

**Informe de visita de emergencia al municipio de Puerto Escondido,
departamento de Córdoba**

Bogotá, D. C., junio de 2023



Dirección de
Geoamenazas

Servicio Geológico Colombiano

Julio Fierro Morales

Director general

John Makario Londoño

Director técnico de Geoamenazas

Nathalia María Contreras Vásquez

Coordinadora Grupo de Evaluación de Amenaza y Riesgo Geológico

Autores

Jorge Leonardo Chaparro Cordón – geólogo

Leonardo Méndez Barón – ingeniero civil

Julián Andrés Ceballos Hernández – geólogo

Víctor Daniel Ballén – químico

Apoyo técnico

Procesamiento Información Geoquímica

Zoraida Chacón Ortiz

Yeimy Rodríguez Molina

Sistemas de Información Geográfica

Luis Antonio Barrera Parrales

Citación: Chaparro J., Méndez, L., Ceballos J., Ballén V. (2023). Informe de visita de emergencia al municipio de Puerto Escondido, departamento de Córdoba. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.



© Servicio Geológico Colombiano. (2023). Esta obra es distribuida bajo licencia internacional Creative Commons Atribución/Reconocimiento 4.0

Contenido

Resumen	5
Abstract	6
Introducción	7
1. Alcances y limitaciones del informe	7
2. Localización	8
3. Antecedentes	9
3.1. Informe preliminar del deslizamiento de Puerto Escondido (Parra, 1989)	9
3.2. Geología de la plancha 50 Puerto Escondido, escala 1:100.000 (Ingeominas y Geotec, 1999; Ingeominas y Geotec, 2003)	11
3.3. Caracterización de los problemas de inestabilidad del terreno en el volcán de lodo de Puerto Escondido - Córdoba (Carvajal, 2001)	11
3.4. Mapa de amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 de la plancha 50 (SGC y UN-Medellín, 2015; 2016)	13
3.5. Plan básico de ordenamiento territorial del municipio de Puerto Escondido (Córdoba) (PBOT, 2016)	14
3.6. Estudio geoelectrico para identificación de acuíferos en el barrio Ciudad Futuro del municipio de Puerto Escondido, departamento de Córdoba (Servihídrica SAS, 2021)	16
3.7. Identificación y zonificación de áreas con condición de riesgo natural en planes de ordenamiento territorial de dos municipios priorizados del departamento de Córdoba (CVS, 2022)	16
3.8. Sismicidad histórica	16
3.9. Inventario y catálogo histórico de movimientos en masa	17
4. Características geológicas	18
4.1. Marco geológico regional	18
4.1.1. Características del volcanismo de lodo del Caribe central colombiano	21
4.2. Estratigrafía regional	26
4.2.1. Unidad Morrocoy-El Pantano (Ngmp)	27
4.2.2. Depósitos de flujo del volcán de lodo (Qfvl)	27
4.2.3. Depósitos aluviales y de playas (Qal; Qpl)	28
4.3. Geología estructural	28
4.4. Geología local	28
4.4.1. Suelo transportado de flujo del volcán de lodo (Stfvl)	29
4.4.2. Suelo residual de arcillolitas de la Formación Morrocoy (Sram)	32
4.4.3. Suelo transportado de coluvión (Stco)	33
5. Características geomorfológicas	34
5.1. Unidades geomorfológicas	34
5.1.1. Domo diapírico (Sdd)	34
5.1.2. Lomos (Sl)	34
5.1.3. Terraza marina (Mtm)	35
5.1.4. Lomo residual (Dlres)	35

