pueden derrumbar edificios y carreteras (Bergman, 2016).

No todas las ondas sísmicas son iguales. Hay varios tipos, y cada tipo de onda sísmica tiene un movimiento único. Las vibraciones pueden ir desde las que apenas son apreciables hasta las que alcanzan carácter catastrófico. En el proceso se generan 4 tipos de ondas de choque. Dos se clasifican como ondas internas (viajan por el interior de la Tierra) y las otras dos son ondas superficiales (Tapia, 2004).

2.3.8.3 Licuefacción

La licuación (o licuefacción) de suelos, ocurre cuando un material no consolidado (generalmente arenas) pierde su resistencia al esfuerzo cortante a causa de una vibración intensa y rápida (sismos), que rompe su estructura granular al reducir su presión intergranular. Al iniciarse la vibración, por efecto de un sismo, el material se expande y las partículas sólidas adoptan un estado muy suelto (por pérdida del soporte mutuo entre los



granos); cuando el movimiento cesa, el material tiende a compactarse bruscamente, produciendo las presiones intersticiales que causan la licuación (Silvia, s.f.).

1.3.9 Suelos Expansivos

Los suelos expansivos son aquellos que presentan expansiones o contracciones, ósea cambios de volumen cuando varía su humedad o contenido de agua. El suelo expansivo más común son las arcillas, las cuales tienen la capacidad de absorber una gran cantidad de agua y retenerla debido a su estructura molecular, el agua produce el incremento del volumen en el material mencionado anteriormente y también una drástica reducción del volumen cuando el agua que retenía se seca.

Los suelos expansivos resultan ser un gran problema para la construcción, porque los incrementos del volumen no se presentan de una manera uniforme, sino todo lo contrario al producirse incrementos en distintas zonas y al momento de contraerse generan asentamientos, que pueden dañar severamente las estructuras (Preciado, 2012).

1.3.10 Presión expansión

La presión de expansión del material presente en la zona de estudio, en este caso arcilla se determina por medio de la correlación entre la presión de expansión (P_s), la humedad natural (W_n), el límite líquido (LL) y el peso específico seco (r_d).

$$\log_{10}(P_s) = -1.868 + 2.08 * \left(\frac{LL}{100}\right) + 0.665r_d - 2.69 * \left(\frac{W_n}{100}\right)$$

Ecuación 1: correlación para hallar la presión de expansión de suelos arcillosos

Fuente : (I.N.V.E 132-07, n.d.).

P_s : Presión expansión del suelo (Kg/cm²).

LL: Límite líquido (%).

r_d : Peso específico (Ton/m³).

W_n : Humedad natural (%).



1.3.11 ArcGIS

ArcGIS es el nombre de un conjunto de productos de software en el campo de los Sistemas de Información Geográfica o SIG. Producido y comercializado por ESRI, bajo el nombre genérico ArcGIS se agrupan varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica (ESRI, s.f.).



2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento morfodinámico y geotécnico de las amenazas geológicas potenciales del sector noroeste del casco urbano de Turbaco (Urbanización El Rodeo) del año 2005 a 2018, mediante la simulación del cambio de la superficie y el impacto de los factores contribuyentes y detonantes en las amenazas, usando el software ArcGIS Desktop, para generar mapas de amenazas geológicas y recomendaciones que apoyen los planes de control y prevención de las autoridades distritales.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Generar un diagnóstico general de las condiciones geológicas, geotécnicas y sociales, usando información secundaria y primaria.
- Identificar los factores que contribuyen y detonan las amenazas geológicas a través del diagnóstico generado.
- Establecer la evolución de los factores contribuyentes y detonantes desde el año 2005 hasta el año vigente y el impacto en las amenazas geológicas, mediante la simulación del cambio de la superficie.
- Generar un mapa de amenazas geológicas, un posible escenario de riesgo de manera conceptual y recomendaciones que apoyen futuros planes de control y prevención.



3 ALCANCE

En el sector sureste del casco urbano de Turbaco, se identifica un área de 236 (ha) aproximadamente en la que se ubica la urbanización El Rodeo y la universidad Tecnológica de Bolívar y colinda con la variante Mamonal- Gambote. En esta área donde se llevó a cabo la evaluación temporal de las amenazas geológicas dadas en la misma, las viviendas se ven afectadas por las características de los suelos sobre el que yacen, ya que hay presencia de vulcanismo de lodo, generado por el diapirismo de lodo que a su vez está ligado al comportamiento de las placas tectónicas y este a las eventualidades sísmicas, lo que constituyen un círculo de amenazas geológicas para la comunidad que habita allí, fuera de otras condiciones geológicas presentes como los problemas de licuefacción y expansión de los suelos y las repercusiones por intervenciones antrópicas. Esta evaluación se llevó a cabo en el primer periodo académico del 2018 y consta de la recolección de datos secundarios como estudios realizados allí, inspecciones visuales, fotografías aéreas, mapas geológicos y recurrencia sísmica que permitieron bajo parámetros geológicos hacer una vista evolutiva y/o retrospectiva de cómo han influido en el desarrollo de la amenaza geológicas esos factores, los datos geográficos se administraron y analizaron mediante el uso del software ArcGIS, la información primaria estará compuesta por ensayos de potencial de expansión que se realizaron en los laboratorios de la Universidad de Cartagena, fotografías del estado de la zona así como encuestas que registran el estado de la misma, levantamiento de daños y levantamiento topográfico.

La zona estudiada comprende la Urbanización El Rodeo y la Universidad Tecnológica de Bolívar y colinda con la variante Mamonal- Gambote, ubicada al sur este del casco urbano de la ciudad de Cartagena con coordenadas $10^{\circ}22'16.25''N$ latitud norte y $75^{\circ}27'41.15''W$ de longitud oeste respecto al Meridiano de Greenwich, el área de estudio tiene aproximadamente 236 (ha).

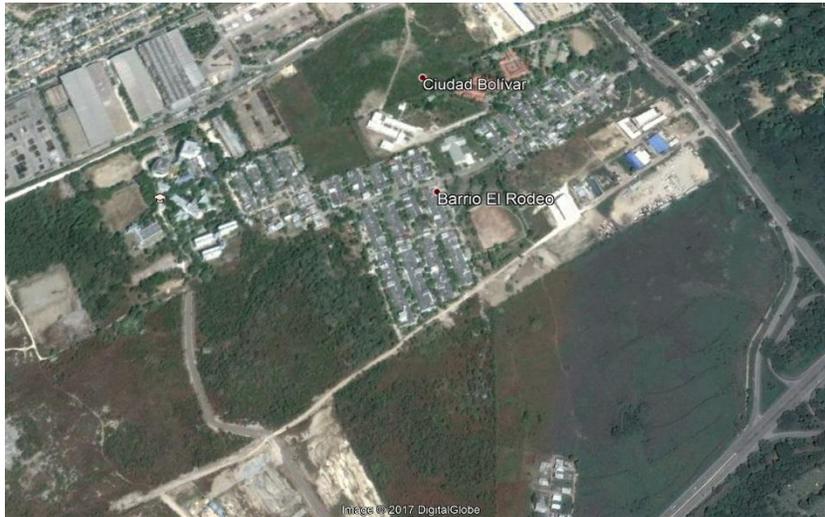


Ilustración 10 Ubicación barrio el rodeo

FUENTE: (Google Maps, 2017)



Ilustración 11 Zona de estudio

FUENTE: (Google Maps, 2017)

El alcance de esta propuesta abarca la evaluación de los factores que influyen en las amenazas geológicas del Barrio El Rodeo y zonas aledañas, así como el análisis de las condiciones geológicas más relevantes en tanto a la exposición con la que viven las personas que residen en esta zona para generar un diagnóstico de la situación actual del



sitio; las variables que se consideran en esta investigación son distinguidas en diferentes componentes: geológico-geotécnico, social-estructural y topográfico.

Esta investigación contiene los factores más importantes que hacen latente la amenaza geológica con la que viven los habitantes de la Urbanización El rodeo, así como un diagnóstico del estado actual de la zona que fue hecho mediante un análisis retrospectivo de los factores mencionados, además de recomendaciones para la inspección, control y mitigación de la amenaza geológica. A su vez agrupa los estudios realizados, que sirven para posibles y futuras intervenciones a realizar en la zona.

Esta investigación sirve como base informativa para generar planes de prevención y control en la zona de El Rodeo, así como ser usada para próximas investigaciones sobre variables allí estudiadas con el fin de analizar amenazas de este tipo en otros sitios o fenómenos geológicos con características semejantes.

Los productos que complementarían este estudio se relacionan con la evaluación de volcanes de lodos, medición de diapiros y crecimientos de los diapiros con respecto a las diferentes intervenciones antrópicas como construcciones, excavaciones, son estudios de gran envergadura que relacionarían directamente la manifestación de volcanes de lodos con respecto al crecimiento de diapiros y la causa del mismo.

En esta investigación no se realizaron estudios de gran envergadura, como geológicos, geotécnicos, fotografías aéreas ya que, una de las mayores limitaciones fue el aspecto económico y temporal, por eso la mayor parte de la información usada fue secundaria e información primaria como levantamiento topográfico, encuestas, levantamiento de daños, ensayos de expansión, exploración de campo y fotografías.



4 METODOLOGIA

El tipo de investigación que se realiza en este proyecto es mixta, una combinación entre la investigación exploratoria y la descriptiva donde esta última está compuesta por un análisis retrospectivo de información secundaria y se evalúan los factores que intervienen en las amenazas geológicas presentes en la Urbanización El Rodeo a través del tiempo y la parte exploratoria contiene una serie de datos recolectados mediante visitas técnicas, registros fotográficos y algunos ensayos de las propiedades mecánicas del suelo, con el fin de generar un diagnóstico de la situación actual de la zona y que se generen los planes adecuados de control y prevención.

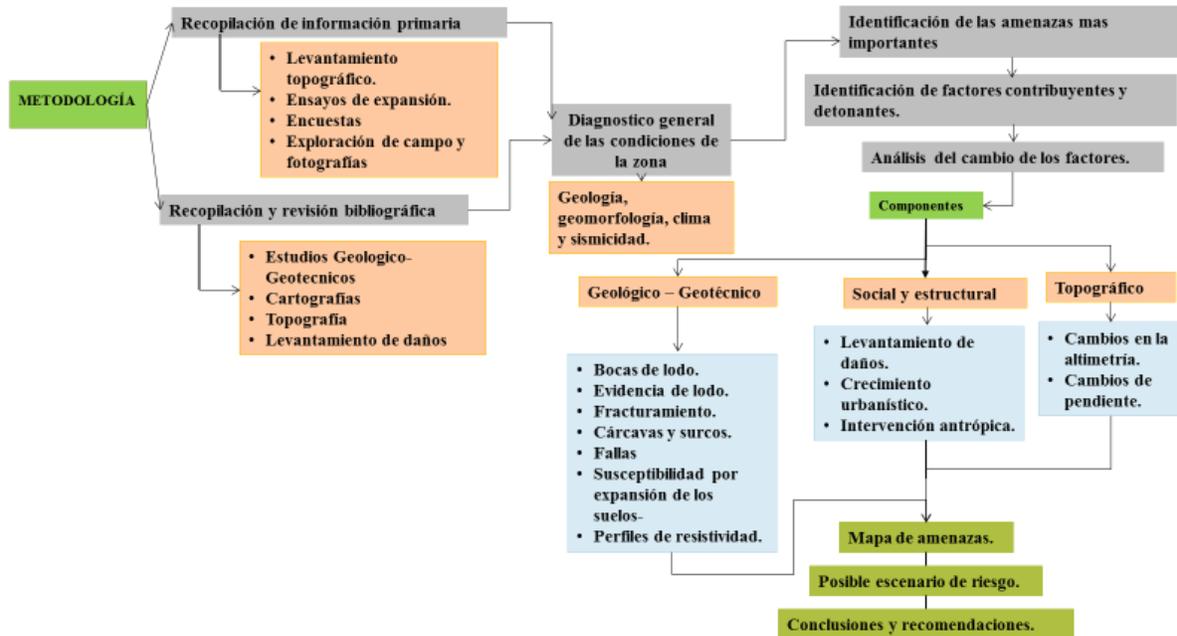


Ilustración 12 Esquema de la metodología desarrollada en esta evaluación.

Fuente: Los autores.



4.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

4.1.1 Recopilación de información secundaria

En esta etapa se agrupó toda la información correspondiente a los estudios geológicos, geotécnicos, topográficos, registros de recurrencia sísmica, fallas generales y fotografías aéreas, que se hayan realizado anteriormente. Estos datos fueron recolectados de diferentes fuentes que han evaluado, intervenido o publicado trabajos investigativos, trabajos de grado, estudios y artículos acerca de la zona, como el servicio geológico colombiano, Cardique, entre otros.

Dentro de la información secundaria obtenidas de las bases de datos se utilizarán trabajos de grado, como “Evaluación geotécnica de las amenazas por diapiroismo de lodos: caso sector sur casco urbano de Cartagena” (2005), Trabajo de grado desarrollado por Cruz Córdoba Jairo Giovanni y Pájaro Díaz Fredy Eliecer, dirigidos por el profesor Barboza Miranda, Guilliam Rafael. Que contienen estudios realizados en la zona como sondeos, perfiles geoelectricos y topográficos (Cruz Cordoba & Pajaro Diaz, 2005).

4.1.2 Recopilación de información primaria

En esta etapa se llevará a cabo una técnica de recolección y organización de información primaria por componentes, estos estarán distinguidos así:

4.1.2.1 Componente geológico – Geotécnico

- **Exploración de campo:** Para esta exploración se contó con la compañía de un habitante y conocedor de la zona, se empezó el recorrido desde las faldas del domo de presión o boca principal de lodo, reconociendo algunas condiciones como la deforestación, el estado del suelo, fracturamiento, surcos y cárcavas, la ubicación y tipos de bocas de lodo, la emanación de gases de las mismas, el estado del lodo actual y zonas quemadas, teniendo un registro de la ubicación con GPS y fotografías.



- Toma de muestras para los ensayos de expansión y potencial de expansión: Se ubicaron, conforme a lo leído en anteriores bibliografías tres zonas para la toma de las muestras una zona cercana a los lomos de presión o a las bocas de lodos, otra donde se encuentra la vía que conecta con la variante tal y es construida por la UTB, por último la zona de las viviendas donde se ubica propiamente la urbanización. Para la toma de estas muestras fue necesario el acompañamiento de la comunidad así como la realización de trincheras para la obtención de suelo. Luego de obtener estas muestras fueron llevadas a los laboratorios de Geotecnia de la UDC en los que se llevó a cabo los respectivos ensayos mencionados teniendo como lineamiento la I.N.V.I.E 125 y 126 Para el análisis de los datos obtenidos en el laboratorio se utilizó una base teórica titulada “Fundamentos de Ingeniería Geotecnica Braja M. Das”.

4.1.2.2 Componente social y estructural

- Encuestas a la comunidad: El registro del estado de las casas en El Rodeo se llevó a cabo principalmente en el sector 3 con 27 encuestas el día 14 de abril de 2018 , que es el sector más cercano a las bocas de lodo, conjunto al sector 1 con 13 encuestas el día 15 de abril de 2018, que es el sector ubicado en la entrada de la urbanización, contienen información de los diferentes hechos que han transcurrido cerca de sus casas, como deslizamientos, erupciones, temblores, desplazamientos e inundaciones, así como el estado estructural de las casas, tipo de elementos de construcción usado y posibles patologías como fisuras, grietas y hundimientos, el formato utilizado en esta encuesta se puede visualizar en el anexo 9.
- Ubicación de casas: Para denotar el crecimiento poblacional las encuestas complementaron el objetivo de contar las casas restantes a las censadas o contabilizadas en los estudios anteriores.



4.1.2.3 Componente topográfico

- Toma de puntos: Con la intención de tener información actual con que comparar el estado de la superficie conforme el tiempo se hizo un levantamiento de puntos usando una estación total desde la parte más alta del lomo de presión, con un área de aproximadamente 8ha, relacionando con las topografías anteriores con puntos geográficos que datan en estas.

4.2 DIAGNOSTICO GENERAL DE LA ZONA

Se establece las condiciones geológicas, geotécnicas, espacio funcional, morfológico y climatológicas a través de información recopilada.

4.3 ANALISIS DE LA INFORMACIÓN RECOLECTADA

4.3.1 Definición de las amenazas geológicas más importantes e identificación los factores que contribuyen a las amenazas geológicas.

En esta etapa se establecieron las amenazas más importantes a las que se encuentra expuesta la comunidad de acuerdo a las condiciones geológicas presentes como evidencias de antiguas erupciones, presencia de lodos en el área, hundimientos, expansión de los suelos y crecimiento de diapiro utilizando la información primaria y secundaria anteriormente recolectada, usando la metodología “zonificación geotécnica, aptitud y uso del suelo en el casco urbano de Cartagena de indias, dtc – bolívar” desarrollada en el año 2000 por el INGEOMINAS, utilizando las medidas de evaluación para cada condición que representa una amenaza, teniendo en cuenta que, la agrupación y análisis de la información se da en tres componentes principales Geológico- geotécnico, topográfico y social.

4.3.2 Evolución de los factores que influyen en las amenazas presentes en la zona del año 2005 a 2018

Se estableció la evolución de los factores que influyen en las amenazas definidas mediante la información secundaria como estudios geológicos, geotécnicos, topográficos, sociales e



información primaria como datos de control topográfico, registros fotográficos, encuestas del estado de la zona y ensayos de potencial y presión de expansión.

4.3.3 Análisis retrospectivo de las amenazas geológicas más importantes.

Para el análisis evolutivo de las amenazas geológicas más importantes anteriormente definidas, se utilizó una vista retrospectiva donde se establece el estado de las condiciones geológicas y las intervenciones antrópicas que influyen en estas en los diferentes periodos registrados en los estudios realizados, para analizar esta línea de tiempo geológica se requiere de una evaluación de diferentes variables, distinguidas por componentes:

4.3.3.1 Componente geológico-geotécnico.

Estas variables incluyen la presencia de volcanes de lodos, evidencia de lodos, diapiros, bocas, fallas generales, asentamientos, propiedades mecánicas de los suelos como la expansión, estas se evalúan a través de distintos análisis de la información secundaria y primaria recolectada, como:

- Análisis foto interpretativo a partir de imágenes satelitales y fotografías aéreas obtenidas de Google Earth desde el año 2005 hasta el vigente.
- Análisis de mapas geológicos, geomorfológicos, de susceptibilidad de escenarios de riesgo y fallas generales.
- Análisis de perfiles geo eléctricos, perforaciones, propiedades mecánicas de los suelos.
- Análisis del estado actual de las bocas de lodo, fracturamiento, asentamientos, surcos, cárcavas, zonas deforestadas o quemadas, así como posibles obras, a través de la exploración de campo y registro fotográfico.

4.3.3.2 Componente social- estructural

Este componente incluye la variación del crecimiento poblacional y las intervenciones antrópicas a su vez, así como el estado de las viviendas conforme a las condiciones geológicas.



- Análisis de las encuestas sociales realizadas en estudios previos del estado de la zona, ver anexo 1 al 5, en el que se detalla el estado de las viviendas.
- Incremento de la urbanización presente a través de fotografías aéreas y registro de levantamientos de casas en estudios anteriores.
- Registro de construcciones, excavaciones y deforestaciones.

4.3.3.3 Componente topográfico

Para la utilización de la información para esta componente se siguió el siguiente procedimiento para organizar y analizar los resultados:

- Se estableció un área de influencia de acuerdo a la información secundaria demarcada en Google Earth.
- Se zonificó las topografías obtenidas mediante información secundaria dentro del área anteriormente designada (Ilustración 57).
- Se realizó un levantamiento de puntos topográficos usando de referencia unas de las topografías anteriormente mencionadas, es decir para la zona 1 y zona 3, se obtuvo información primaria que se desarrolló tomando puntos geográficos de referencia de los anteriores levantamientos para esas zonas en años anteriores (tabla 13).
- Se realizaron perfiles longitudinales y transversales para la zona 1 y la zona 3, para los levantamientos del año 2018 y del año 2005 y 2013, es decir que los perfiles trazados fueron realizados en la misma ubicación para poder realizar un análisis del campo de la altimetría conforme a los años, relacionándolos con la intervención antrópica y los fenómenos de diapirismo y fallas generales.
- Se modelaron las diferentes zonas en los años en los que se obtuvo información (2005, 2013 y 2018) en ArcGIS para obtener un cambio detallado e ilustrado de la superficie y de las pendientes de esta, el desarrollo de esta modelación tiene como resultado el cambio de las pendientes y superficies de las zonas, este proceso se puede observar detalladamente en el anexo 8.

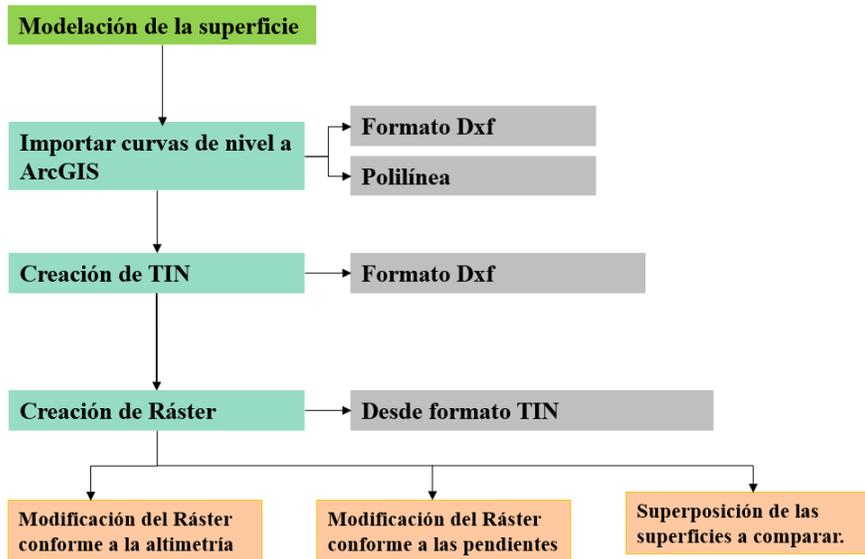


Ilustración 13. Esquema del proceso de modelación de la superficie en ArcGIS.