6.	Caracterización de la precipitación	36
6.1.	Análisis exploratorio de la serie de precipitación	38
6.1.1.	Homogeneidad y estacionariedad de los datos	38
6.1.2.	Patrón temporal de la precipitación	39
6.2.	Análisis comparativo de las precipitaciones promedio multianuales	41
6.3.	Análisis comparativo de las precipitaciones promedio multianuales hasta el mes de mayo	42
6.4.	Análisis comparativo de las precipitaciones diarias previas al movimiento en masa	43
6.4.1.	Precipitación diaria	43
6.4.2.	Precipitación acumulada de 7, 15 y 21 días	45
6.4.3.	Análisis de la precipitación en los días posteriores al evento	46
6.5.	Análisis comparativo de precipitaciones diarias en eventos anteriores en el cerro Santa Cruz	48
7.	Caracterización del sismo	49
8.	Caracterización del movimiento en masa del cerro Santa Cruz	51
8.1.	Descripción del movimiento y clasificación	51
8.1.1.	Zona I: propagación lateral	52
8.1.2.	Zona II: flujo de tierra	58
8.1.3.	Zona III: deslizamiento	62
8.1.4.	Análisis multitemporal	66
9.	Caracterización geoquímica de gases, aguas y lodos en el sector cerro Santa Cruz	70
9.1.	Gases difusos en el suelo.	71
9.2.	Fisicoquímica de aguas	75
9.3.	Gases en manaderos de lodo, humedales y espejos de agua.	77
9.3.1.	Análisis composicional	78
9.3.2.	Eliminación de la influencia de gases atmosféricos	79
	Conclusiones	81
	Recomendaciones	83
	Bibliografía	84

Resumen

Este informe contiene las observaciones y resultados de la visita de campo realizada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) durante los días 31 de mayo y 01 de junio de 2023 al cerro Santa Cruz del municipio de Puerto Escondido (Córdoba), donde se evidenció un movimiento en masa detonado el 24 de mayo de 2023 por un sismo de magnitud 6,6, localizado por el SGC en la región fronteriza Colombia-Panamá, en aguas del mar Caribe, en las coordenadas 8,845 °N y 77,114 °W, con profundidad superficial (menor a 30 km). Geomorfológicamente, el área afectada corresponde a la ladera noroccidental de un domo generado por diapirismo de lodo, conocido como el volcán de lodo de Puerto Escondido, la cual presenta antecedentes de inestabilidad reportados en 1989 y 2001, evidenciados en depósitos coluviales.

Este movimiento de estilo complejo inició como propagaciones laterales múltiples desde la parte alta del cerro con pendientes menores a 10° y evolucionó a un flujo de tierra lento con dirección de movimiento hacia el noroccidente, cuya masa desplazada represó localmente el arroyo Ralos o Nevado que limita con el cerro Tortugón. Se estima una velocidad de desplazamiento de la masa de suelo de 50 cm/hora, lo que posiblemente desestabilizó la ladera suroccidental del domo, donde se generaron algunos deslizamientos que causaron la pérdida de banca de la vía hacia el cerro Santa Cruz. Este movimiento afectó un área estimada de 100 ha que obligó a realizar la evacuación de aproximadamente 1500 personas (dato del PMU del 11 de junio 2023), debido a los daños severos en viviendas y al avance del proceso. Esto afectó las actividades agropecuarias y ocasionó pérdidas económicas, así como repercusiones ambientales y sociales.

En el sector de Dos Caminos del cerro Santa Cruz se identificó un área anómala de 0,15 ha con coordenadas 9° 1'3.61"N y 76°14'56.21"W y altitud de 112 m.s.n.m., localizada a 1,3 km al nororiente del área urbana del municipio, con altas concentraciones de gas metano (CH₄) alcanzando valores máximos registrados del 70% y flujos de hasta 46013 g/m²d (gramos/metro cuadrado por día).

Abstract

This report contains the observations and results of the field visit carried out by the Colombian Geological Survey (SGC) during May 31 and June 1, 2023 to the Santa Cruz hill in the municipality of Puerto Escondido (Córdoba). In this area a large landslide was detonated by an earthquake on May 24, 2023, which it was located in the Colombia-Panama border region, at the Caribbean Sea, with coordinates 8.845 °N and 77.114 °W, and shallow depth (less than 30 km). Geomorphologically, the affected area corresponds to the northwestern slope of a dome generated by mud diapirism, known as the Puerto Escondido mud volcano, which presents a history of instability reported in 1989 and 2001, evidenced in colluvial deposits.