Fuente: Autores.

4.4 MAPA DE AMENAZAS

Para obtener una relación de los resultados obtenidos con el cambio de las amenazas, se realizó un mapa de amenazas geológicas conforme al diapirismo de lodo, a través de la ubicación geográfica de las bocas de lodo, así como los drenajes de agua, los cuales representan de manera directa un acceso para la emanación violenta de lodo, así como de gases, además de ubicar los surcos y cárcavas como otro indicador de amenaza.

Este mapa fue realizado siguiendo los lineamientos del INGEOMINAS para la zonificación de regiones donde se presenten estas amenazas geológicas, haciendo una distinción entre colores para el grado de la amenaza.

Se tuvo en cuenta la zonificación del INGEOMINAS para clasificar el suelo conforme al potencial de expansión de los suelos de bajo a alto, lo cual complementa y sustenta la distinción de las zonas en el mapa de amenazas.

Este mapa también se enlaza con las encuestas realizadas en El Rodeo, el cual indica el estado de las casas conforme a la cercanía de estas a la zona de amenazas de un alto grado.



4.5 POSIBLE ESCENARIO DE RIESGO CONCEPTUAL Y ANALISIS DE LAS AMENAZAS DEFINITIDAS Y EVALUADAS.

De acuerdo a los resultados obtenidos como: La ubicación de bocas de lodos, drenajes de agua, fracturamiento del suelo, estado y ubicación de las casas y domo principal del volcán, se pudo estimar un escenario donde se comporten los factores detonantes y contribuyentes de la misma forma que lo ha hecho, es decir qué implicaría el crecimiento del urbanismo, de las intervenciones antrópicas, de la deforestación y cómo se vería reflejado tras una posible erupción, todo esto siguiendo los informes de diapirismo de lodo del INGEOMINAS, así como la ayuda del director de este proyecto de investigación.

Con el análisis de la información obtenida y de los productos desarrollados, se generaron recomendaciones que aluden a la prevención y control de las amenazas geológicas presentes en El Rodeo, así como las conclusiones mas importantes a tener en cuenta tras esta evaluación del comportamiento morfodinámico y geotécnico de las amenazas geológicas.



5 RESULTADOS Y ANALISIS

5.1 ESTADO GENERAL URBANIZACIÓN EL RODEO

Al noreste del municipio de Turbaco, Bolívar y colindando con la ciudad de Cartagena se encuentra ubicada el área estudiada en la que se encuentra la urbanización El Rodeo, entre otros sectores incluyendo la Universidad Tecnológica de Bolívar.

Con un área de aproximadamente 232 ha, delimitada como se muestra en la ilustración 14 entre los puntos $10^{\circ}22'36.01''N$, $75^{\circ}27'40.47''O$ y $10^{\circ}21'29.96''N$, $75^{\circ}28'11.48''O$ también señalados, en esta zona presentan fenómenos geológicos como el crecimiento de diapiros y volcanes de lodos, así como problemas de suelos expansivos, además de ser atravesada por las fallas geológicas características de la geomorfología de la región.



Ilustración 14. área de influencia de diapirismo y suelos expansivos

Fuente: Fotografía base tomada de Google Earth, editado por los autores.

Esta zona fue delimitada por Cartagena como un área de suelos expansivos, pese a que esta no pertenece al municipio (POT Cartagena, 2001-2005) sino al municipio de Turbaco. Aunque estas condiciones geológicas representan una amenaza para la comunidad, el crecimiento poblacional se vio reflejado desde 1998 cuando comprendía veintiséis (26) manzanas y trescientas ochenta y cuatro (384) viviendas de interés social (Sentencia T-



149/17, s.f.) Hoy día la urbanización en El Rodeo aumentó, incrementando a su vez la cantidad de personas expuestas por daños a causa de las posibles explosiones volcánicas y colapso total de sus viviendas que se dan gracias al comportamiento del suelo que sobre el que yace la urbanización.

En el 2013 cuando la población y el urbanismo creció a 500 casas aproximadamente, se registró una erupción que expulsó entre 2 mil y 3 mil metros cúbicos de lodo, generando temor entre la comunidad. Pese a la alarma que hubo en ese momento, todavía los habitantes de El Rodeo continúan exigiendo atención ante las consecuencias de convivir con estos fenómenos geológicos, en las siguientes ilustraciones se puede observar la erupción del año 2013 (El Universal, 2017).



Ilustración 15. Evidencias de lodo barrio El Rodeo año 2013

Fuente: (Cardique, 2013)



Ilustración 16. Evidencia de erupción barrio El Rodeo año 2013

Fuente: (Cardique, 2013)



5.1.1 Caracterización geológica

La urbanización El Rodeo que por su cercanía a la ciudad de Cartagena presenta semejanzas en las características geológicas de esta, yace sobre un suelo con depósitos aluviales y de llanuras aluviales (Q-al) del cuaternario, que además es atravesada por una falla cubierta como la de Mamonal, cerca de este también se describen suelos como Intercalaciones de lodolitas, arenitas calcáreas y cuarzoarenitas de grano grueso a conglomeráticas (n6n7-Sm) del Mesiniano-Zancleano y hace parte de la formación Bayunca, como se indica en la ilustración 17 (SGC, 2016).

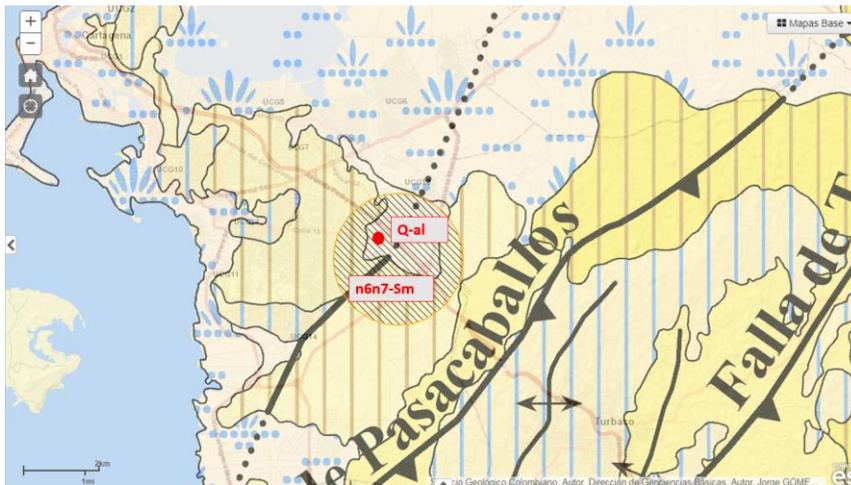


Ilustración 17. Mapa geológico Turbaco, Bolívar – Colombia

Fuente: (SGC, 2016).

5.1.2 Caracterización geomorfológica de la zona

La morfología presente en el Caribe noroccidental colombiano debe su origen tanto a los levantamientos del terreno generados por el fenómeno del diapirismo, como al efecto transpresivo continental de las placas Nazca, Caribe y Suramérica. El fenómeno se desarrolla predominantemente en rocas del llamado cinturón del Sinú (SGC, 2017).

El Cinturón del Sinú es una faja de rocas sedimentarias con edades que varían desde Oligoceno hasta el Plioceno (DUQUE-CARO, 1979). Se extiende desde el golfo de Urabá



hasta Barranquilla, incluyendo zonas continentales y submarinas (Plataforma y talud continentales, limitando all SW con la Falla de Uramita, al W con el Lineamiento de Colombia y al E con el Lineamiento del Sinú. En la zona continental y costera, se presenta en dos sectores separados por el mar: uno al S denominado Sinclinorio de Abibe-Las Palomas y otro al N, llamado el Anticlinorio de Turbaco.

El anticlinorio de Turbaco, se encuentra en el costado E de la ciudad de Cartagena donde las características de las estructuras principales se caracterizan por presentar inflexiones hacia el N15°-20°E, asociadas con fallas transcurrentes inversas (docplayer, 2011).

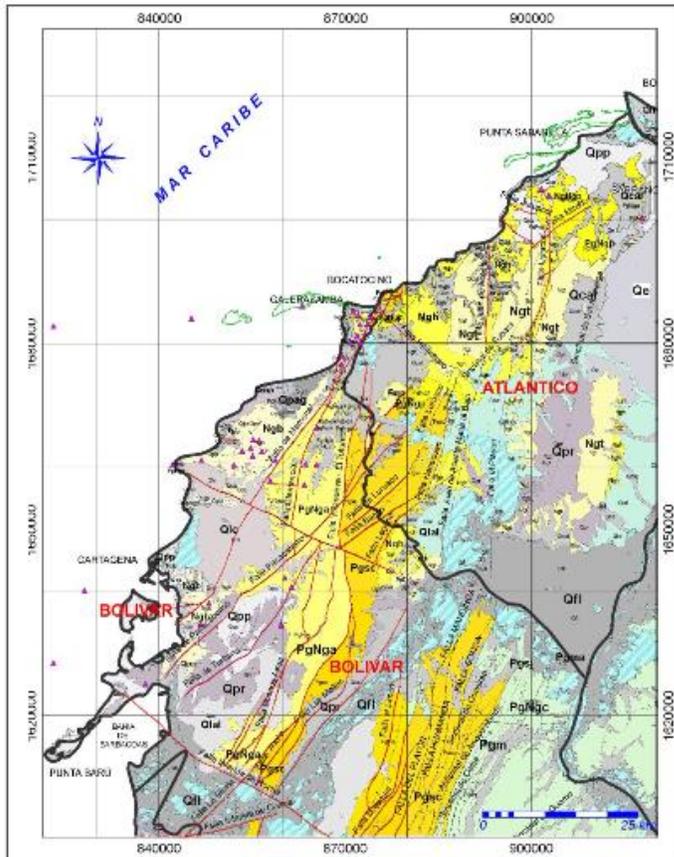


Ilustración 18. Mapa Geológico del Caribe Central Colombiano. Pgsc = F. San Cayetano, Pgsj = F. San Jacinto, PgNgc= F.Carmen, PgNgp= F. Perdices, Ngh = F. Hibácharo, Ngd = F. Tubará, PgNga= F. Arjona, Ngb= F. Bayunca, Qpp= F. Popa, Qpr = F. Rotinet, Qpag= F. A. Grande, Qe = D. Eólicos, Qfl = D. Fluviales, Qma = D. Marinos, Qcal = D. Coluvioaluviales, Qlc = D. Costeros,



Qlal = D. Aluviales Subactuales. Tomado y modificado de Reyes y Otros (2001), Barrera (2001), Guzmán y Otros (1998), Reyes y Zapata (1996). Nótese la ubicación de los “volcanes” en púrpura y en zona costera las antiguas espigas arenosas en verde vergencia hacia el W, algunas de las cuales terminan en forma curva contra el Lineamiento del Sinú. Esta estructura regional se extiende por el borde costero en la región de Turbana, Arjona y Turbaco; al sur es interrumpido por la depresión asociada con el canal del Dique. En la región estudiada afloran rocas de las Formaciones Arjona, Bayunca, la Popa, cubiertas localmente por sedimentos de origen marino, denudacional, fluvial y eólico.

Fuente: (Servicio geológico colombiano, 2013).

Igualmente es evidente la conformación de bloques en dirección N – S, limitados por fallamiento de rumbo sinistral de dirección NW – SE, que se considera conjugadas antitéticas del sistema NNE, (ilustración 18). Estas fallas de Norte a Sur corresponden a las fallas de Hibácharo al Norte de Galerazamba, Falla Pueblo Nuevo – Pendales, falla del Dique y la falla inferida de Rocha, esta última a la altura del sector Norte del delta del canal del Dique. El fallamiento NNE relacionado con la falla Villanueva – Totumo, que define el límite de los cinturones del Sinú y San Jacinto se encuentra asociado con fallas de dirección NE, igualmente de rumbo transpresivo dextral y localmente sinistral, las cuales convergen hacia el NE formando una especie de cola de caballo, localmente distensivo. En el bloque de Cartagena limitado al sur por la falla inferida de Rocha (canal del Dique) y por el Norte con la falla del Dique que cruza por Punta Canoas se encuentran de E a W, las fallas de Buenos Aires, Turbana, Pasacaballos y Mamonal, las cuales han sido consideradas como fallas inversas con componente dextral con ángulos del orden de los 45 grados hacia el oriente.

En general estas fallas definen sinclinales W – E que cambian su rumbo a dirección NE a medida que se acercan al considerado límite Sinú - San Jacinto. Igualmente determina pliegues anticlinales y lomos de presión de direcciones variables W – E y SW. NE, limitados en sus flancos por el fallamiento dextral NE, con una importancia muy significativa porque es allí donde se encuentran los “Volcanes de Lodo” presentes en la región. de hecho el "Volcán de Lodo" particularmente en el sector El Rodeo, se encuentra asociado sobre lomos de presión de dirección SW - NE limitados por fallas de rumbo NEE



- E-W destrales, que se consideran sintéticas de la falla de Mamonal, cuyo trazo se evidencia por el sector NW, aproximadamente 350 m de la urbanización El Rodeo (servicio geológico colombiano, 2013).

5.1.3 Características geomorfológicas del “volcán de lodo” el rodeo.

El "Volcán de Lodo" El Rodeo, se encuentra localizado 11 km al SE del centro amurallado de Cartagena de Indias, entre las coordenadas planas con origen Bogotá X: 847000 - 848700 y Y: 1.637.600 – 1.639.000 de la plancha IGAC escala 1: 25.000 29-II-A. Estas coordenadas corresponden con las coordenadas geográficas Oeste 75° 27'45" y 75° 28'40" y Norte 10° 21'41" y 10° 22'27" (Servicio geológico colombiano, 2013).

El “Volcán de Lodo” El Rodeo, se presenta como una colina baja en forma de domo con un diámetro oscilante 1 - 1,2 km y alturas variantes entre 30 y 40 m. Los flancos son convexos con pendientes entre 15 y 25 grados, donde es igualmente, característico el fuerte carcavamiento (ilustración 19). Hacia la parte norte y en las vías que cruzan la estructura “volcánica de lodo” se presentan escarpes de 3 - 4 m de altura, asociados a actividad antrópica e igualmente hacia la urbanización El Rodeo, se han evidenciado conos de flujo de lodo de suave pendiente (3 - 7 grados), los cuales representan flujos de lodo posiblemente producto de antiguas erupciones, encausados por los drenajes hasta llegar a las zonas bajas mencionadas y se constituye en superficie de lodos oscuros consolidados con gravas y bloques hasta de 20 cm, embebidos en material arcilloso de color gris oscuro localmente pardusco. Los bloques son predominantemente de areniscas cuarzo feldespáticas, arcillolitas, limolitas y calizas.

La zona “volcánica de lodo” El Rodeo, incluye dos zonas dómicas afectadas por fallamiento de dirección NEE, que se desprenden de la falla de Mamonal, cuyo trazo se ha inferido por el costado occidental de las estructuras volcánicas de lodo. La zona dómica principal corresponde a la zona donde se han presentado recientemente procesos eruptivos, mientras la segunda de menor diámetro (400 - 500 m), se encuentra al oriente, cruzada actualmente por la vía perimetral Turbaco - Mamonal, (ilustración 17).

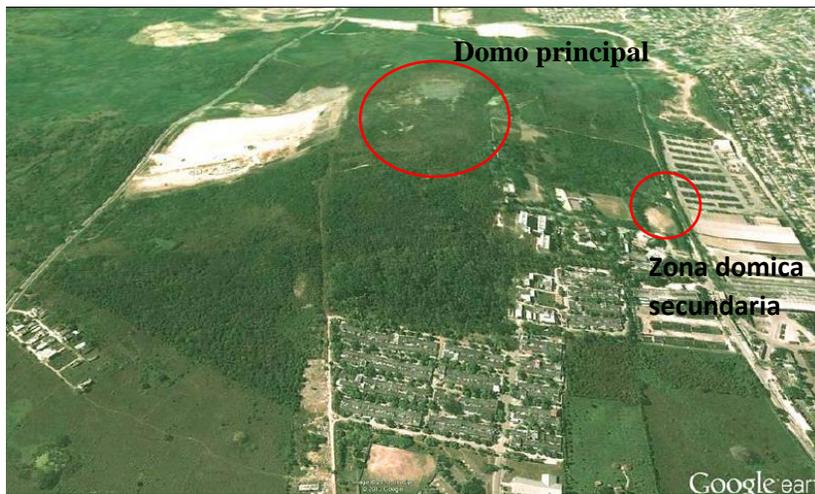


Ilustración 19. Vista panorámica hacia el suroeste de la estructura domica del volcán de lodo El Rodeo.

Fuente: (Google Earth, 2013).

Por efecto del fracturamiento NEE, los “edificios volcánicos” se presentan elongados, con el diámetro mayor de 1.200 m de largo en dirección noreste, y una altura máxima de 55 m.s.n.m (Ver ilustración 19).

En general hacia la cima de los edificios “volcánicos de lodo”, se presenta una depresión a manera de cráter, en forma de artesa, la cual en el “Volcán de Lodo” El Rodeo, tiene un diámetro entre 200 – 400 m de diámetro promedio.

5.1.4 Características climatológicas generales

El clima de la región de Cartagena de Indias, se considera como tropical semiseco, con temperaturas máximas de 28,4°C en el mes de junio, que va disminuyendo paulatinamente a 26,8°C en los meses de enero y febrero por incidencia de los vientos alisios que soplan con mayor intensidad en dirección NE – SW durante estos meses (Carvajal, 2012). La pluviosidad por su parte, presenta tres periodos bien definidos, un periodo entre diciembre y abril con precipitación media anual de 7,8%, un segundo periodo de transición seco – lluvioso, entre mayo y agosto de 31,9% de precipitación media y finalmente un tercer periodo muy lluvioso entre septiembre y noviembre con un 48,4% de precipitación media



mensual, siendo el mes de octubre el mes más lluvioso de la región con una pluviosidad media mensual de 23,6% (INGEOMINAS, 2000).

5.1.5 Características sísmicas de la zona

De acuerdo con la distinción hecha por el servicio geológico de Colombia y la norma sismo resistente del 2010 El Caribe colombiano es considerado como de sismicidad baja a intermedia, como se muestra en el mapa de amenazas sísmicas por el SGC de 2010.



Ilustración 20 leyenda de mapa de amenaza.

Fuente: (SGC, 2010).

Ilustración 21 características sísmicas del país

Fuente: Servicio Geológico Colombiano

MAVDT (2010).

Como fuentes sismogénicas en el área se destacan las fallas de Oca, Cuiza, Santa Marta, Urumita, Punta Canoas y Rosario, estas dos últimas con dirección E-W, y postuladas por Vernet et al. (1.993). Del mismo modo se consideran como fuentes sismogénicas de primer orden la Falla de Romeral, la Falla de Mamonal, de dirección NNE, y el cinturón deformado del Caribe meridional (Ilustración 17).



Para el municipio de Turbaco las condiciones sísmicas son iguales (Ilustración 23), pertenece a una zona de amenaza baja y el valor de amenaza es 5 que representa un nivel ‘Fuerte’, que describe de acuerdo efectos como vibración de las ventanas, puertas y platos, sentido en el interior de edificios y presencia de grietas en edificaciones vulnerables (SGC, s.f.).

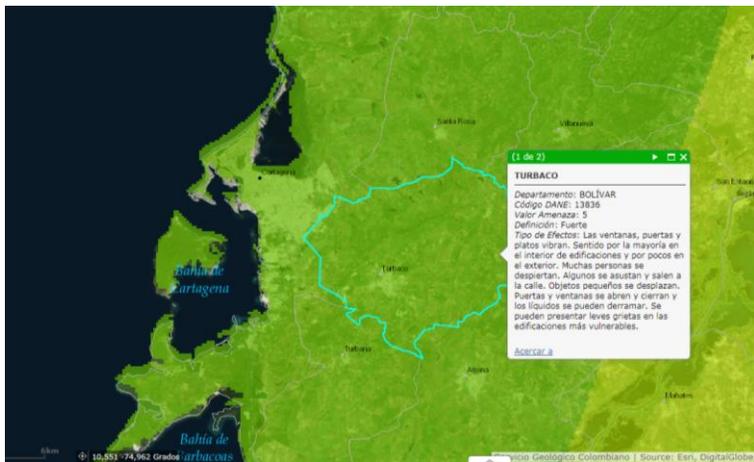


Ilustración 23 condiciones sísmicas del municipio de Turbaco

Fuente: (Servicio geológico colombiano, 2016).



Ilustración 22 leyenda de las condiciones sísmicas

Fuente: (SGC, 2016).

La región Caribe se caracteriza por el registro histórico de sismos, la mayoría de magnitud Ms entre 4,1 - 5,5 y menores; aunque igualmente se presentan registros de sismos de magnitudes mayores asociadas al cinturón deformado del Caribe meridional. Los sismos cuyo epicentro se ha demarcado en cercanías de la ciudad de Cartagena (Escallón et al., 1.993; INGEOMINAS, 1.999) son de magnitudes de 4,1 - 5,5 y por su ubicación podrían relacionarse con las fallas de Canoas y Mamonal (Ilustración 17). Históricamente, según Ramírez (1.975), la ciudad de Cartagena sufrió daños de consideración con una serie de sismos sucedidos entre el 8 y 25 de mayo de 1.834, cuyos epicentros se ubicaron cerca de Santa Marta, ciudad que fue prácticamente destruida.

En junio de 1.998, se presentó un sismo de magnitud de 5,9 en la escala de Richter y su epicentro se localizó 60 km al oeste de la ciudad, en el llamado cinturón deformado del



Caribe meridional (INGEOMINAS, 1998). Este sismo, que posteriormente tuvo dos réplicas de magnitud 3,6 y 4,8, ocasionó procesos de inestabilidad en las laderas norte y oriental del cerro San Francisco, con el consecuente daño de 40 casas del sector, algunas de las cuales hubo necesidad de desocupar (Carvajal, 1998).

Dada la cercanía de la urbanización El Rodeo a Cartagena y a la disposición de los datos para la recurrencia sísmica de la misma, la caracterización sísmica utiliza los eventos sísmicos histórico localizados en un área circular de 250 km de radio y se tomó como centro el casco urbano de Cartagena, además de reconocer que el municipio de Turbaco que es el municipio a la cual pertenece la zona estudiada representa la misma zona de sismicidad al igual que el valor de amenaza.

Magnitud de ondas superficiales (Ms). Magnitud válida para terremotos con foco superficial en donde la amplitud máxima debe ser medida en el modo fundamental de la onda Rayleigh con periodo (T) entre 18 – 22 segundos. Las correcciones deben considerar la distancia epicentral y la profundidad del foco del terremoto. (H. Tavera (Centro Sismológico del Perú)).

5.2 DEFINICIÓN DE LAS AMENAZAS GEOLÓGICAS MÁS IMPORTANTES E IDENTIFICACIÓN LOS FACTORES QUE CONTRIBUYEN A LAS AMENAZAS GEOLÓGICAS

Conforme al estado general anteriormente expuesto, se describe una serie de condiciones que representan una amenaza potencial para la comunidad de El Rodeo, haciendo uso del término como la ocurrencia potencial de un hecho que pueda manifestarse en un lugar específico, con una duración e intensidad determinada, que para este caso el lugar específico es el Barrio El Rodeo y la amenaza se confiere a un contexto geológico. Existen factores que contribuyen y detonan a estas amenazas y están definidos de acuerdo a el crecimiento de diapiros y volcanes de lodos, la sismicidad, la litología, la erosión y la intervención antrópica.



FACTORES DE LAS AMENAZAS	
CONTRIBUYENTES	
Diapirismo	Volcán De Lodo
	Evidencia De Lodo
Litología	Suelos Arcilloso
	Agrietamiento
	Potencial De Expansión
	Presión De Expansión
	Clasificación Del Suelo
Erosión	Surcos
	Cárcavas
	Diaclasas
Intervención antrópica	Deforestación
	Excavaciones
	Construcciones
DDETONANTES	
Sismicidad	Agrietamiento Superficial
	Fallas
	Tipos De Fallas
	Fracturamiento
	Registro De Eventos Sísmicos

Tabla 2. Factores de las amenazas contribuyentes y detonantes en El Rodeo.

Fuente: Los autores.

Las amenazas que se señalan en la tabla anterior en la columna izquierda resumen los problemas geológicos característicos de El Rodeo que a través de la información anteriormente recolectada se pudo reconocer, de los cuales tienen factores que le contribuyen y detonan.

Las unidades de evaluación de las amenazas se confieren propiamente a los factores que la contribuyen o detonan y a menara de análisis se ha organizado por tres componentes anteriormente mencionados.

- Diapirismo: Evaluación de manera cualitativa a través de la distinción del tipo de bocas presentes, evidencia de lodo, emanación de gases y tamaño de burbujas.



- Litología: Potencial de expansión de los suelos y presión de expansión, agrietamientos, fracturamientos, caracterización de los suelos.
- Erosión: Presencia de cárcavas y surcos en la zona alta de emanación de lodos y en la urbanización.
- Intervención antrópica: Áreas deforestadas, crecimiento de urbanización, excavaciones.
- Sismicidad: Fallas, registro sísmico.

5.3 EXPLORACIÓN DE CAMPO Y ANALISIS DEL ESTADO DE LA ZONA.

5.3.1 Componente geológico

5.3.1.2 Identificación de zonas de emanación de lodo y gases

De acuerdo con la exploración de campo, se pudo reconocer la ubicación de las bocas de lodo en El Rodeo, así como el estado del suelo de manera superficial como la presencia de surcos y cárcavas, a manera general y a través de fotografías aéreas de la fuente de Google Earth se puede observar un centro o zona de emanación de lodo y gases en el volcán de lodo de "El Rodeo" a 59 m de altura.



Ilustración 24 Centro de emanación de lodos El Rodeo Año 2005



Fuente: (Google Earth, 2005), editado por los autores.

En la anterior imagen se puede observar que, el centro de lodo identificado con un círculo azul para el año 2005 con un radio de 73.8 m y 1.7 ha, está cubierto parcialmente de vegetación con la apariencia de colina baja, para el año 2013 (ilustración 25) donde se reportó una erupción la ilustración indica la presencia de lodo con el círculo amarillo con un radio de 50.47 y 0.8 ha de área, el círculo rojo que permanece igual muestra cambios en la vegetación y comprende las zonas con presencia de surcos.



Ilustración 25 Fotografía aérea El Rodeo año 2013, zona de lodo indicada con circunferencia amarilla.

Fuente: (Google Earth, 2013), editado por los autores.

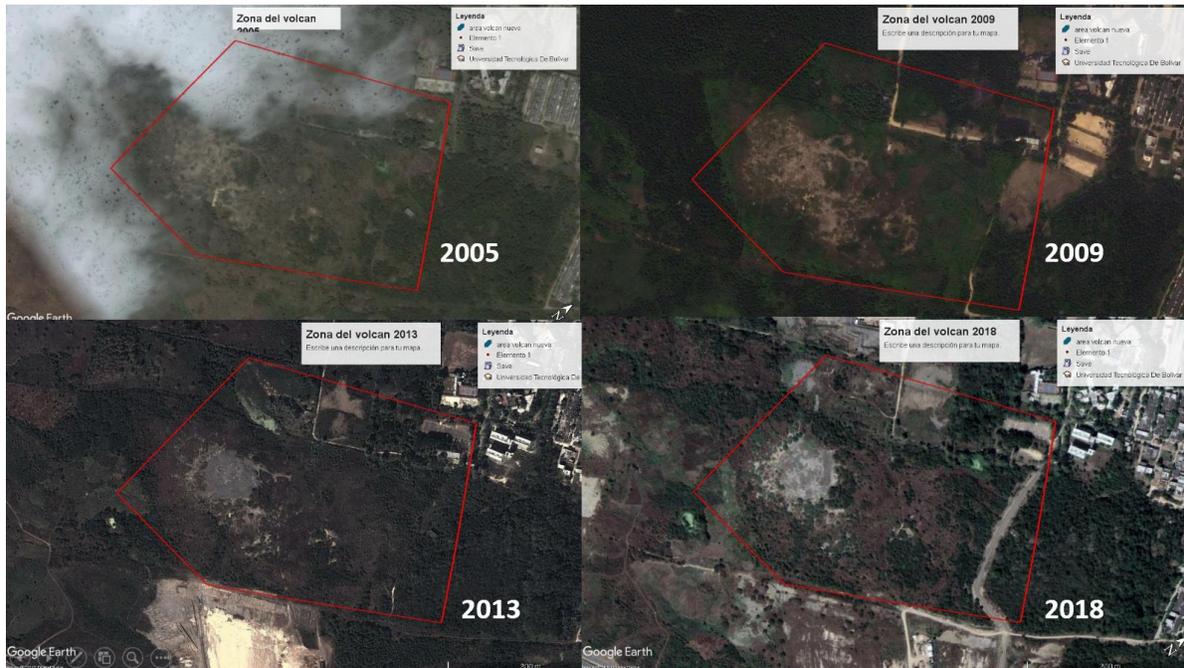


Ilustración 26. Fotografías aéreas El Rodeo año 2005, 2009, 2013 y 2018.

Fuente: Google Earth, editado por los autores.

De acuerdo a estas fotografías (ilustración 26) el cambio más relevante que se observa es el cambio de la zona domica donde primero se caracteriza por ser una zona con mayor cantidad de vegetación hasta el año 2013 donde se observa evidencia de lodos en un área de aproximadamente entre 1 ha a 1.2 ha, la fotografía más reciente indica que se pueden notar aún los residuos de lodos por lo que se podría inferir que se no solo se conservó el residuo de lodo sino que las bocas allí presentes tienen un flujo o una expulsión constante de lodo y se detuvo el crecimiento vegetativo.

5.3.1.3 Bocas de lodo identificadas

Para la identificación de bocas de lodo en la cual se realizo un recorrido al campo se georreferenciaron las bocas o manaderos y se clasificaron según Higgins y Saunders 1974, en Carvajal (2001), de acuerdo a la forma de estos y la pendiente de los flancos de los conos formados:

Tipo A = Cono con pendiente $> 20^\circ$



Tipo B = Cono con pendiente de 5 -20°

Tipo C = cono con pendiente <5°

Tipo D = Formas de caldera-Cráter de varios m de diámetro

Tipo O = Huecos ó cráteres de pocos cm de amplitud.

Conforme a lo ocurrido en el año 2013 cuando hubo una expulsión de 15.558 m³ aproximadamente (Servicio geologico colombiano, 2013). Durante dos emisiones provocó la formación de una meseta de 60m de diámetro aprox. Para el año 2005 del que no se tiene reportes de grandes emanaciones o erupciones se presentan una serie de bocas de lodos típicas, de tipo D en las que se caracterizan por ser huecas y de poco diámetro (ilustración 27).



Ilustración 27. Detalle bocas de lodo El Rodeo zona alta, 2005

Fuente: (Cruz Cordoba & Pajaro Diaz, 2005)



Ilustración 28. Boca de lodo zona alta con escorrentía año 2005

Fuente: (Cruz Cordoba & Pajaro Diaz, 2005)

En la parte superior de las mesetas de lodo formadas, se pudieron inventariar nueve bocas de lodo, cuatro de las cuales son de tipo B y C alineadas con en dirección NNW por donde se expelía gas de 5 – 10 burbujas de gas por minuto. Así mismo, se encontraron cinco bocas tipo O diseminadas y formando charcas de lodo por el sector Norte de las anteriores e igualmente hacia la parte externa de las masas de lodo extruidas, se encontraron bocas tipo O, algunas de las cuales se encontraron secas en el año 2013 (ilustración 29).





Ilustración 29 Bocas de lodo año 2013 El Rodeo

Fuente: (Universidad Tecnológica de Bolívar; Guilliam Barboza, 2013)

En la imagen se ilustran las bocas tipo O encontradas, así como las bocas tipo B y C encontradas como se indica en la primera fotografía y algunas ya secas como se muestra en la segunda fotografía.

Para el año 2018 algunas bocas de se encontraban cerradas y se identificaron entre 5 a 7 bocas de lodo de las que encontramos expulsando hasta 15 burbujas pequeñas de 5 cm de diámetro aproximadamente por minutos ilustración 30, este gas expulsado es desconocido, sin embargo, según Higgins y Saunders 1974 citado por (Carvajal, 2013), el metano es el gas predominante en este tipo de volcanes. Igualmente se presentan en este tipo de “volcanes”, trazas de etano, propano, butano y CO₂. Los resultados composicionales de los gases analizados en la ciudad de Cartagena de Indias, indican al igual que otros sectores del mundo, un predominio de metano con trazas de CO₂ ver Tabla 3.

ID	Aire % V	Aire_mg/L	CH ₄ % V	CH ₄ mg/L	CO ₂ % V	CO ₂ mg/L
14519-1	66,74	577,48	32,83	985,70	0,43	3,49

Tabla 3. Composición Química de gases del volcán de lodo de "El Rodeo".

Fuente: (Servicio Geológico Colombiano, 2010).



Ilustración 30. Emanaciones y burbujas de gas liberadas por las bocas ubicadas en los domos en El Rodeo, 2018.

Fuente: Autores.

Usando este criterio de Higgins y Saunders, el tipo de bocas hallado para el año 2018 no vario mucho conforme a lo descrito en el estudio realizado para el 2013 por Carvajal y Calderon ya que, no se ha registrado ninguna erupción hasta la fecha, a manera de extensión de las bocas por el contrario muchas de las bocas descritas en este estudio de 2013 identificaban las bocas tipo C y D, para este año (2018) la totalidad de las bocas eran tipo O (Tabla 4), la identificación de cada boca se hizo a través de la exploración de campo y la medición de cada boca teniendo un registro fotográfico (Anexo 10).



Numero	Ubicación	Diámetro	Tipo
1	10.366309, -75.465140	5 cm	O - Hueco de poca amplitud
2	10.366157, -75.465267	106 cm	O - Hueco de poca amplitud
3	10.365547, -75.466888	35 cm	O - Hueco de poca amplitud
4	10.365547, -75.466888	25 cm	O - Hueco de poca amplitud
5	10.365547, -75.466888	24 cm	O - Hueco de poca amplitud
6	10.365736, -75.466837	18 cm	O - Hueco de poca amplitud
7	10.365736, -75.466837	10 cm	O - Hueco de poca amplitud
8	10.366064, -75.467763	10 cm	O - Hueco de poca amplitud
9	10.366038, -75.467701	150 cm	O - Hueco de poca amplitud
10	10.365864, -75.467872	10 cm	O - Hueco de poca amplitud
11	10.365864, -75.467872	12 cm	O - Hueco de poca amplitud
12	10.365864, -75.467872	32 cm	O - Hueco de poca amplitud
13	10.365468, -75.466725	7 cm	O - Hueco de poca amplitud
14	10.365012, -75.467336	90 cm	O - Hueco de poca amplitud
15	10.365150, -75.467369	6 cm	O - Hueco de poca amplitud
16	10.365056, -75.467018	19 cm	O - Hueco de poca amplitud
17	10.365056, -75.467018	12 cm	O - Hueco de poca amplitud
18	10.366267, -75.467738	88 cm	O - Hueco de poca amplitud
19	10.366267, -75.467738	33 cm	O - Hueco de poca amplitud
20	10.366504, -75.467343	14 cm	O - Hueco de poca amplitud
21	10.366504, -75.467343	7 cm	O - Hueco de poca amplitud
22	10.366504, -75.467343	17 cm	O - Hueco de poca amplitud
23	10.366713, -75.467125	22 cm	O - Hueco de poca amplitud
24	10.366713, -75.467125	34 cm	O - Hueco de poca amplitud
25	10.366713, -75.467125	50 cm	O - Hueco de poca amplitud
26	10.366391, -75.467382	40 cm	O - Hueco de poca amplitud
27	10.366391, -75.467382	37 cm y 10 cm	O - Hueco de poca amplitud
28	10.366498, -75.467797	64 cm	O - Hueco de poca amplitud
29	10.367426, -75.464286	20 cm	O - Hueco de poca amplitud

Tabla 4. Inventario de bocas ubicación geográfica y tipología de acuerdo con Higgins y Saunders 1974.

Fuente: Los autores.



Ilustración 31. Bocas de lodo ubicadas en la parte superior tipo O El Rodeo, 2018.

Fuente: Autores.



Ilustración 32 Bocas de lodo tipo O ubicadas en la parte superior del domo, El Rodeo 2018.

Fuente: Autores.



Ilustración 33. Detalles de una de las bocas tipo O presentes en la parte SW año 2018.

Fuente: Autores.



Con el paso del tiempo la condición más notoria en la zona alta o domo principal es la meseta de lodo ya solidificada, incluso con algunas bocas cerradas, en el año 2013 se observa que, el lodo está fresco a diferencia de una vista hoy cuando esta formación ya es una superficie definida incluso con crecimiento de la vegetación como se puede ver en las siguientes imágenes del año 2013 y 2018 de la misma zona alta de El Rodeo.



Ilustración 34 Vista de las charcas de lodo formadas por varias bocas tipo O y C en la parte alta de los flujos de lodo 2013.

Fuente: (Carvajal & Calderon, 2013)



Ilustración 35. Zona alta de los flujos de lodo El rodeo año 2018.

Fuente: Autores.

A su vez se puede observar los desniveles generados por los estratos de lodos formados gracias a las debidas expulsiones, (ilustración 36).



Ilustración 36. desniveles en la zona por estratos de material de lodo en el domo del volcán de lodo de El Rodeo, 2018.

Fuente: Autores.

5.3.1.4 Fracturamiento del terreno

La actividad eruptiva del 2013 del “Volcán de Lodo” El Rodeo, ocasionó plegamientos locales y el fracturamiento y cizallamiento del terreno aproximadamente 150 - 300 m alrededor del límite del primer flujo documentado, con levantamientos y hundimientos diferenciales del terreno (ilustración 37) Tanto el fracturamiento generado como la zona de erupción principal se encuentra en un bloque levantado por la parte central del edificio “volcánico de lodo” principal, el cual se considera parte de un lomo de presión limitado por fallas de rumbo destrales de dirección 85°NE.

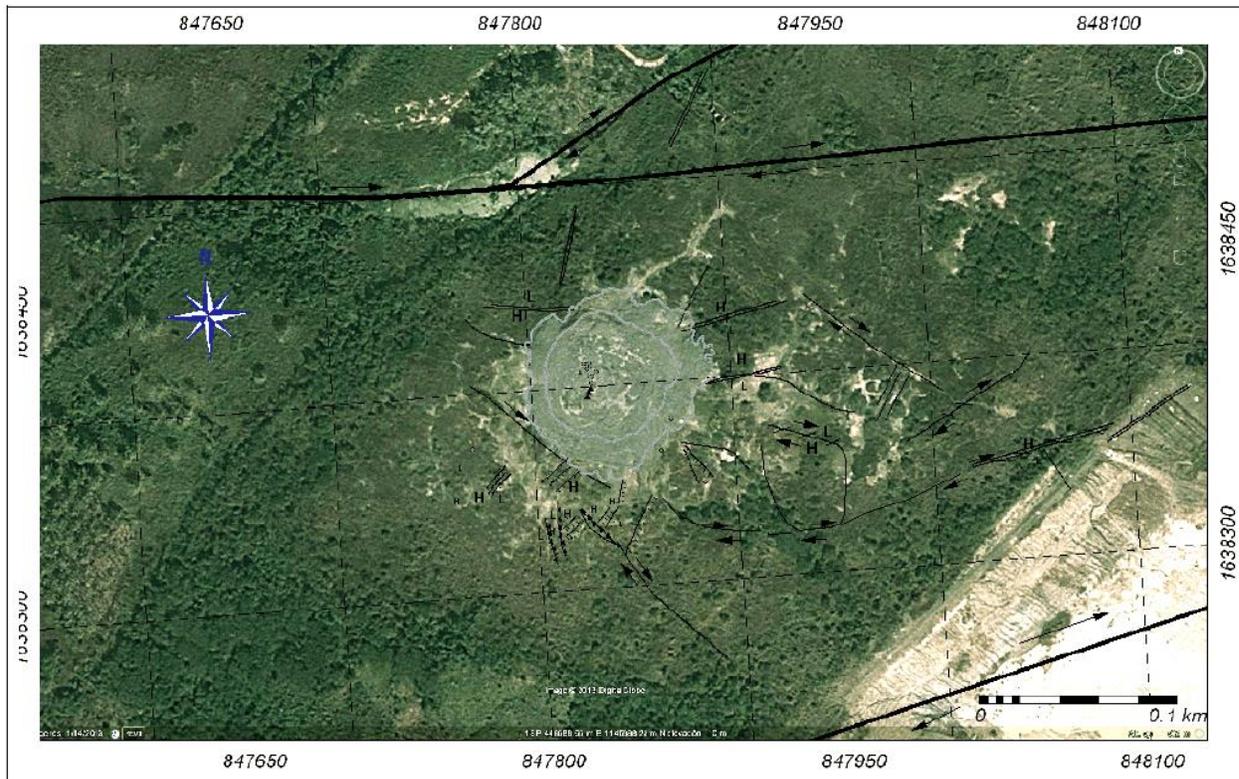


Ilustración 37. Detalles del fracturamiento en líneas negras finas, generado por los procesos eruptivos de lodo de finales del 2012 y comienzos de 2013.

Fuente: (Servicio geológico colombiano, 2013).

Este fallamiento regional corresponde a un sistema conjugado de fallas sintéticas asociados a la falla de Mamonal cuyo trazo se encuentra al occidente del edificio “volcánico de lodo” en dirección 55°NE , El fracturamiento generado durante la erupción, guarda en general la misma tendencia regional y está asociado con un fracturamiento y cizallamiento sinuoso de rumbo dextral de dirección $60^{\circ} - 75^{\circ}\text{NE}$, este último, particularmente hacia el SE de las mesetas de lodo formadas, ocasionando levantamientos y hundimientos locales de 0,5 – 0,8 m de altura. los eventos eruptivos evidenciados, se generó un hundimiento diferencial hacia el centro del cráter del “Volcán de Lodo” El Rodeo. El límite oriental de esta zona se encuentra limitado por fallamiento y cizallamiento de rumbo dextral con componente inversa local y con el bloque colgante elevado 0,5 – 0,8 m hacia el este (ilustración 37), Es importante reportar hacia la parte más distal, en el sector de la carretera circunvalar antigua, la ocurrencia de agrietamientos NE, posiblemente ocasionados por la distensión ocasionada por las excavaciones hechas para acondicionar estos terrenos para bodegas, que han dejado taludes entre 2 y 3 m de altura.