This complex-style movement began as multiple lateral propagations from the upper part of the hill with slopes less than 10° and evolved into a slow flow of land moving in a northwesterly direction, whose displaced mass locally dammed the Ralos or Nevado stream that limit with the Tortugon hill. A displacement speed of the soil mass of about 50 cm/hour was estimated, which possibly destabilized the southwestern slope of the dome, where some landslides were generated that caused the loss of the bank of the road towards the Santa Cruz hill. This movement affected an estimated area of 100 ha, forcing the evacuation of approximately 1,500 people (PMU data from June 11, 2023), due to severe damage to homes and the progress of the process. This process produced agricultural and economic activities affectation as well as environmental and social impact.

In the Dos Caminos sector of the Santa Cruz hill, an anomalous area of 0.15 ha with coordinates 9° 1'3.61"N and 76°14'56.21"W and an altitude of 112 meters above sea level was identified, located at 1.3 km northeast of the urban area of the municipality, with high concentrations of methane gas (CH₄) with maximum recorded values of 70% and flows of up to 46013 g/m²d (grams/square meter per day). .

Introducción

El Servicio Geológico Colombiano (SGC), en cumplimiento de su misión y como parte del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD), realizó una visita técnica para evaluar cualitativamente el riesgo en el que se encontraba el centro poblado de Puerto Escondido (Córdoba), luego de un movimiento en masa registrado en el cerro Santa Cruz, el 24 de mayo de 2023, cuando se presentó un sismo de magnitud 6,6, de profundidad superficial y con epicentro en el mar Caribe. Debido a la ocurrencia de este movimiento en masa, que afectó cerca de 100 ha, la Alcaldía municipal declaró la calamidad pública y procedió a evacuar al menos a 1500 personas de este sector rural.

La visita técnica fue adelantada los días 31 de mayo y 1 de junio de 2023, por profesionales en geología, ingeniería civil y química que integran los grupos de Evaluación de Amenaza y Riesgo Geológico y Evaluación Monitoreo y Diagnóstico de Dinámicas Geológicas, adscritos a la Dirección Técnica de Geoamenazas. Esta visita de diagnóstico tuvo como fin caracterizar el movimiento en masa mediante inspección visual en el terreno, realizar muestreos geoquímicos de las emisiones de gases reportadas posteriores al sismo y coordinar acciones futuras que permitan atender la emergencia.

Este informe contiene un análisis preliminar del movimiento en masa enfocado en los factores condicionantes y detonantes, evolución y aspectos descriptivos del estilo, distribución y morfometría, de acuerdo con las condiciones geológicas, geomorfológicas regionales y locales, así como la caracterización preliminar del muestreo geoquímico desarrollado para gases, lodos y aguas. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones al respecto.

1. Alcances y limitaciones del informe

Con base en la inspección y toma de datos en campo, el SGC realiza este informe técnico con el objetivo de presentar la caracterización general del movimiento en masa que ha venido afectando al municipio de Puerto Escondido. La información geológica, geomorfológica y geotécnica presentada se basa en observaciones puntuales de campo y recopilación de información secundaria, así como en los testimonios de personas que habitan la zona de influencia del movimiento en masa, de los profesionales de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge (CVS) y de la Alcaldía municipal, quienes realizaron recorridos diarios y monitoreo al movimiento en masa.

Por lo tanto, este informe no reemplaza la elaboración de estudios detallados que permitan conocer a profundidad la problemática del municipio de Puerto Escondido y así tomar las medidas oportunas para controlar o mitigar el riesgo de la población. No obstante, este documento aporta información útil para la toma de decisiones por parte de las entidades municipales, regionales y nacionales, con el propósito de definir las medidas de prevención necesarias y de mantener el estado de vigilancia ante cualquier cambio en la actividad del movimiento en masa.