Ilustración 38. Hundimiento diferencial zona volcán de lodo, deforestación por quema de vegetación en la zona.

Fuente: (Servicio geológico colombiano, 2013).

Hacia la parte Sur y Sureste, en cercanías de los flujos de lodo recientes, los procesos de fracturamiento particularmente distensivo, son evidentes con la formación de agrietamientos y fallamiento normal escalonado de dirección en generala NW – SE (ilustración 37) Este fallamiento normal asociado con agrietamientos y hundimientos de 10 – 50 cm de altura se prolonga hacia el NW por debajo de os flujos de lodo y es posiblemente el que orienta en la misma dirección las bocas y ventosas de lodo encontradas en la parte superior de los mismos.

Es igualmente importante indicar, que este fracturamiento distensivo, se encuentra limitado hacia el sur por fallamiento de rumbo dextral de dirección NEE de 50 – 1 m de altura, el cual forma un patrón curvo hacia NE, dejando zonas hundidas a manera de cuencas de tracción. (ilustración 38), algunas de las cuales se encontraron con signos de acumulación de lodos en el momento de la visita secos asociados con un patrón de grietas de desecación hexagonales. Así mismo, se muestran localmente a lo largo de las fallas de rumbo, bloque levantados tipo Horst, que corresponden a lomos de falla 0,5 – 1m de altura y 4 – 5 m de largo en dirección NW - - SE, los cuales se encuentran limitados en uno de sus flancos por fallamiento inverso .



Ilustración 39. Grietas y hundimientos de 10 – 50 cm de altura, zona de volcán El Rodeo año 2013.
Fuente: (Servicio geologico colombiano, 2013).



Ilustración 40. cuencas de tracción año 2013 zona de volcán de lodo El Rodeo.
Fuente:(Servicio geologico colombiano, 2013).

El fracturamiento hacia el sector Suroccidental y Nororiental de las masas extruidas es menos denso pero relacionado con agrietamientos de 10 – 60 cm y localmente con profundidades de 1.5 – 2 m. Estos agrietamientos, presentan en general el mismo patrón de dirección NE encontrado en la parte distal suroriental, relacionado con agrietamientos de la misma dirección con el bloque NW hundido, el cual posiblemente corresponde a fallamiento antitético del ramal de dirección NE central que desprende de la falla de Mamonal y alinea drenajes, algunos de los cuales son represados y, localmente utilizados como abrevaderos de ganado (Ilustración 39 y 40). Hacia el lado de los tanques construidos para abastecer de agua a la urbanización el Rodeo, igualmente se evidencio deformación del terreno en dirección SE. Esta deformación asociada con pliegues anticlinales



de 50 – 60 cm de altura puede estar relacionada con fallamiento inverso, asociado con las fallas sintéticas que se desprende de la falla de Mamonal en dirección NE.

Es importante resaltar durante la visita por la parte alta del “Volcán de Lodo” El Rodeo, la ocurrencia de grandes zonas quemadas, particularmente por el costado Sur y Norte de las mesetas de lodo formadas durante las erupciones reseñadas de finales de 2012 y febrero de 2013. Estos sectores se caracterizan en general por ser ovalados en planta y de 1 – 4 m de diámetro. El origen de estas zonas quemadas es desconocido y pudo deberse al escape violento de gases que se quemaron durante los eventos eruptivos. No obstante, lo anterior cobra vital significado, independiente del origen natural o antrópico, dado el alto contenido de gases del área que pueden generar incendios de gran magnitud y porque no, acelerar los procesos eruptivos en estos sectores.



Ilustración 41. Direccionamiento de fallas y ramas desprendidas de la falla principal (Falla Mamonal), los puntos indicados indican la ubicación de surcos y cárcavas con el direccionamiento paralelo a la falla principal y que se extienden en toda la longitud de la urbanización.

Fuente: (Servicio geologico colombiano, 2013), (Autores, 2018).

Conforme al recorrido de campo en el año 2018, se pueden identificar estos fracturamientos y fallamientos anteriormente mencionados y evaluados por el SGC, en la zona central del lomo de presión se observa el material de lodo que forma una especie de meseta (ilustración 41), por otro lado, el fracturamiento escalonado que se observa en la ilustración 40 en esta misma zona



en sentido NW a SE, no se observa con la misma magnitud que para el año 2013, ver ilustración 43, esto se puede haber dado por la erosión del mismo material conforme a las lluvias dadas en ese lapso de 2013 a 2018, sin embargo se pueden observar los lomos en la superficie más alta cerca de las bocas de lodos, también se puede observar un cambio el crecimiento de la vegetación el cual ha ido incrementando.



Ilustración 42. Zona alta del domo de El Rodeo, presencia del crecimiento de vegetación para el año 2018.

Fuente: Autores.



Ilustración 43. Zona alta del domo de El Rodeo, Presencia de contenido de lodo.

Fuente: (Cardique, 2013).

Existen zonas que, son afectadas por el fracturamiento incluso por el proceso mismo de deforestación y erosión, en la parte baja del lomo de presión o bocas principales de lodo, se encuentra al NE ciertas superficies del suelo con presencia de surcos y carcavas señaladas con



los puntos amarillos en la (ilustración 41), el direccionamiento de estas están relacionadas a la falla que es paralela a esta, la “falla Mamonal”, la continuidad de estas conlleva gran parte del área ocupada por el barrio El Rodeo y Universidad Tecnológica de Bolívar, ver (ilustración 44).



Ilustración 44 Cárcavas georreferenciadas en el recorrido de campo del domo y sus alrededores en el volcán de lodo de El Rodeo, 2018.

Fuente: Autores.

Además de estas consecuencias por las condiciones geológicas, los fallamientos, fracturamientos, cárcavas, existen otras zonas en las que se ve afectada por la deforestación



o quema de la vegetación, que en algunos estudios anteriormente realizados por su cercanía a las bocas de lodos se distinguía como consecuencia de las erupciones.

El origen de estas zonas quemadas se desconoce y pudo deberse al escape violento de gases que se quemaron durante los eventos eruptivos, lo anterior cobra sentido dado el alto contenido de gases del área que pueden generar incendios de gran magnitud incluso disparar procesos eruptivos en estos sectores.

Sin embargo, para el año 2009 se registran zonas quemadas (ver ilustración 45), es decir antes de la erupción registrada a finales de 2012 e inicios de 2013 y para el año 2018 en el recorrido de la zona estudiada se reconocieron nuevas zonas donde hubo quema de la vegetación y conforme a la opinión de las personas cercanas, estas se deben a la intervención antrópica, como se estima la posibilidad de caza de algunos animales como conejos, la quema de árboles y ramas facilita esta actividad, pero como se mencionó anteriormente descartar el hecho de que algunas zonas quemadas se deban por la misma presencia de gases que se dan por la emanación de las bocas de lodos o por los fracturamientos ver Ilustración 46.



Ilustración 45. Alineamiento estructural que controla el drenaje superficial. Dirección N 30° E, predominante, paralela a la Falla de Mamonal 2009.

Fuente: (Pena, 2009).



Ilustración 46. Fotografía de la quema por acción antrópica tomada en febrero de 2018 Volcán El Rodeo.

Fuente: Autores.

5.3.2 Componente geológico - geotécnico

De acuerdo con la caracterización geológica se reconoce la zona con un suelo con depósitos aluviales y de llanuras aluviales (Q-al) del cuaternario, en la zona estudiada se han realizado diferentes estudios desde geotécnico hasta sísmicos con el fin de identificar la morfología de esta y el comportamiento de sí.

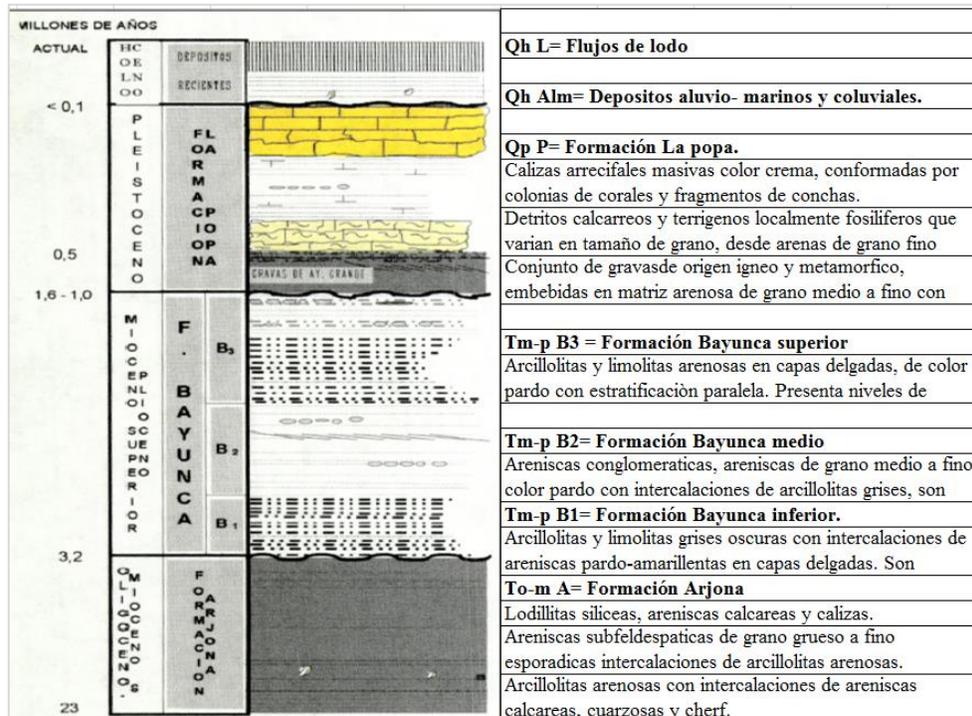


Ilustración 47. Columna litológica generalizada.

Fuente: (Ingeominas, 1996), editada por los autores.



En el año 1996 se realizaron mediciones de refracción sísmica y se obtuvieron perfiles geológico-geofísicos a través de las líneas sísmicas levantadas, para este caso solo se tomó una línea (Linea50), que abarca 2100m (ilustración 48 y 49).

De acuerdo con el levantamiento de la línea 50, se parte desde las rocas más antiguas teniendo un resultado como el siguiente:

Resistividades y materiales obtenidos.
Areniscas de la formación Arjona (To-m-A), con $V_p=2596 - 3302$ m/s
Arcillolitas del conjunto inferior de la formación Bayunca (Tm-m-B1) con velocidad de $V_p=1354$ m/s
Arcillas húmedas del conjunto inferior de la formación Bayunca (Tm-p-B1), Con velocidades $V_p= 1354$ m/s
Areniscas conglomeráticas poco cementadas y húmedas del conjunto medio de la formación Bayunca (Tm-p-B2), con velocidades $V_p= 1214 - 1391$ m/s.
Arcillolitas del conjunto superior de la formación Bayunca (Tm-p-B3), con velocidades $V_p = 1613 - 1958$ m/s.
limolitas, arcillas húmedas del conjunto superior de la formación Bayunca (Tm-p-B3), con velocidades $V_p= 1264 - 1573$ m/s.
Depósitos aluviales y marinos de edad cuaternaria (QhAlm), velocidades $V_p = 344$ a 661 m/s
Depósitos coluviales de edad cuaternaria (Qcol); velocidades $V_p = 365 - 498$ m/s.
Depósitos de lodo con velocidades $V_p = 398 - 528$ m/s.

Tabla 5. Descripción litológica línea 50, perfil de resistividades.

Fuente: (Ingeominas, 1996).

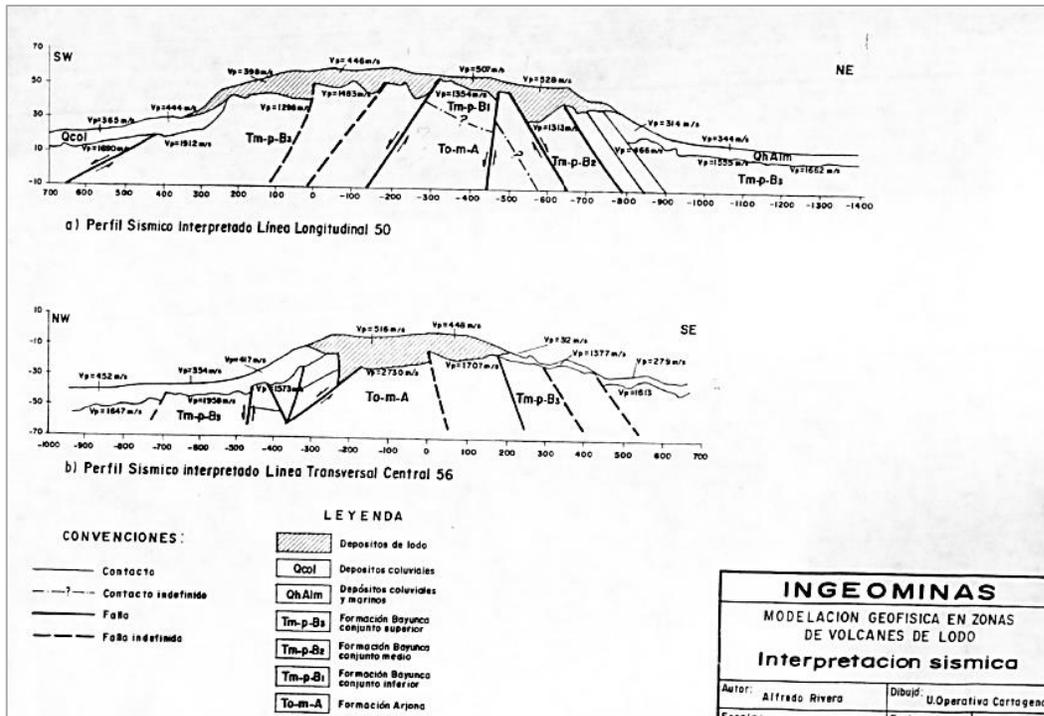


Ilustración 48. Modelación geofísica en zonas de volcanes de lodo.

Fuente: (Ingeominas, 1996).

De acuerdo a este perfil se puede observar que desde la cota 50 hasta la 70 aproximadamente existe un depósito de lodo, para la línea sísmica 50 (ver ilustración 48) del año 1996, es decir que gran parte de la superficie domica o la parte alta del lomo de presión es básicamente por la formación o solidificación del lodo que fue expulsado anteriormente, además de identificar en este la litología a la que pertenece este cuerpo de suelo se caracterizan con las formaciones Bayunca y Arjona, este levantamiento de la línea 50 es un corte paralelo a la dirección de la falla principal (Mamonal), que tiene ramales de fracturamientos que se desprenden de ella.

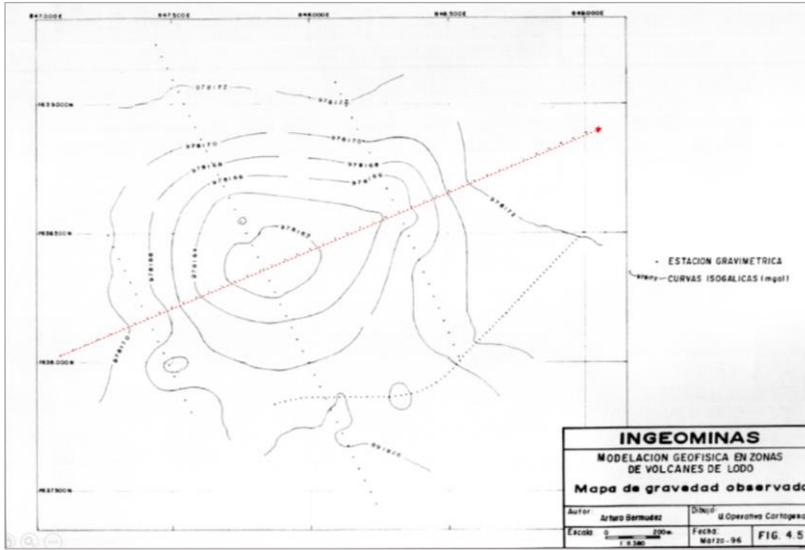


Ilustración 49. Mapa de gravedad observada línea 50, modelación geofísica en zonas de volcanismo de lodo.

Fuente: (Ingeominas, 1996).

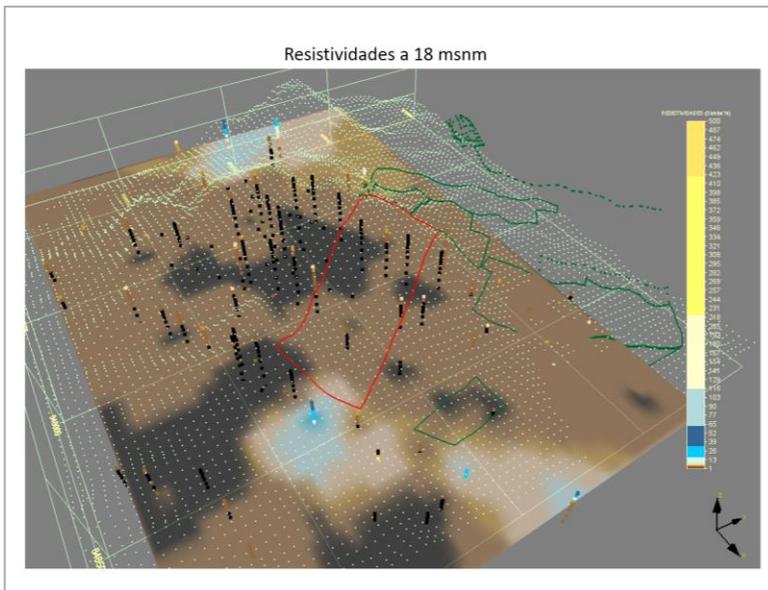


Ilustración 50 Imagen de resistividades realizadas en El Rodeo.

Fuente:(Universidad Tecnologica de Bolivar, 2010).

Las resistividades se muestran en la escala de la derecha y los colores negros son los lodos con resistividades menores de 1.0 Ohmios*m y que pasan paulatinamente a resistividades de 2.5 (pardos) para las arcillolitas de Bayunca. Posteriormente se pasa a valores entre 4.5



y 9 que se asocian a las limolitas de Bayunca. Resistividades mayores de 9 Ohmios*m involucran arenas materiales permeables y si sucesivamente se elevan se correlacionarían con las areniscas de Arjona que afloran por los lados de Tubos del Caribe. Colores amarillos son materiales secos, principalmente areno-limosos (Universidad Tecnológica de Bolívar, 2010), esta imagen es ilustrativa y se tiene poca información sobre los datos de la misma, sin embargo se estima la ubicación de esta conforme a la zona de mayor presión, es decir la zona 1 (Ilustración 50).

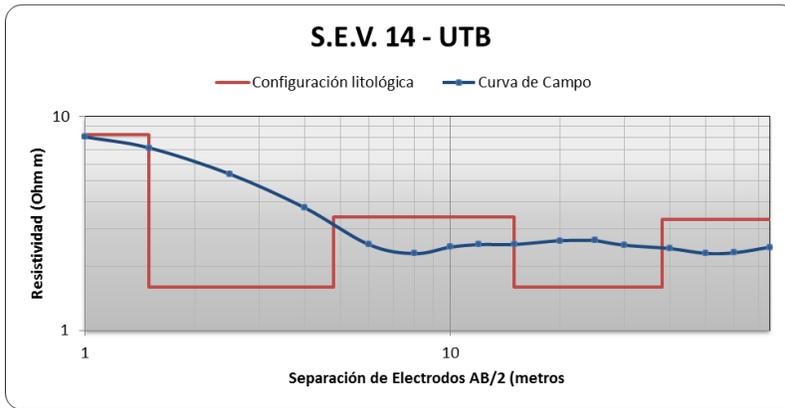


Ilustración 51 Sondeo eléctrico realizado, zona usada para la construcción de la via Utb-Variante.

Fuente: (Universidad Tecnológica de Bolívar, 2010)

Capa No.	Resistividad (Omh-m)	Espesor (Metros)	Profundidad (metros)	CORRELACION GEOLOGICA
1	8.2	1.5	1.5	Suelo seco
2	1.6	3.3	4.8	Arcillolitas con evidencias de lodo
3	3.4	10.2	15	Arcillolitas
4	1.6	23	38	Arcillolitas con evidencias de lodo
5	3.3	-	-	Arcillolitas

Tabla 6 Curva SEV 14.

Fuente: (Universidad Tecnológica de Bolívar, 2010).

Como se muestra en el cuadro anterior de los valores de resistividad obtenidos por la Tecnológica en el año 2013, el contenido de lodo y arcillas es apreciable desde la profundidad de 4.8m a 38m, estos sondeos son realizados en la zona 3, (Ilustración 57) donde se está construyendo la vía que comunica a la universidad, es decir que este lodo se



extiende desde la zona 1 que es la zona alta o de mayor presión hasta la zona 2, sin embargo para este estudio se desconoce la influencia de este para la zona urbanizada, pero de acuerdo a los patrones de fracturamiento y de agrietamiento del suelo en esta zona, se podría dejar abiertamente la idea de la presencia de lodos por debajo de esta.

5.3.2.1 Presión de expansión

La presión de expansión del material presente en la zona de estudio, en este caso arcilla se determinó por medio de la correlación que existe entre la presión de expansión (Ps), la humedad natural (Wn) , el limite liquido(LL) y el peso específico seco (γ_d) como lo muestra la ecuación 1. Los valores de presión de expansión para las diferentes muestras se logran ver en la siguiente tabla:

Muestra	Ubicación apique	Profundidad muestra (m)	LL (%)	γ_d (Ton/m ³)	Wn (%)	Ps (kg/cm ²)	Ps (kN/m ²)
1	10.370001, -75.464096	1.5	60.54	2.2	22.3	1.7962	179.6230
2	10.367902, -75.463422	1.5	59.7	2.3	22.8	1.9495	194.9575
3	10.366124, -75.465863	1.5	59.88	2.25	22.5	1.8556	185.5683

Tabla 7 Valores de presión expansión El Rodeo 2018 a 1.5m de profundidad.

Fuente: Autores

5.3.2.2 Potencial de expansión.

Los potenciales de expansión y contracción de un suelo están controlados por las características del suelo y los factores ambientales, y son estos últimos los determinantes de la expansión real de un suelo. El subsuelo en el casco urbano de la ciudad de Cartagena está constituido en su mayor parte por arcillas, producto de la meteorización tanto del conjunto inferior y superior de la unidad Detrítica de La Popa (Ingeominas, 2001).



Muestras	M1	M2	M3
Límite líquido LL	60.54 %	59.7 %	59.88 %
Límite plástico LP	27 %	25 %	26 %
Índice plasticidad IP	33.54 %	34.7 %	33.88 %
Presión de expansión	1.7962 kg/cm2	1.9495 kg/cm2	1.8556 kg/cm2

Tabla 8 Muestras ensayos de potencial de expansión El Rodeo 2018.

Fuente: Autores.

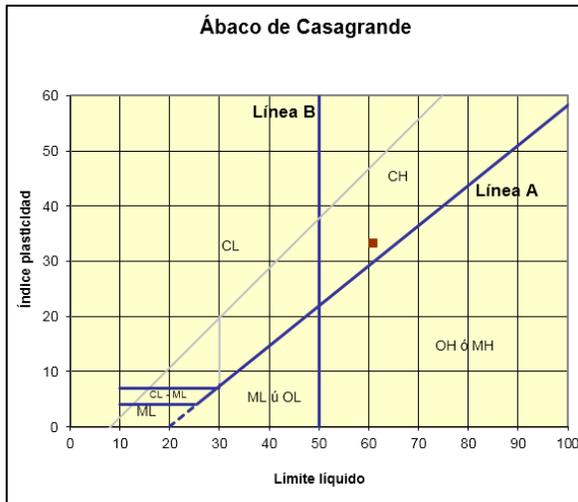


Ilustración 52 Abaco de Casagrande muestra 1 ensayo de potencial de expansión.

Fuente: Los autores

Grado de expansión	Índice de plasticidad		
	Holtz y Gibbs	Chen	Norma IS 1498
Und	%	%	%
Bajo	< 20	0 - 15	20 - 35
Medio	12 - 34	10 - 35	35 - 50
Alto	23 - 45	20 - 55	50 - 70
Muy alto	> 32	> 35	70 - 90

Tabla 9 Predicción del grado de expansión a partir del índice de plasticidad

Fuente: I. N. V. E.- 132.



Grado de expansión	Limite liquido	
	Chen	Norma IS 1498
Und	%	%
Bajo	< 30	20 – 35
Medio	30 – 40	35 - 50
Alto	40 – 60	50 – 70
Muy alto	> 60	70 – 90

Tabla 10 Predicción del grado de expansión a partir del límite líquido

Fuente: I. N. V. E -132

Al graficar los datos de límite líquido e índice de plasticidad en la carta de Casagrande se observó que estas arcillas presentan plasticidades clasificadas entre media y alta; de acuerdo a la Tabla 9, los valores para las muestras que tienen un rango entre 33.54 % y 35.93 % para el índice de plasticidad se trata de acuerdo a los autores descritos en esta tabla de la I.N.V E-132 un grado de expansión entre alto y muy alto; de acuerdo a los valores del límite líquido para las muestras tomadas que varían entre 59.7 % y 60.8 % se clasifican según I.N.V E-132 (tabla 10) de alto a muy alto.

5.3.2.3 Potencial de expansión alto

Al potencial de expansión alto corresponden los depósitos cuaternarios de origen marino aluvial, constituidos por acumulaciones predominantemente arcillosas de colores pardo y negro, de consistencia dura a firme, con índices de plasticidad y límites líquidos mayores del 35% y 50%, respectivamente, con pesos unitarios mayores de 2,0 ton/m³. El potencial de expansión y el cambio potencial de volumen que registran este tipo de material según INGEOMINAS son de potencial alto para valores mayores a 1,5 kg/cm². Las presiones de expansión obtenidas en estas arcillas arrojan valores mayores de 1,5 kg/cm² a 2 kg/cm².

5.3.3 Componente social y estructural

El crecimiento poblacional de la urbanización El Rodeo se vio reflejado desde 1998 cuando comprendía veintiséis (26) manzanas y trescientas ochenta y cuatro (384) viviendas de interés social (Ceballos, 2013).



Para el año 2005 en el que se realizó un levantamiento de daños para las viviendas de la urbanización se registraron quinientas ochenta y seis casas, compuestas así (Ilustración 54): 14 manzanas para el primer sector, 9 manzanas para el sector 2 y 7 manzanas para el sector 3 (Cruz Cordoba & Pajaro Diaz, 2005), para el año 2013 no se tiene algún inventario de casas ni de daños, sin embargo por medio del levantamiento de casas de 2018 y con fotografías aéreas de Google Earth podemos observar las manzanas y casas habidas para ese año (Ilustración 53). Dentro de la evaluación del agrietamiento de las viviendas y por la explosión de lodo que hubo a final del año 2012, se realizó un peritaje en el que se genero un dictamen que contiene el detalle constructivo de la urbanización El Rodeo (Tabla 11). Las especificaciones dictadas por el peritaje en el 2013, detalla los elementos estructurales con los que fue construida la urbanización (Tabla de peritaje), sin embargo, también se establece que en varias de las viviendas no se cumplió con la correcta colocación de columnas que confinaban los muros y la no colocación de estas, que además se estima que los agrietamientos presentes para la fecha se dieron gracias a estas falencias y a asentamientos diferenciales (Ceballos, 2013).

Elementos y procesos constructivos – Urb. El Rodeo
<ul style="list-style-type: none">• 8 sondeos• Estudio de suelo a 3.0m de profundidad• Arcilla parda blanda a 0.5m• Arcilla parda media a 1.2m• Arcilla parda dura a 3.0m• Descapote de 30 cm• Relleno tipo zahorra de 30 cm• Compactación en capas de 10 cm• Relleno para el correcto drenaje del agua• Cimientos superficiales• Vigas de amarre de 25x30• Muros block #4• Muros reforzados cada tres hiladas• Columnas• Drenaje pluvial, recolección de las casas a la vía con dirección a box culvert• Sistema de alcantarillado• Sistema de acueducto

Tabla 11 Dictamen pericial 2013 El Rodeo

Fuente: (Ceballos, 2013)



Año	Sector 1	Sector 2	Sector 3	Total
1998	166	213	0	379
2005	166	213	200	579
2013	166	213	238	617
2018	166	213	245	624

Tabla 12 Número de casas construidas por sector y por año.

Fuente: (Cruz Cordoba & Pajaro Diaz, 2005), (Ceballos, 2013), (Abraham & SENA, 2018), (Autores de la investigación, 2018).

Sin embargo, el crecimiento poblacional no se detuvo, (tabla 12) para el año 2013 en el que se reporta una erupción de lodos, ya habiendo limitado como amenazas la cota 30 del lado este y cota 45 del lado oeste, por medio de un peritaje se reconoce un crecimiento horizontal y vertical de la urbanización, muchas de las viviendas fueron reparadas y construidas con segunda y tercera planta, (Ceballos, 2013). Así como se observa en la Ilustración 54, las manzanas señaladas con color rojo no existían para el año 2005 pero se registró su construcción en el año 2013, en la Ilustración 53 se observan las manzanas que no se tenían registradas para el año 2013 pero sí al momento de realizar las encuestas y levantamiento de daños de esta investigación, es decir en febrero de 2018, lo que corrobora los datos del crecimiento urbanístico en El Rodeo indicado en la Tabla 12.



Ilustración 53 Levantamiento de casas del año 2018 sobre imagen aérea de Google Earth del año 2013 de la urbanización El Rodeo, en el mapa el color rojo señala las manzanas que no existían en el año 2013.

Fuente: Fotografía base tomada de Google Earth, levantamiento de casas tomada del programa de Topografía- SENA, editado por los autores.



Ilustración 54 Levantamiento de casas del año 2018 sobre imagen aérea de Google Earth del año 2005 de la urbanización El Rodeo, en el mapa el color rojo señala las manzanas que no existían en el año 2005.



Fuente: Fotografía base tomada de Google Earth, levantamiento de casas tomada del programa de Topografía- SENA, editado por los autores.

Finalmente se observó que el crecimiento de la urbanización fue por sector, específicamente hacia el sector tres, que es de hecho el sector mas cercano a las bocas de lodo y a las zonas de amenaza alta del volcán (Ilustracion 62).

Para la evaluación de daños de las viviendas se hizo un levantamiento representativo de los sectores 1 y 2 teniendo en cuenta el peritaje del año 2013 y el comentario de algunos habitantes, donde los sectores 1 y 2, que crecieron aproximadamente en un 55% verticalmente, presentaban fisuramientos superficiales, algunos por asentamientos; para el caso sector 3 que es el sector más afectado se hizo un levantamiento de las manzanas y casas presentes, con los que se logró hacer un mapa de daños de las viviendas para el año 2018 (Ver anexo 3), a través de una distinción de daños (Tabla 13).

Daños	Descripción
Sin daños	No presenta ningún daño estructural, no hay fisuramiento, no hay asentamientos.
Bajo	Fisuras en los muros no mayores a 6 mm, fisuramiento superficial.
Medio	Fisuras mayores a 6 mm o agrietamientos y hundimientos.
Alto	Desplome de elementos, asentamientos diferenciales excesivos, hundimientos y levantamientos en el suelo.

Tabla 13 Concepto de daños para el levantamiento de viviendas El Rodeo.
Fuente: Autores.



Daños de viviendas año 2005				
Sector 1				
Tipo de daño	Bajo	Medio	Alto	Total de casas
Casas	122	39	5	166
Porcentaje de daño	73.49%	23.49%	3.01%	100%
Sector 2				
Tipo de daño	Bajo	Medio	Alto	Total de casas
Casas	101	89	23	213
Porcentaje de daño	47.42%	41.78%	10.8%	100%
Sector 3				
Tipo de daño	Bajo	Medio	Alto	Total de casas
Casas	29	119	52	200
Porcentaje de daño	14.50%	59.50%	26.0%	100%

Tabla 14 Daños de vivienda año 2005, (Cruz Cordoba & Pajaro Diaz, 2005), editado por los autores.

Daños de viviendas año 2018					
Sector 1					
Tipo de daño	Sin daños	Bajo	Medio	Alto	Total de casas
Casas	0	166	0	0	166
Porcentaje de daño	0	100%	0.00	0.00	100%
Sector 2					
Tipo de daño	Sin daños	Bajo	Medio	Alto	Total de casas
Casas	0	213	0	0	213
Porcentaje de daño	0	100%	0.00	0.00	100%
Sector 3					
Tipo de daño	Sin daños	Bajo	Medio	Alto	Total de casas
Casas	48	172	18	7	245
Porcentaje de daño	19.59%	70.20%	7.35%	2.86%	100%

Tabla 15 Daños de vivienda año 2018

Fuente: Autores.



De acuerdo a los resultados (Tabla 14 y 15), se observa que, los sectores 1 y 2, pese a que tuvieron crecimiento vertical no se presentan daños graves o altos, pero el total de las casas presenta algún tipo de patología o daño leve como fisuramientos y esto se debe al mismo empuje del terreno en el crecimiento de diapiros, al fracturamiento dado por las fallas presentes y por el cambio volumétrico que se da por las arcillas sobre la que yacen estas viviendas, por otro lado el sector 3 el cual creció horizontalmente con nuevas viviendas con diferentes sistema estructural, estas casas que no presentaban fisuramientos contaban con zapatas, vigas de cimentación, columnas, vigas de amarre y muros reforzados; las casas que desde el inicio de la urbanización se mantuvieron con la misma estructura y pertenecían al sector 3, presentaban mayores daños, muros agrietados con un ancho mayor de 1mm, desplazamiento, hundimientos, por lo que se podría inferir que el estado de las viviendas pese a las condiciones geológicas y a la amenaza latente con la que viven el diseño de las mismas permitió el desarrollo o el deploramiento de las casas.

De manera general el porcentaje de daño se redujo para el año 2018 conforme a tipo de daño alto, pero aumento la cantidad de casas con tipo de daño medio, sin embargo, hay una nueva cantidad de casas que se presentan sin ningún tipo de daño (Ilustración 55).

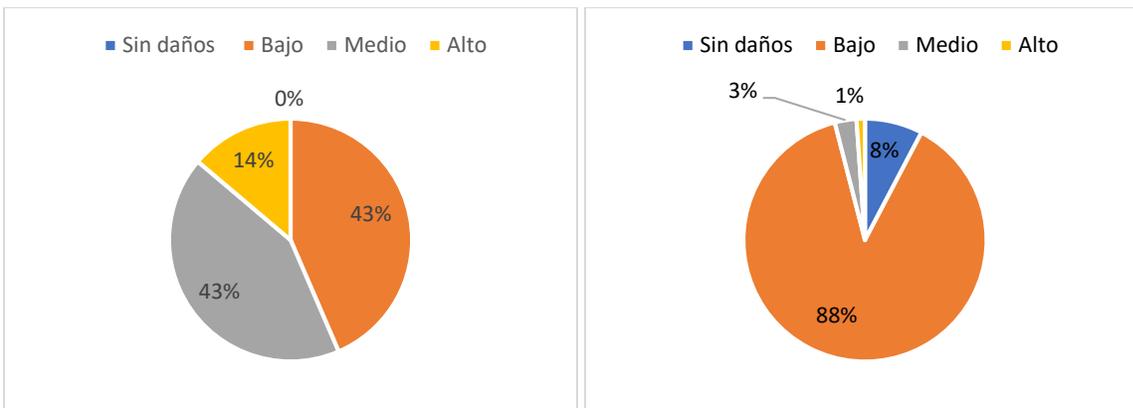


Ilustración 55 Total de daños urbanización El Rodeo – Año 2005 y 2018.

Fuente: Los autores.

Dentro de la información recolectada a través de encuestas se sabe que, de las 27 casas registradas no se presencian hundimientos excesivos, temblores, o desplazamiento, sin embargo para estas casas (sector 3), donde se ven mayormente afectadas por fisuras se observa



que, el tipo de fisura que se presentaban por lo general eran superficiales y otras estructurales de 45° de lo cual se puede inferir que si hubo un empuje horizontal que fisuraba las columnas y vigas y a su vez los muros. Sin embargo y conforme al dictamen del peritaje en el 2013, este empuje no tuvo una resistencia tal que evitara este tipo de patologías.

5.3.4 Componente topográfico.

La zona evaluada abarca cierto sector del municipio de Turbaco, Bolívar que colinda con la ciudad de Cartagena y contiene el barrio El Rodeo y la Universidad Tecnológica de Bolívar como se observa en la ilustración 56, esta área señalada con un polígono verde representa el área que abarca este estudio, con un perímetro de 3.9 km y 94.3 ha.



Ilustración 56 Área evaluada Barrio El Rodeo- Turbaco, Bolívar.

Fuente: Tomada de Google Earth, editada por los autores.

De acuerdo con los objetivos establecidos para esta investigación, la recolección de información primaria contiene levantamientos topográficos realizados anteriormente en la zona indicada (ilustración 56), en este caso las topografías que están sectorizadas o que no se relacionan en ningún punto están distinguidas como se muestra en la siguiente imagen (Ilustración 57).



A manera de análisis se realizó un levantamiento de puntos topográficos para la zona 1 y zona 3 (Tabla 16), que posteriormente fueron superpuestas con el uso perfiles para indicar y evaluar los cambios en la superficie.

Para este proyecto investigativo y de acuerdo a lo señalado en la ilustración 57, el área azul representa la zona identificada en El Rodeo como la zona con bocas volcánicas y contenido de lodo (zona 1) con 19.2 ha y 1.72 km de perímetro , la zona sombreada con color rosado representa el urbanismo o las viviendas presentes en el barrio (zona2) con 12.7 ha y 1.78 km de perímetro y el área sombreada con color amarillo representa la zona un estudio realizado por la universidad tecnológica de Bolívar para el diseño de la vía que la atraviesa la vía Mamonal (zona3) con 8.62 ha y 1.25km de perímetro .



Ilustración 57 Zonificación del área de estudio conforme a las topografías barrio El Rodeo- Turbaco, Bolívar.

Fuente: (Google Earth, 2017), editado pro los autores.



zonas	Área	Perímetro	Descripción
Zona 1	19.2 ha	1.72 km	Ubicación de bocas de volcanes y contenido de lodo
Zona 2	12.7 ha	1.78 km	Urbanización El Rodeo, ubicación de viviendas sectores 1, 2 y 3
Zona 3	8.62 ha	1.25 km	Sector vía Universidad Tecnológica de Bolívar

Tabla 16 Distinción de la zona por topografías barrio El Rodeo – Turbaco, Bolívar

Fuente: Autores

Comparación de perfiles para el cambio de la superficie.

Con el fin de analizar el cambio de la superficie se extrajeron perfiles de la topografía de la zona 1 y zona 3 (ilustración 57). Para la zona 1 se dispone información topográfica del año 2005 y 2018, para la zona 3 del año 2013 y 2018, es la información con la que se hace el respectivo análisis.

Los detalles topográficos se pueden observar en los respectivos mapas contenidos en esta investigación (Mapa topográfico 2005, 2013, 2018 El Rodeo-Turbaco, Bolivar).

Zona 1, sector del volcán o de presión más alta.

La zona 1 (Ilustración 58 y 59), es la zona principal o de mayor presión del domo, donde se presencian la mayor cantidad de bocas y evidencia de lodo, para esta zona se utilizaron perfiles tomados de información topográfica del año 2005 y 2018.

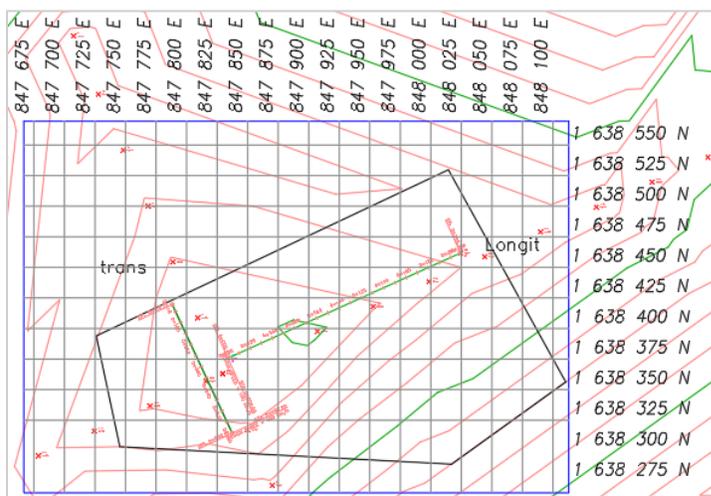


Ilustración 58 Area extraída para modelar de la topografía del volcán de lodo de El Rodeo año 2005.

Fuente: (Cruz Cordoba & Pajaro Diaz, 2005), editado por los autores.

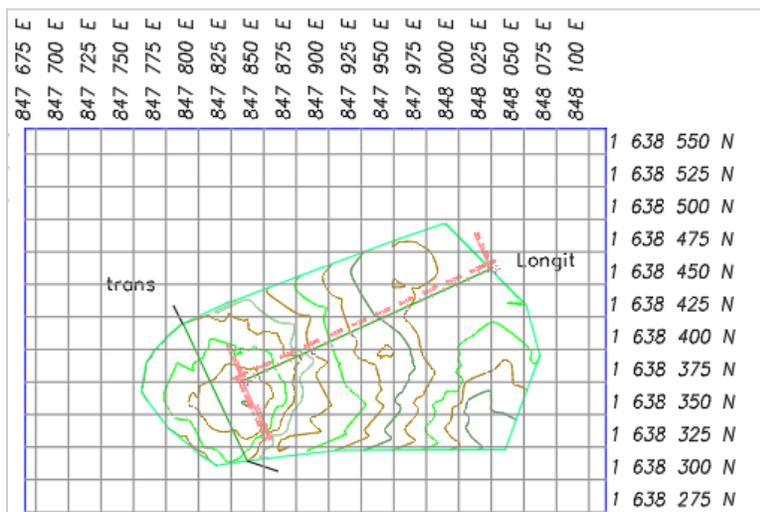


Ilustración 59 Area extraida para modelar de la topografía del volcan de lodo de El Rodeo año 2018. Fuente: (Cruz Cordoba & Pajaro Diaz, 2005), editado por los autores.

Para el año 2005, en el que no se tiene registros de erupciones de lodo pero sí evidencia de lodo, ya se había hecho entrega de las casas de la urbanización El Rodeo y de hecho se presencié un crecimiento urbanístico de 579 casas (Tabla 11), pese a que se establecieron restricciones por amenazas geológicas dado al mismo fenómeno de diapiroismo, se observa que para la zona del “cono volcánico”, había un cierto hundimiento en general hacia la cima de los edificios “volcánicos de lodo”, además se presenta una depresión a manera de cráter, en forma de artesa, la cual en el “Volcán de Lodo” El Rodeo, tiene un diámetro entre 200m – 400 m promedio.

Para el año 2011 de acuerdo a Calderón y Mendivelso, la superficie en esta zona era plana debido a intervenciones antrópicas realizadas para adaptar la zona a la vivienda, para el año 2013, de acuerdo a informes de Ingeominas, se detonan los cambios en la superficie ya que, para finales del año 2012 e inicios del 2013 se registró una erupción volcánica de 1000m³ a 3000m³, haciendo que la cota de nivel en la zona aumentara por la cantidad de lodo que se liberó en la fecha, en la Ilustración 60 se puede observar que, el perfil con color verde demarca el año 2018 y rojo 2005.



Ilustración 60 Superposición de perfil longitudinal zona 1 año 2018 identificado con color Verde y año 2005 identificado con color rojo, sector del cono volcánico principal de El Rodeo.

Fuente: Autores.

Para el año 2018, se observa el aumento del nivel conforme a la erupción, que se ratificó con la exploración de campo. Cuando estos perfiles se superponen se puede observar con mayor facilidad el cambio que sufre conforme al lodo presente, además se podría decir que dado al mismo comportamiento de deslizamiento por la lluvia el material se ha ido trasladando hacia la zona baja del domo así lo representa el perfil de línea verde, es decir año 2018 (Ilustración 60).

Esta variación en la topografía se ve en toda el área correspondiente al “cono del volcán” y también se debe a la característica geomorfológica del volcán donde los flancos son convexos con pendientes entre 15 y 25 grados y es igualmente característico el fuerte carcavamiento hacia la parte norte y en las vías que cruzan la estructura “volcánica de lodo”, así se hace notable el desplazamiento del material de lodo en esta zona, la siguiente imagen señala el cambio de la superficie de la zona volcánica a través de un perfil que atraviesa la misma (Ilustración 61).

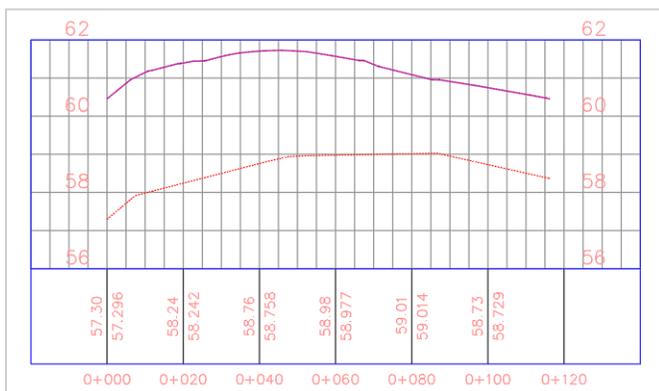


Ilustración 61 Superposición de perfil transversal zona 1 año 2018 identificado con color morado y año 2005 identificado con color rojo, sector del cono volcánico principal de El Rodeo.

Fuente: Autores.

Zona 3, sector vía Universidad tecnológica de Bolívar.

La zona 3 es el sector que es atravesado por la vía UTB, que conecta esta universidad con la variante Mamonal; al igual que para la zona anterior en esta se trazaron perfiles (ilustración 64, 65 y 66) para la topografía del año 2013 y del año 2018 para observar los cambios que ha sufrido conforme al crecimiento de diapiros e intervención antrópica. La información obtenida corresponde a los levantamientos realizados en el año 2013 (Ilustración 62) y al levantamiento realizado en este proyecto (Ilustración 63).

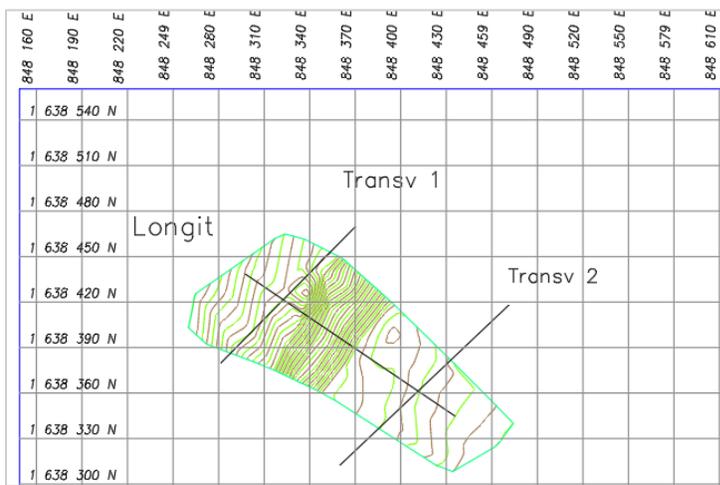


Ilustración 62 Trazado de perfiles longitudinal y transversal de la zona 3 vía UTB, tomada de la topografía del año 2013 El Rodeo.



Fuente: (Universidad Tecnológica de Bolívar; Guilliam Barboza, 2013), editado por los autores.

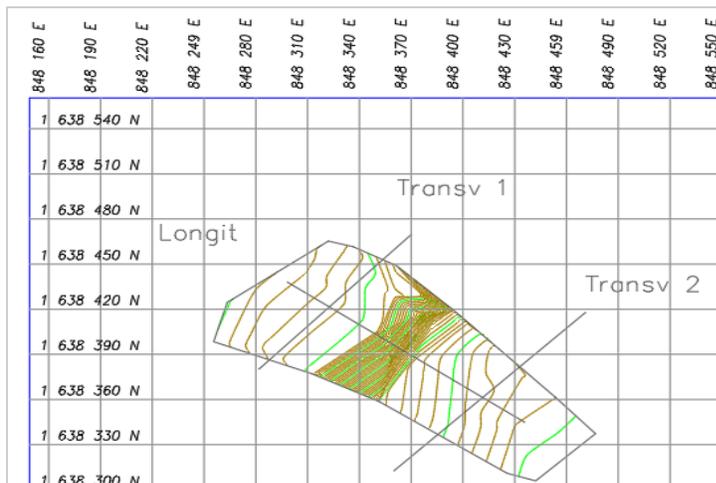


Ilustración 63 Trazado de perfiles longitudinal y transversal de la zona 3 vía Utb, tomada de la topografía del año 2018 El Rodeo.

Fuente: Los autores.

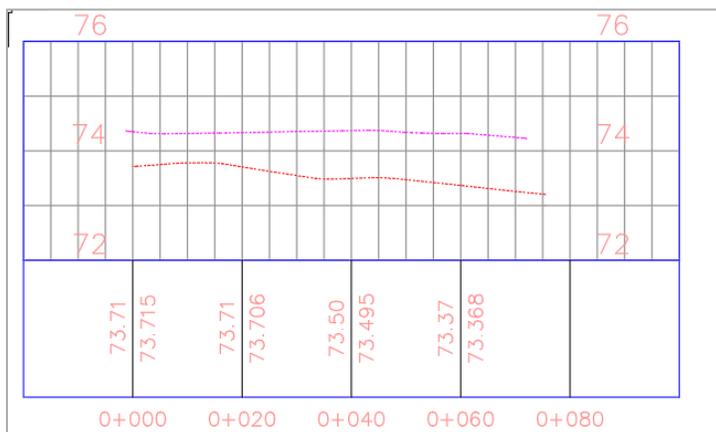


Ilustración 64 Superposición de perfil transversal 1 zona 3 año 2018 identificado con color morado y año 2005 identificado con color rojo, sector del cono volcánico principal de El Rodeo. Fuente: Autores.

La zona 3, la cual contiene la vía construida para conectar la Universidad tecnológica con la variante Mamonal, también ha sido usada para la instalación de bodegas, por lo que el terreno ha sido intervenido, además que para el estudio realizado por la universidad en el año 2013 se evidenció lodo en la superficie que presentaba cárcavas por la pendiente de la misma, de acuerdo a registros para la construcción de la vía Mamonal se presumía haber problemas por



la medición del nivel del terreno habiendo influido en esto la influencia del crecimiento de diapiros en la zona, para el desarrollo de la vía UTB, se puede observar que hubo un relleno y el nivel es “plano” con una diferencia de 30cm a 40cm (ilustración 64).

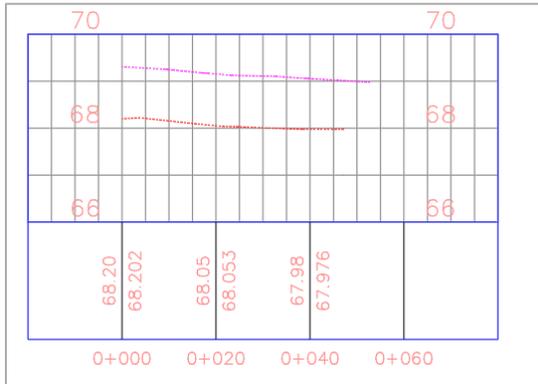


Ilustración 65 Superposición de perfil transversal 1 zona 3 año 2018 identificado con color morado y año 2005 identificado con color rojo, sector del cono volcánico principal de El Rodeo.

Fuente: Autores.

Cabe mencionar que en el año 2013 debido a los procesos antrópicos (cortes y rellenos con material seleccionado y de sitio) que se han llevado cabo en el lote de la UTB, a nivel superficial no se aprecian bocas o manaderos de lodo, pero si se presencié flujos de lodo hacia la superficie a través del material de relleno que son periódicos y otros esporádicos desde la cota 68 hasta la 69 (Ilustración 65), para el año 2018 debido a los rellenos y a el desarrollo de la reparación de la vía, no se evidencia más que el material de relleno.

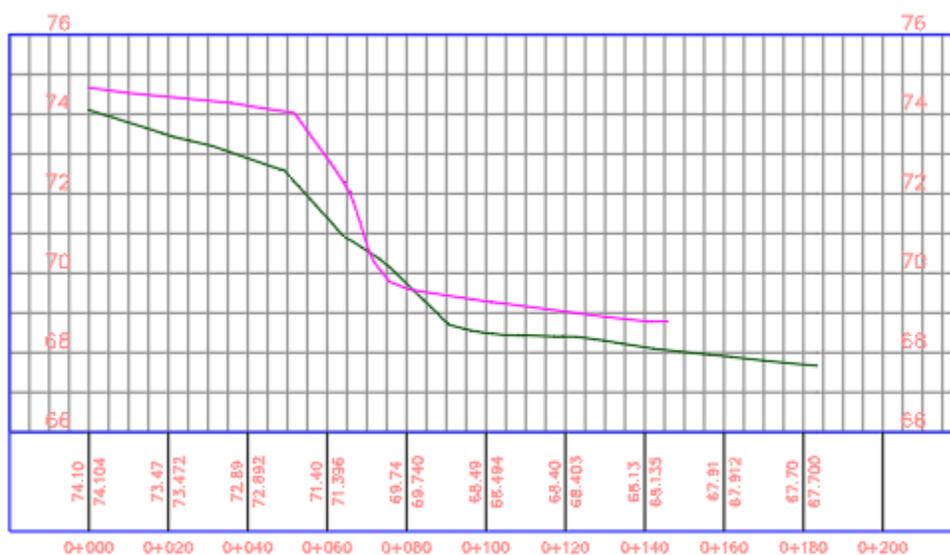


Ilustración 66 Superposición de perfil longitudinal zona 3 año 2018 identificado con color morado y año 2013 identificado con color verde, sector de la vía UTB.

Fuente: Los autores.

Para el perfil longitudinal (ilustración 66) se ve realmente el cambio de la superficie debido en este caso a la intervención antrópica, puesto a que, como se ha mencionado anteriormente este perfil es paralelo a la vía que sube a la UTB; el talud que demarca el perfil es intervenido y se observa una nivelación del terreno con referencia al talud tanto para el nivel superior en la cota 74 como para el inferior en la cota 68, conforme a la exposición de contenido y erupciones de lodo, para el año 2013 en el que se realizaron sondeos geoelectricos y se mostraron valores de resistividades con rangos entre 0,0 y 2,0 Ohm-m para profundidades de entre 3 y 50 metros que indican la presencia de material arcilloso gris con presencia de lodos inyectados y gases, estos podrían trasladarse desde las zonas de presiones altas hasta las zonas de presiones bajas por la diferencia de densidades en los materiales presentes.

5.3.5 Análisis de los resultados obtenidos en la modelación de la superficie en el ArcGIS.

Para evaluar los cambios que ha sufrido el área de estudio por los diferentes factores detonantes o contribuyentes, se modeló a través del software ArcGIS. las diferentes superficies o zonas



ya establecidas para analizar aspectos como: cambios en la superficie o puntos de elevación conforme a su topografía.

Como lo que se quiere evaluar es el cambio que ha sufrido la zona conforme al tiempo y los factores que lo contribuyen y detonan, se hace una comparación con los indicadores antes mencionados entre los datos de la zona de años anteriores y la actual.

Zona 1, sector del volcán o de presión más alta.

Para analizar el cambio de la superficie de la zona evaluada se toma un indicador que para este caso son las pendientes de la zona, utilizando el software mencionado primeramente con la topografía de la zona 1 o volcán de lodo del año 2005 (Ilustración 67) y la topografía del año 2018 (Ilustración 68). Cabe mencionar que estas imágenes que se observan a continuación están georreferenciadas a través de una grilla que indica los puntos cardinales.

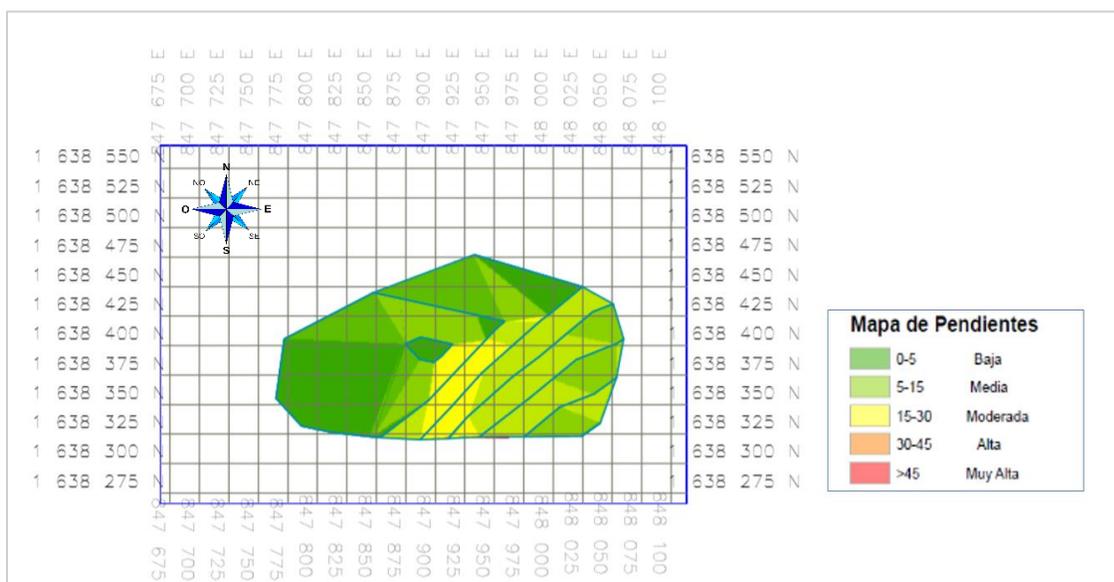


Ilustración 67 Modelación de las pendientes de la zona del volcán de lodo El Rodeo extraído de la topografía 2005, distinguidas por colores en los rangos indicado en la imagen.

Fuente: Los autores.

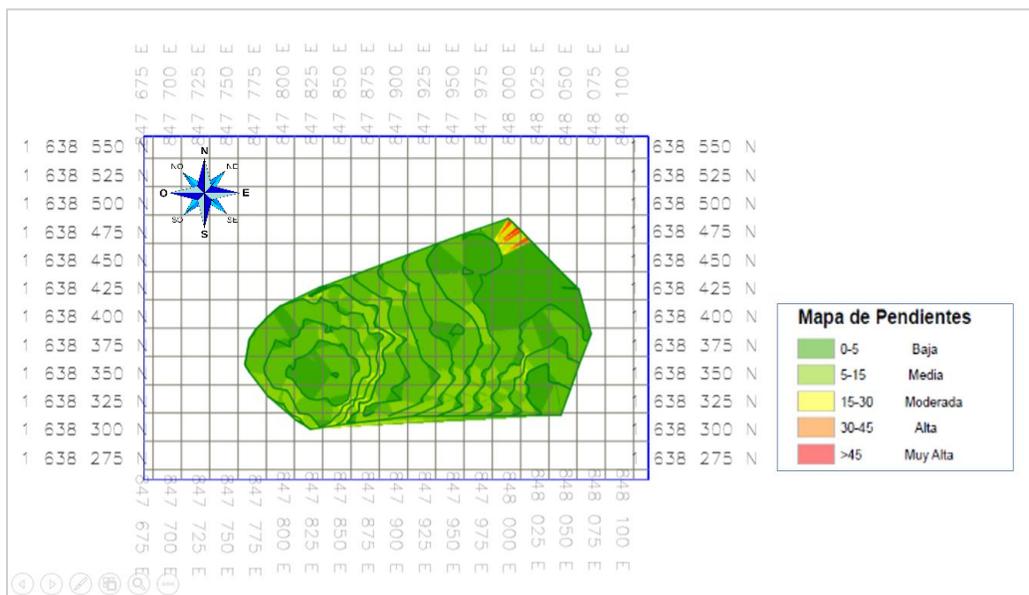


Ilustración 68 Modelación de las pendientes de la zona del volcán de lodo El Rodeo extraído de la topografía 2018, distinguidas por colores en los rangos indicado en la imagen.

Fuente: Los autores.

Al analizar el mapa de pendientes podemos observar que se presentó una variación a lo largo de estos años, de tal forma que las pendientes han pasado de ser moderadas a ser bajas en la gran mayoría de la zona estudiada, esto se podría deber al arrastre del material de lodo o las respectivas intervenciones antrópicas.

Para poder comprobar si el terreno ha sufrido cambios en su propiedad de cota a lo largo de ese periodo de tiempo se procedió a superponer los respectivos mapas de pendientes para el año 2005 y 2018 dando como resultado los siguientes valores (Ilustración 69).

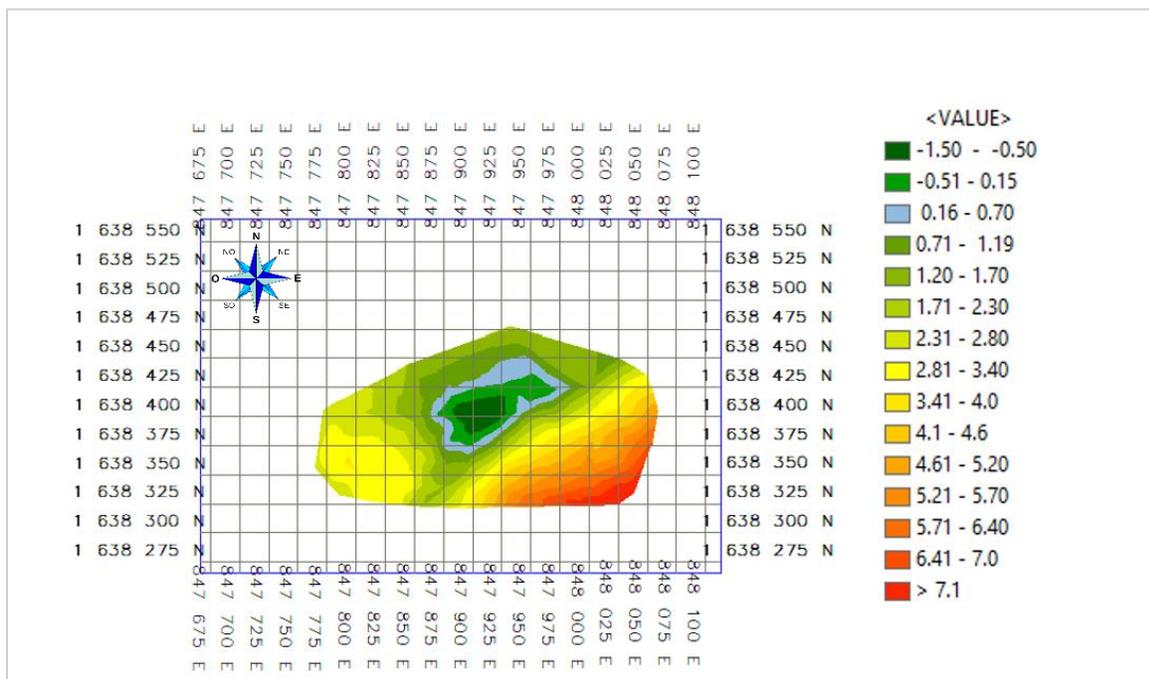


Ilustración 69 Superposición de la superficie del año 2005 y 2018 de la zona 1, en la que se refleja la diferencia de altimetría (m) de estas dos topografías.

Fuente: Los autores.

Con este resultado arrojado por el software ArcGIS se pudo observar que la zona ha sufrido mucha variación en su superficie, esta variación ha sido tanto positiva como negativa, esto lo podemos observar en el esquema donde nos presenta una gama de colores muy variada en donde los colores más fuertes como el rojo y amarillo, nos muestra que se ha presentado un aumento en la superficie, entre más roja sea la zona afectada su cambio o elevación será más significativo, además de esto se puede apreciar colores bajos en tonalidad de verde, estos colores muestran un cambio negativo debido a que la superficie en esta zona ha bajado su cota, por último podemos apreciar un color azul claro, el cual muestra que en esas zonas no se han presentado cambios significativos.



Zona 3, sector vía Universidad tecnológica de Bolívar.

El software ArcGIS desktop se utilizó para modelar o representar como ha sido el cambio de la superficie del área de estudio mediante diferencias de cotas usando las diferentes topografías de la zona en distintos años.

Una vez realizados los pasos planteados en la metodología obtenemos los siguientes resultados (Ilustración 70 y 71).

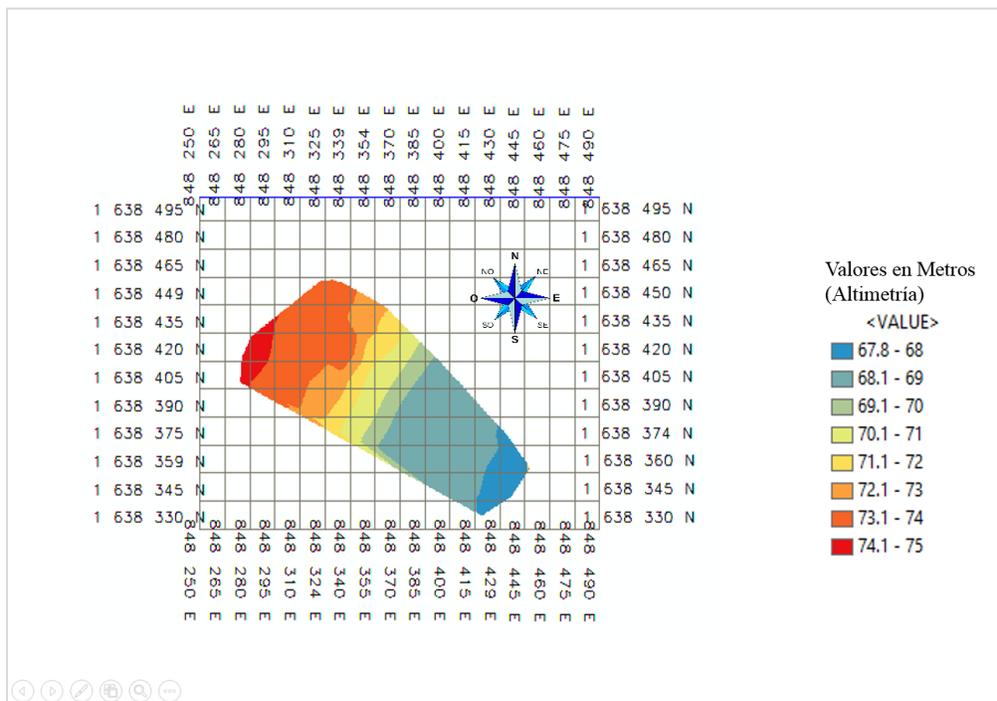


Ilustración 70 Modelación zona 3 El Rodeo Topografía 2013 a través de ArcGIS evaluada en metros.

Fuente: Los autores.

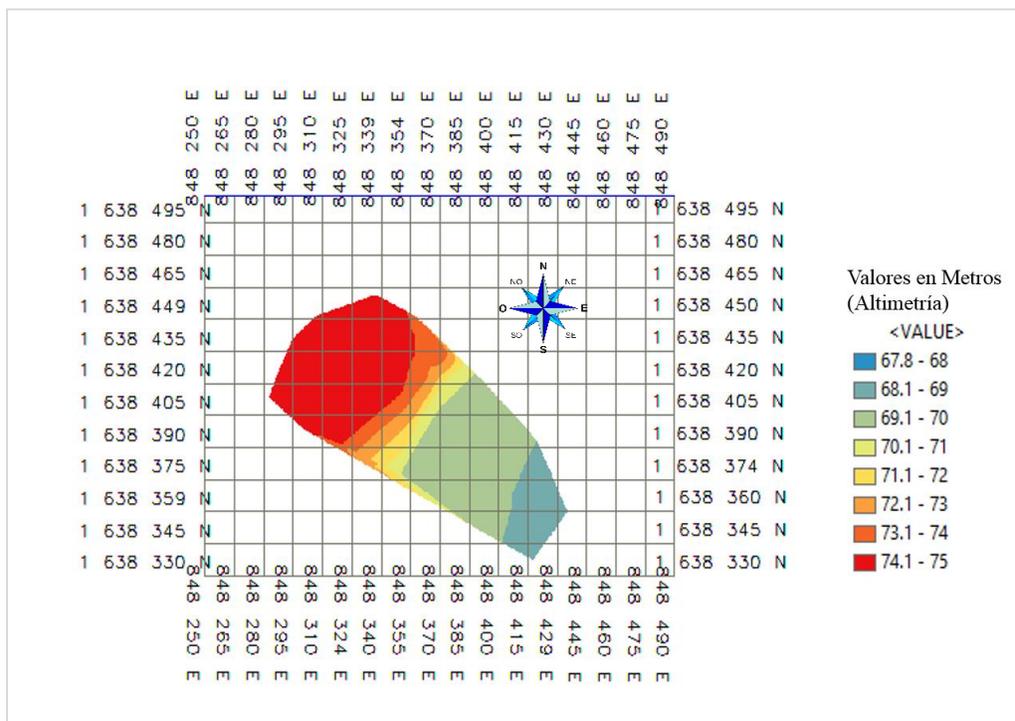


Ilustración 71 Modelación zona 3 El Rodeo Topografía 2018 a través de ArcGIS evaluada en metros.

Fuente: Los autores.

Para poder comprobar si el terreno ha sufrido cambios en su propiedad de cota a lo largo de ese periodo de tiempo se procedió a restar los valores de la topografía 2018 con los valores de la topografía 2013 dando como resultado la siguiente superposición con valores de altimetría en metros (Ilustración 72).

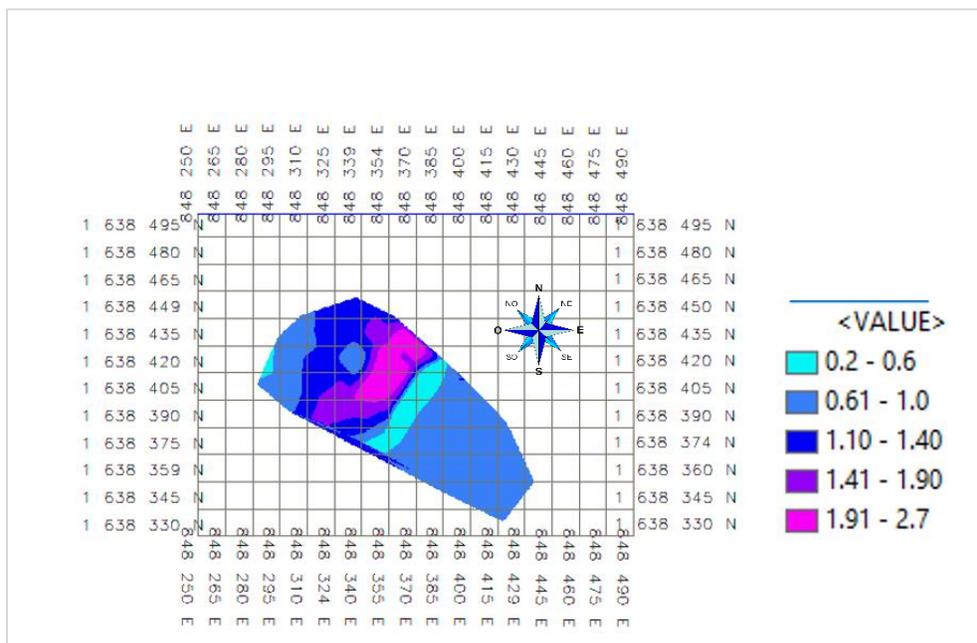


Ilustración 72 Superposición de la superficie del año 2013 y 2018 para la zona 3, en la que se refleja la diferencia de altimetría (m) de estas dos topografías.

Fuente: Los autores.

Con este resultado arrojado por el software ArcGIS se puede observar que la zona ha sufrido cambios en su superficie, este cambio ha sido en aumento de la superficie debido a que el esquema mostrado nos presenta un aumento en el nivel del terreno con color azul claro – hasta un color morado, lo que nos muestra la variación en la zona , donde el color claro nos muestra una variación menor que la presente en los lugares de color más oscuro ,en esta zona se puede apreciar que ha tenido cambios significativos a lo largo de los años de una manera cuantitativa se pueden ver las variaciones de los grados de las pendientes en la superficie de la zona 3 del año 2013 y 2018 (Ilustración 73 y 74).

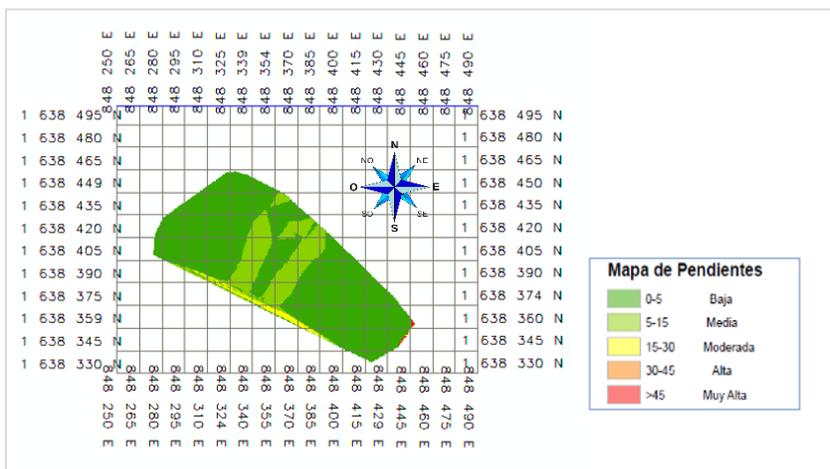


Ilustración 73 Modelación de las pendientes de la zona de la vía UTB (zona 3), cerca del volcán de lodo El Rodeo extraído de la topografía 2013, distinguidas por colores en los rangos indicado en la imagen.

Fuente: Los autores.

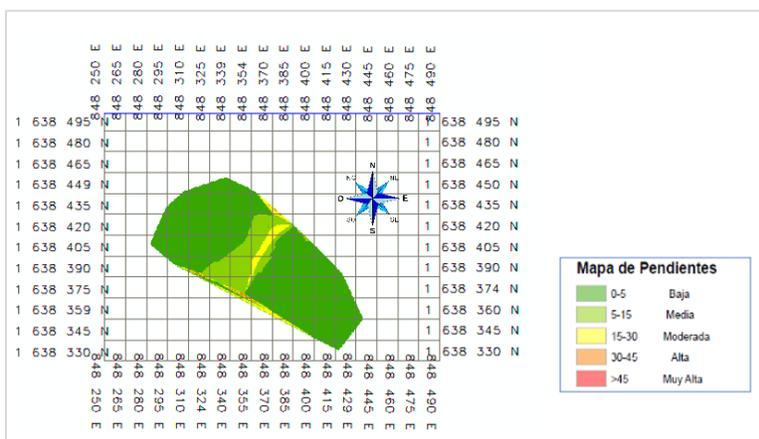


Ilustración 74 Modelación de las pendientes de la zona de la vía UTB (zona 3), cerca del volcán de lodo El Rodeo extraído de la topografía 2018, distinguidas por colores en los rangos indicado en la imagen.

Fuente: Los autores

haciendo un análisis de la información se puede notar que en la zona superior se ve un cambio de pendiente en su superficie pasando de una pendiente baja a una moderada, es decir que hay un incremento de las pendientes y esto puede verse relacionado conforme a la construcción de



la vía que conecta con la variante Mamonal que está en proceso de construcción para la fecha de esta evaluación.

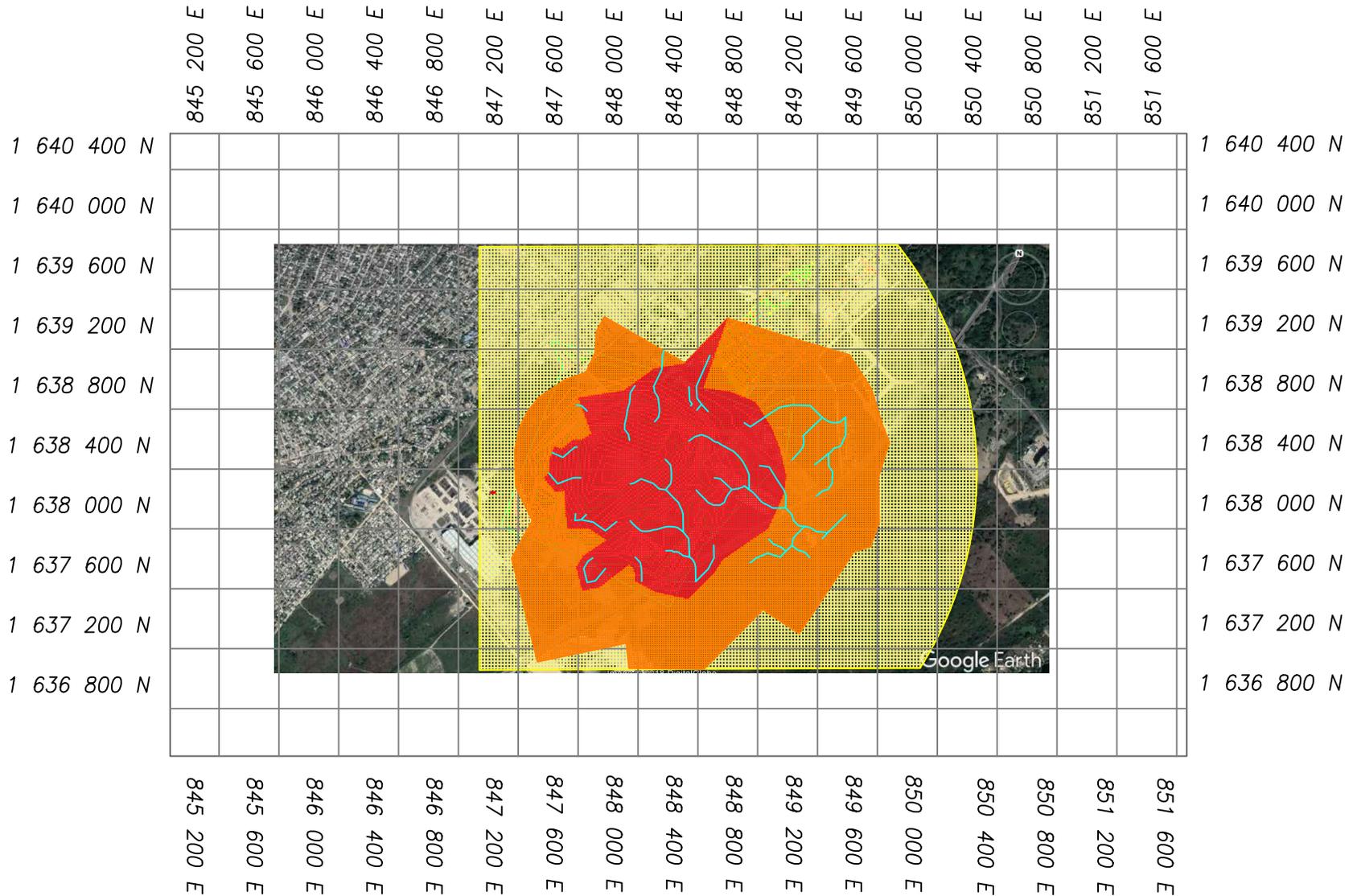
MAPA DE AMENAZAS

El mapa de amenazas desarrollado para esta evaluación se llevó a cabo utilizando como guía la metodología de INGEOMINAS para la zonificación geotécnica, aptitud del suelo en el casco urbano de Cartagena, Bolívar. A demás se tuvo en cuenta dentro del rango de la limitación espacial para este proyecto los drenajes del área que representan conforme a las condiciones de la misma zona donde se pueden generar emanaciones o erupciones (Ver Mapa de amenazas)

Zona de amenaza	Descripción
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.
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.
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.

Tabla 17 Clasificación de la zona conforme al tipo de amenaza, para la ubicación de volcanes de lodos.

Fuente: (Ingeominas, 2001).



MAPA DE AMENAZA URBANIZACIÓN EL RODEO

- Amenaza Baja
- Amenaza Media
- Amenaza Alta



Fuente: Tabatha Navarro Almeida
Adrian Ortega Martinez

Plano #2

Esc. 1: 1000

Proyecto de grado
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MORFODINAMICO Y GEOTECNICO
DE LAS AMENAZAS GEOLÓGICAS POTENCIALES DEL SECTOR
NOROESTE DE TURBACO (URBANIZACIÓN EL RODEO) DEL AÑO 2005 AL 2018

Ingeniero Guilliam Barboza Miranda
Director del Proyecto

Tabatha Navarro Almeida
Adrián Ortega Martínez
Investigadores



**Universidad
de Cartagena**
Fundada en 1827



Accreditación Institucional de Alta Calidad
Resolución 2583 del 15 de febrero de 2014. Ministerio de Educación Nacional



POSIBLES ESCENARIOS DE RIESGO ASOCIADOS CON FENÓMENOS DE ORIGEN GEOLÓGICO: DIAPIRISMO DE LODOS.

El “volcanismo de lodos” se constituye en una de las manifestaciones de un fenómeno geológico denominado diapirismo de lodos. Este proceso se genera por la presencia en profundidad de material arcilloso de características plásticas y gases en condiciones de alta presión, que se moviliza hacia la superficie a través de fracturas o zonas de debilidad, generando tanto levantamientos y fracturamientos del terreno, como expulsión de lodos y gases por bocas de variadas formas y tamaños. Los “volcanes de lodo” se muestran comúnmente como sitios donde la emanación de lodo es lenta y acompañada de un burbujeo intermitente de gas. Estos lodos se extienden lateralmente varios metros aprovechando la topografía del lugar (Servicio geológico colombiano, 2013).

En algunas ocasiones esta emanación debido a la presión con que suben estos materiales menos densos es rápida con erupciones violentas de lodo y bloques de roca, que se constituyen en amenazas para la comunidad como es el caso de la Urbanización El Rodeo. Estos eventos se presentan asociados a grietas en el terreno del edificio “volcánico”, generación de flujos de lodo encausados por los drenajes, o formando mesetas de varias decenas de metros de diámetro y alturas del orden de los 2 metros, lanzamiento violento de bloques rocosos en varias direcciones y localmente acompañadas de incendios generados por la ignición de gases (Servicio geológico colombiano, 2013).

Dentro de los posibles escenarios de riesgo y uno manifiesto en esta comunidad es el deterioro de las viviendas (fisuramientos, hundimientos) debido al mismo fracturamiento que vive el suelo, fuera de las características geotécnicas del mismo como lo es el alto grado de expansión. Dentro de las condiciones pesimistas el fracturamiento del suelo, el encauce de lodo en los drenajes y las intervenciones antrópicas que liberan al suelo de presión (Excavaciones y deforestación), podría generar en medio de una erupción rápida graves daños dentro de una zona envolvente de 50 a 400 m a partir del límite de susceptibilidad alta, siendo esta la constituida por las bocas principales y drenajes, fuera de esta área los daños se reducen, pero se presencia fracturamientos que podrían ser causantes de agrietamientos, fisuramientos y hundimientos en las viviendas.



ANALISIS DE LAS AMENAZAS Y ESCENARIO DE RIESGO CONCEPTUAL DEL VOLCAN DE EL RODEO.

- El diapirismo se puede asemejar como una manta de lodo que va rotando alrededor de las capas del subsuelo arrastrando consigo materiales menos densos que, debido a la presión con la que estos ascienden se dan expulsiones ya sean violentas o leves, de manera cuantitativa no se puede determinar el tipo de explosión del volcán de El Rodeo en este estudio, sin embargo observando el comportamiento del volcán y asociándolo con los resultados obtenidos aquí como, el incremento urbanístico, incremento de la deforestación y estado de las viviendas, se puede estimar que, en el sector 3 en el que el urbanismo aumento de no existir a tener 245 casas en 20 años, teniendo en cuenta que en este lapso hubo la erupción más violenta del volcán en el año 2012, aunque esto no indique que el aumento de intervenciones antrópicas causara la explosión violenta sí deja la posibilidad de que, al liberar de presión el suelo con las diferentes intervenciones la presión de erupción fuese mayor y por eso haya generado la liberación de mas de 1000m³ de lodo (Ingeominas, 2013).
- Conforme al comportamiento del lodo que asciende constantemente se podría decir que, entre mayor sea la emanación de lodo, burbujeo, cantidad de bocas, de agrietamientos, fracturamientos, es mayor la presión con la que ascienden los lodos y los diapiros que como se ha mencionado anteriormente son los cuerpos de materiales salinos que suben por su densidad, en el caso de El Rodeo donde en los últimos años luego de su última erupción violenta (año 2012), la emanación de lodos, gases, fracturamientos y agrietamientos ha sido leve y de manera constante por la reducción de las bocas de lodo, de la velocidad y tamaño de las burbujas de gases, se podría decir que no se corre con probabilidad de expulsiones violentas, sin embargo esto no es totalmente cierto puesto que, se debe considerar que el origen de los volcanes de lodos también se deben o se dan conforme al movimiento de las placas tectónicas y de las fallas en general de la zona, que para el caso es atravesada por la Falla Mamonal, este fracturamiento del suelo puede favorecer el ascenso violento de lodo y gas, causando daños en las zonas cercanas a las aperturas del suelo como lo es el sector 3 de la Urb. El Rodeo, la UTB y la variante Mamonal.



- El aumento de la urbanización en tanto a la evaluación de la amenaza ha permitido presenciar a través de las patologías en las viviendas el comportamiento del suelo, para el año 2005 la Urb. El rodeo presenciaba fisuramientos y agrietamientos de tipo alto y medio en un 14 % y 43% respectivamente, se redujo en el 2018 a 0.9 % y 1% respectivamente, aumentando a un 88% los daños de tipo medio que representan fisuramientos superficiales y en algunos casos estructurales de 45° que señalan un empuje horizontal del suelo, estimando un patrón del comportamiento o crecimiento de diapiros que en el arrastre de material empujan las capas de suelo causando este tipo de daños en las viviendas.
- Por otro lado, las características del suelo de El Rodeo permiten que las condiciones de urbanismo allí representen una amenaza ya que, se habla de un suelo con el potencial de expansión alto que logra que dentro del cambio volumétrico que sufre este se propaguen patologías en las estructuras de las viviendas con valores de Ps entre 1.7 kg/cm² a 1.9 kg/cm².
- Como menciona el Ingeominas se podría generar en medio de una erupción rápida graves daños dentro de una zona envolvente de 50 a 400 m a partir del límite de susceptibilidad alta, siendo esta la constituida por las bocas principales y drenajes, fuera de esta área los daños se reducen, pero se presencia fracturamientos que podrían ser causantes de agrietamientos, fisuramientos y hundimientos en las viviendas, es decir que las zonas cercanas tanto al domo principal como el sector 3 de la urbanización, la UTB y la vía que conecta la UTB con la variante Mamonal son las zonas que se verían mayormente afectadas en el caso de una posible violenta erupción, hablando de mas de 2000m³ de lodo aproximadamente y de gases que traerían consigo catástrofes ya que estas zonas como indican los mapas modelados en ArcGIS han variado la superficie de un 20 a 40% por las respectivas intervenciones y nivelaciones del terreno que propagan las respectivas emanaciones y/o expulsiones de lodo.



6 CONCLUSIONES

A través del estado general de la zona realizado en esta investigación con base a estudios anteriores se concluye que, el fenómeno de vulcanismo en la Urbanización El Rodeo está relacionado con el crecimiento de diapiros además de que está enmarcada dentro de la zona de convergencia de las placas Caribe-Suramericana y asociada al cinturón del Sinú, sus condiciones geológicas también están ligadas a fallas inversas y de rumbo que caracterizan la zona, particularmente la falla Mamonal de la que se desprende una falla de tipo dextral a la que se relacionan los crecimientos de lomos de presión al NE. Estas condiciones geológicas de la zona determinan en la misma una amenaza potencial, pero la Urbanización El Rodeo además del fenómeno de vulcanismo de lodo se caracteriza por tener suelos mayormente arcillosos con presencia de arcillolitas y lodolitas que se relacionan a la formación Bayunca, caracterizada por su alto grado de expansión y valores de presión expansión entre 1.5 kg/cm² y 2 kg/cm², que consecuentemente podrían generar patologías en las viviendas presentes como fisuramientos, agrietamientos y hundimientos, debido al cambio volumétrico que sufre el suelo.

Uno de los primeros causantes o el más importante para que se propicien daños a zonas y comunidades cercanas relacionados con amenazas de este tipo, es el indebido control de los factores que influyen y detonan las amenazas dejando en total manifiesto un posible escenario de riesgo.

Fuera de las condiciones geológicas mencionadas, existe un factor que contribuye al estado de la amenaza y es el descontrol del crecimiento urbanístico, así como de las intervenciones antrópicas relacionadas con excavaciones y deforestación. Dentro de esta investigación en la que se deseó evaluar el comportamiento de estos factores conforme al estado actual de la amenaza en la Urbanización El Rodeo, se manifestó por medio de un análisis dividido en componentes que, dentro del margen geológico el crecimiento de bocas está relacionado con la liberación de material con la presión suficiente a través de los respectivos fracturamientos o drenajes y para el caso de la Urbanización de la cual se tiene registro de erupción en diciembre de 2012, se denota un valor de bocas localizadas en la parte superior del lomo o cono volcánico y alrededor del mismo de 60 bocas tipo C, D y O en la clasificación de Higgins y Saunders, para el año 2018 a través de la exploración de campo se registraron 28 bocas tipo O lo cual



indica un decremento que se pudo haber dado por el arrastre de lodo favorecido por la pendiente y forma de la zona, así como la solidificación del material liberado que dejan en cubierto las bocas que pese a su poca amplitud la cual variaba entre 30 cm a 130 cm, están constantemente emanando gases evidenciado por la burbujas de apropiadamente 5 cm y lodo, en una situación semejante se localizaron los surcos y cárcavas en la parte inferior del volcán y los respectivos fracturamientos que variaban hasta 50 cm para el año 2013, una de las condiciones inesperadas para esta exploración fue el área deforestada por la quema que de acuerdo al relato de algunos habitantes se debe no a erupciones de fuego o de gases que provocaran la quema, sino a las diferentes intervenciones antrópicas realizadas en la zona, en la parte urbana evaluada se presentan agrietamientos que pueden no solo estar relacionados con el diapirismo sino con el cambio volumétrico del suelo ya que, se trata de un suelto con un alto grado de expansión de acuerdo a los resultados de las muestras tomadas, obteniendo índices de plasticidad entre 33.54 y 35.93 y el límite líquido entre 59.7 y 60.8 que predicen de acuerdo al I. N.V. E -125 y 126 un grado de expansión de alto a muy alto.

A través del componente social – estructural, se observó el incremento urbanístico de 529 casas para el año 2005 a 674 casas para el año 2018 con un crecimiento hacia el sector 3 que es el sector más afectado y con más cercanía al volcán. Se realizó un levantamiento de daño de las viviendas representativo en el que del 100% de las casas el 88% presentaban daños bajos, 8% sin daños presentados, 3% daños tipo medio y 1% alto, lo cual evidencia un cambio conforme al levantamiento realizado en el año 2005, sustentando un incremento en los daños bajos en un 51 %, las casas sin daño en un 8% y una disminución de los daños tipo medio en casi su totalidad y daños tipo alto en un 93%, el crecimiento y el deterioro de la urbanización estuvo parcializada hacia el sector 3, donde se presentan la mayor cantidad de daños en viviendas y el crecimiento urbanístico, para los sectores 1 y 2 el crecimiento fue vertical y conforme a los resultados de las encuestas realizadas, este cambio porcentual de daños se debe a la reestructuración mejorada de las viviendas a diferencia de las casas que presentan mayores daños y no han sufrido cambios significativos en su estructura. Teniendo en cuenta que la medida de daños fueron los fisuramientos y agrietamientos de los elementos estructurales de las casas.

Conforme al cambio de la superficie, a través del componente topográfico donde extrajeron perfiles topográficos del área del volcán para el año 2005 y 2018 y de la zona de la vía UTB-



Variante Mamonal para el año 2013 y 2018, se observó para la primera zona aumento de la altimetría como consecuencia de las respectivas erupciones del 2012 y un desplazamiento del material de la zona superior del “cono volcánico” favorecido por la forma de la superficie, además las pendientes que se pudieron observar a través de la modelación en ArcGIS variaron a ser mayormente moderadas entre 5-15 a ser mayormente bajas (0-5), para la zona 3 o la zona vía UTB-Variante Mamonal, que para la fecha de la toma de datos actuales se encontraban en construcción se observa un perfil en el que se denota un cambio en el talud presente (de pendientes bajas a moderadas) y relleno de material entre 10cm a 40cm en la parte inferior al talud, de este tipo de intervenciones no se podría decir con certeza como contribuyen a las amenazas geológicas, sin embargo las intervenciones antrópicas relacionadas con las excavaciones gracias a que le retiran presión al suelo, aumenta la rapidez con la que suben los materiales menos densos favoreciendo posibles erupciones violentas.

Finalmente, los factores establecidos en esta investigación (contribuyentes y detonantes), han evolucionado al modo de hacer emergente un control periódico del comportamiento de los diapiros, el suelo y fallas presentes y una delimitación de las intervenciones antrópicas y el crecimiento urbanístico como medida de prevención a la comunidad, ya que como se mencionó están ligados al estado de las amenazas geológicas potenciales presentes en la Urbanización El Rodeo.

Sin embargo conforme al INGEOMINAS, estos cambios son esperados conforme al comportamiento característico de los fenómenos presentes en la zona y a las respectivas intervenciones antrópicas que se han dado.



7 LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES

En este proyecto investigativo se llevaron a cabo actividades que se vieron limitadas por algunos factores que se describen en este capítulo, además de las respectivas recomendaciones para las investigaciones futuras relacionadas con la evolución de las amenazas geológicas potenciales conforme a los factores contribuyentes y detonantes.

7.1 LIMITACIONES

- No se han realizado muchos estudios que detallen los cambios morfodinámicos y geotécnicos de las amenazas potenciales en El Rodeo, por lo que se encontró poca información que complementara detalladamente el lapso determinado para esta evaluación.
- Se encontraron pocos estudios de detalles que relacionaran toda la zona evaluada, tanto el área del volcán de lodo como la urbanización, lo que implicó que la evaluación para este estudio estuviera sectorizada, a su vez la necesidad de obtener información primaria como levantamientos topográficos.
- Conforme a los ensayos geotécnicos realizados, para la obtención de los valores de presión expansión se presentaron inconsistencias en los resultados debido a los ajustes que se le debían hacer al aparato de lambe, lo que implicó el uso de información secundaria como referencia y corrección de los valores de la presión expansión.

7.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda llevar a cabo un monitoreo visual y de resistividades de los materiales mensual tanto en las bocas del volcán de lodo (activas e inactivas) como en las zonas de susceptibilidad alta, por lo que es importante el registro de fotos y su georreferencia tal como se realizó en esta evaluación.

Se debería llevar un control riguroso de la formación de agrietamientos y el surgimiento de nuevas bocas, además de registrar el tipo de erupción de lodo y emanación de burbujas de este, ya que se tendría una aproximación de la rapidez del flujo, (esta medición podría ser a través



de burbujas por minutos detallando el tamaño de estas). Además de reportar los posibles ruidos al interior de la estructura “volcánica de lodo”, este control debería acompañarse con apiques zonificados para evaluar el material liberado en las bocas.

Se recomienda a la vez del control de la estructura volcánica y demás emanaderos, un control o una supervisión de las viviendas por de los habitantes de estas para reportar la presencia de fisuras o el desarrollo de su amplitud tanto en espesor como en longitud, además de la sensación de movimientos o ruidos. Se recomienda la restricción de personas en menos de 200m alrededor de las bocas de lodo, como medida de prevención ante posibles escenarios de erupciones violentas.

Es recomendable desarrollar estudios geológicos, geomorfológicos, geofísicos, geoquímicos y geotécnicos detallados en el edificio "volcánico de lodo" y la urbanización El Rodeo de manera que se cubra la zona evaluada en esta investigación, asegurando la amplitud de la influencia de los fenómenos aquí presentes, con el fin de valorar el grado de las amenazas y riesgos geológicos asociados, así como el ducto generado por las fallas por donde se transporta el lodo generando posibles erupciones, además contemplando otros escenarios como movimientos en masa, eventos sísmicos y hundimientos, que corrobore y complemente el mapa de amenazas geológicas desarrollado en este proyecto de investigación.

Se recomienda principalmente a la comunidad la concientización al igual que los entes responsables la medida de educar e informar la exposición a la que se someten los habitantes conforme a la cercanía de la estructura volcánica, así como la implementación de la restricción rigurosa del crecimiento urbanístico.

También se recomienda un control riguroso de las respectivas intervenciones antrópicas relacionadas con excavaciones, perforaciones y deforestación que favorece a la rapidez de ascenso de flujo de materiales con menor densidad en forma de erupciones. Por lo que se recomienda que, se realicen estudios que relacionen la presión liberada por las respectivas intervenciones antrópicas conforme a la presión de los flujos de lodo.



8 BIBLIOGRAFÍA

- Abraham, C., & SENA. (2018). *Levantamiento de casas*. Cartagena de Indias.
- Ahmed Mokhtar, A. s. (2014). Lateral displacement and pile instability due to soil liquefaction using numerical model. *ScienceDirect*, 1019-1032.
- Alcaldía mayor de Cartagena. (2013). *Plan distrital de gestión de riesgo de Cartagena de Indias*. Cartagena de Indias.
- Aristizabal, C. (2009). Control neotectónico del diapirismo de lodo en la región de Cartagena, Colombia.
- Barboza Miranda, G. (2013). EVALUACIÓN GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA PARA LA DEFINICIÓN DEL NIVEL DE AMENAZA POR DIAPIRISMO DE LODO (VOLCANES DE LODOS) EN EL LOTE DE LA UTB UBICADO EN LA VARIANTE MAMONAL - TURBACO. Cartagena.
- Bates, R. a. (1987). *Glossary of geology (3d ed.* Alexandria, Va: American Geological Institute, 788 p.
- Bautista Manga, L. A., & Rada Lopez, D. (2015). *unicartagena*. Obtenido de unicartagena: <http://190.242.62.234:8080/jspui/handle/11227/1380>
- Bergman, j. (29 de abril de 2016). *ventanas al universo*. Obtenido de ventanas al universo: https://www.windows2universe.org/earth/geology/quake_4.html&lang=sp
- Berndt, C. (2007). Geological Controls on Fluid Flow from the Mercator Mud Volcano.
- Bonini, M. (25 August 2010). Mud volcanoes as potential indicators of regional stress and pressurized layer depth. *ScienceDirect*, 32-47.
- Cadavid y Rico, 1. (2007). *Universidad Nacional de Colombia*.
- Carvajal, J. H. (2013). *La actividad eruptiva del volcán de lodo el rodeo al sureste del casco urbano de Cartagena de Indias*. Bogota,colombia: Servicio geológico de Colombia.
- Chaverra, e. (29 de octubre de 2015). *Docslide*. Obtenido de Docslide: <https://docslide.com.br/documents/marco-teorico-inundaciones-y-sismos.html>
- Cruz Cordoba, J. G., & Pajaro Diaz, F. E. (2005). Evaluación geotécnica de las amenazas por diapirismo de lodos: caso sector sur casco urbano de Cartagena.
- docplayer. (noviembre de 2011). Obtenido de <http://docplayer.es/11911718-Caracteristicas-del-volcanismo-de-lodo-del-caribe-central-colombiano.html>
- Duque, c. (2008). Investigación del diapirismo de lodo y evolución costera del Caribe Colombiano Geomorfología Sector I.
- E.P.N. (s.f.). *Riesgo, Amenaza y Vulnerabilidad*. Obtenido de http://epn.gov.co/elearning/distinguidos/SEGURIDAD/13_riesgo_amenaza_y_vulnerabilidad.html



- El Universal. (26 de junio de 2017). *El Universal*. Obtenido de <http://www.eluniversal.com.co/cartagena/el-rodeo-19-anos-de-zozobra-esperando-reubicacion-256343>
- ESRI. (s.f.). *ArcGIS Desktop*. Obtenido de <http://desktop.arcgis.com/es/>
- Geografía. (30 de octubre de 2014). *Geografía*. Obtenido de Geografía: <http://geocobao.blogspot.com.co/2014/10/sismicidad.html>
- Geología Estructural. (2016). Obtenido de <http://perfosrt2016.blogspot.com.co/2016/05/diapiros.html>
- Geosoluciones. (s.f.). *Geosoluciones*. Obtenido de <http://www.geosoluciones.cl/surfer/>
- Google Maps. (2017). Obtenido de <https://www.google.com.co/maps/@10.3707846,-75.4638534,1077m/data=!3m1!1e3?hl=en>
- H. Tavera (Centro Sismológico del Perú). (s.f.). *upv*. Obtenido de <http://www.upv.es/dit/cefire/MedidasTerremoto.htm>
- IHS, Alcaldía mayor de Cartagena , & Universidad de Cartagena . (2010). *Valoración de los niveles de riesgo ambientales en el distrito de Cartagena*. Cartagena de Indias.
- INPRES. (2013). Obtenido de <http://www.inpres.gov.ar/desktop/>
- Instituto de Hidraulica y Sanitaria Ambiental, U. (2010). *Valoración de los niveles de riesgos ambientales en el distrito de Cartagena*. cartagena.
- Instituto nacional de prevención sísmica –INPRES, W. (. (2017).
- LAGEMAR - Universidad Federal Fluminense, I. d. (2009). “Control neotectónico del diapirismo de lodo en la región de Cartagena, Colombia”.
- Moratalla, N. L. (2008). *Biología y geología*. S.A. EDITEX.
- National Geographic. (2011). Obtenido de <http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/placas-tectonicas>
- Ordóñez, J., Auvinet Guichard, G., & Juarez Camarera, M. (agosto de 2014). Caracterización del subsuelo y análisis de riesgos geotécnicos asociados a las arcillas expansivas de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. *Scielo*.
- Pelgrain, 1. –B. (2007). *Informe Geomorfológico*. Bogota: Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá.
- POT Cartagena. (2001-2005). *Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Turístico y Cultural de Cartagena*. Cartagena. Obtenido de sigob.cartagena.gov.co:81.47.175.201/stodomingo/attachments/article/203/POT%20de%20Distrito%20Turistico%20y%20Cultural%20de%20Cartagena%20de%20Indias.pdf
- Preciado, J. (25 de noviembre de 2012). *suelos expansivos*. Obtenido de suelos expansivos: <http://suelosexpansivosntic1.blogspot.com.co/>



- Santolaria, P., & Casas, A. M. (2013). "Estructura y cinemática del sector occidental de las Sierras Marginales (Unidad Surpirenaica Central)" Zaragoza. España. *Dialnet*.
- Sentencia T-149/17. (s.f.). *corteconstitucional.gov.co*. Obtenido de <http://www.corteconstitucional.gov.co/relatoria/2017/T-149-17.htm>
- SGC. (2008). Investigación del diapirismo de lodo y evolución costera del Caribe Colombiano Geomorfología Sector I.
- SGC. (2016). *servicio geologico colombiano*. Obtenido de <https://www2.sgc.gov.co/Paginas/servicio-geologico-colombiano.aspx>
- SGC. (2017). *Volcanismo de lodo de el caribe central colombiano*. Obtenido de [https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadadas/Documents/PDF\(web\)Diapirismo.pequen%CC%83o.pdf](https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadadas/Documents/PDF(web)Diapirismo.pequen%CC%83o.pdf)
- SGC. (s.f.). *ultimos sismos*. Obtenido de <https://www2.sgc.gov.co/sismos/sismos/ultimos-sismos.html>
- Silvia, B. P. (s.f.). *portalhuarte*. Obtenido de Peligros Geológicos de Licuefacción de suelos asociados a Sismos: http://www.portalhuarpe.com.ar/medhime20/Talleres/TALLERES%20CUIM/Taller%2013/03%20licuefaccion/que_es_la_licuefaccion_de_suelos.html
- Soto, J. I., & A.R Talukder. (2004). Estructura y evolución durante el Mioceno del diapirismo de lodo en el sector septentrional de la Cuenca Oeste de Alborán (Mediterráneo occidental). *Dialnet*, 439-452.
- Surei, p. (6 de octubre de 2014). *geografia*. Obtenido de geografia: <http://geocobao.blogspot.com.co/2014/10/sismicidad.html>
- Tapia, C. A. (23 de septiembre de 2004). *Fuerzas de la Naturaleza*. Obtenido de Fuerzas de la Naturaleza: <http://www.oni.escuelas.edu.ar/2004/jujuy/470/sismos.htm>
- Universidad catolica de chile- instituto de geografia. (s.f.). *Geomorfologia dinamica y climatica*. Obtenido de Principios geomorfologicos: http://www7.uc.cl/sw_educ/geografia/geomorfologia/html/1_1_2.html
- Universidad Nacional de Colombia. (2007). Recopilación y síntesis de la información geológica y geomorfológica de la ecorregión del canal de Dique.
- Vernette, G. (1992). Mud diapirism, fan sedimentation and strike-slip faulting, Caribbean Colombian Margin. *Sciencedirect*, 335-349.
- Volcanpedia. (s.f.). *Volcanes. Enciclopedia especializada*. Obtenido de [Online] Volcanpedia, enciclopedia especializada.: URL <http://www.volcanpedia.com/volcanes-de-lodo>



**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MORFODINAMICO Y GEOTECNICO DE LAS AMENAZAS GEOLÓGICAS
POTENCIALES DEL SECTOR NOROESTE DE TURBACO (URBANIZACIÓN EL RODEO) DEL AÑO 2005 AL 2018**



Gutierrez Andrea L, (c. 2017) —Sí hubo alerta antes de construcción de El Rodeo. [Online] El Universal, Cartagena (Colombia). URL. <http://www.eluniversal.com.co/cartagena/diapirismo-un-enemigo-debajo-que-acecha-hace-19-anos-el-rodeo-257721>.



9 ANEXOS

Anexo1. Modelo de encuesta realizada urbanización El Rodeo – Sector 3, formato de encuesta usada.

Dirección: El Rodeo – Sector 3 M12 L5



- No. De Pisos:2
- Estado del Inmueble: Terminado
- Acabados: Estuco, buen estado
- Estructura: Muros, vigas, zapatas y columnas, losa entrepiso.
- Muros: Ladrillos, buen estado
- Cubierta: losa.
- Pisos: Enchapados
- Fachada: Estuco, buen estado
- Grietas y Fisuras: no
- Presencia de Humedad: no
- Hundimiento de pisos: no
- Desplazamientos: no
- Otra Observación: Buen estado



Anexo 2. Casa en buen estado sin daños sector 3 – El Rodeo



Anexo3. Casa encuestada El Rodeo sector – 3 Mz7 L4, estado de daño de medio a alto.



Anexo 4. Casa de esquina El Rodeo – sector 3 Mz 8, estado de daño de medio a alto.



Anexo 5. Casa de esquina El Rodeo – sector 3 Mz 9, estado de daño bajo.



Anexo 6. Crecimiento urbanístico El Rodeo - sector 3. Sin evidencia de daños construcción en desarrollo.