Es importante considerar las siguientes limitaciones para el análisis de la información y la elaboración de este documento:

- El informe de visita de emergencia no supe los estudios básicos para suelo rural y urbano (escala 1:25000 – 1:5.000) y detallados para suelo urbano (escalas 1:2000) necesarios para el ordenamiento territorial o para definir las posibles medidas de mitigación o soluciones ante los efectos generados por la inestabilidad geológica del cerro Santa Cruz.
- La limitación de tiempo durante la visita realizada, no permitió elaborar análisis de las condiciones de inestabilidad a mayor detalle.
- Los resultados contenidos en este informe están sujetos a verificación con estudios más detallados y en ningún caso reemplazan la ejecución de actividades de investigación del subsuelo y levantamiento de cartografía detallada que permitan entender con mayor detalle la problemática de inestabilidad.
- En este informe se consideran características geológicas y geomorfológicas de acuerdo con la escala de los insumos utilizados, por lo tanto, es necesario realizar evaluaciones que consideren componentes geotécnicos, ambientales, sociales y económicos, entre otros.
- Los resultados obtenidos de la caracterización geoquímica son preliminares y corresponden a un rango temporal de muestreo realizado durante los días 31 de mayo y 01 junio del 2023.

Los principales insumos empleados para la elaboración del presente documento son:

- Ortofotomosaicos diarios del 30 de mayo al 3 de junio de 2023, elaborados por la CVS.
- Base cartográfica oficial en escala 1:25.000 de las planchas 50IVC, 50IIID, 50IIIB y 50IVA, del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).
- Modelo digital de elevación (MDE) Alos Palsar con resolución de 12,5 m/píxel y sus variables geométricas asociadas (pendiente, aspecto de ladera, mapa de sombras del relieve).
- Cartografía local elaborada por los profesionales del SGC durante las visitas de emergencia realizadas en 1989 y 2001.
- Geología de la plancha 50 Puerto Escondido de Ingeominas y Geotec (2003).
- Información de precipitación de las estaciones del Ideam, descargadas de <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>.
- Información de registro sísmico del SGC, descargada de <http://bdrsnc.sgc.gov.co/paginas1/catalogo/index.php>.

2. Localización

El municipio de Puerto Escondido está ubicado al noroccidente del departamento de Córdoba, sobre la costa Caribe, entre los golfos de Urabá y de Morrosquillo, aproximadamente a 50 km en línea recta desde Montería (figura 1). De acuerdo con la información cartográfica del IGAC, el municipio cubre un área de 41147 ha aproximadamente, ocupando parte de las planchas 50IIIB, 50IIID, 50IVA, 50IVB, 50IVC, 50IVD, 60IB y 60IIA a escala 1:25.000. El casco urbano del municipio cubre un área de 268 ha aproximadamente, donde habitan cerca de 4863 personas.

Este municipio limita al norte con el municipio de Moñitos, al nororiente con el municipio de Lorica, al oriente con San Pelayo, al suroriente con Montería, al sur con Los Córdoba y al occidente con el mar Caribe. Se destacan hidrológicamente las quebradas de Yuca y Costanera, las cuales fluyen directamente al mar.

El sector afectado por el movimiento en masa se localiza al oriente del centro poblado de Puerto Escondido y corresponde a la ladera de una estructura dómica del volcán de lodo. Se conoce localmente como cerro Santa Cruz y para llegar hasta allí, se debe tomar una vía rural que sale de la cabecera municipal por el barrio Miramar. En la parte alta del cerro Santa Cruz se encuentra el sector Dos Caminos, que corresponde a una bifurcación de la vía veredal. Este cerro limita al norte con el cerro Tortugón por el arroyo Ralos o Nevado, cuyo nombre fue referenciado por Parra (1989) y Carvajal (2001).

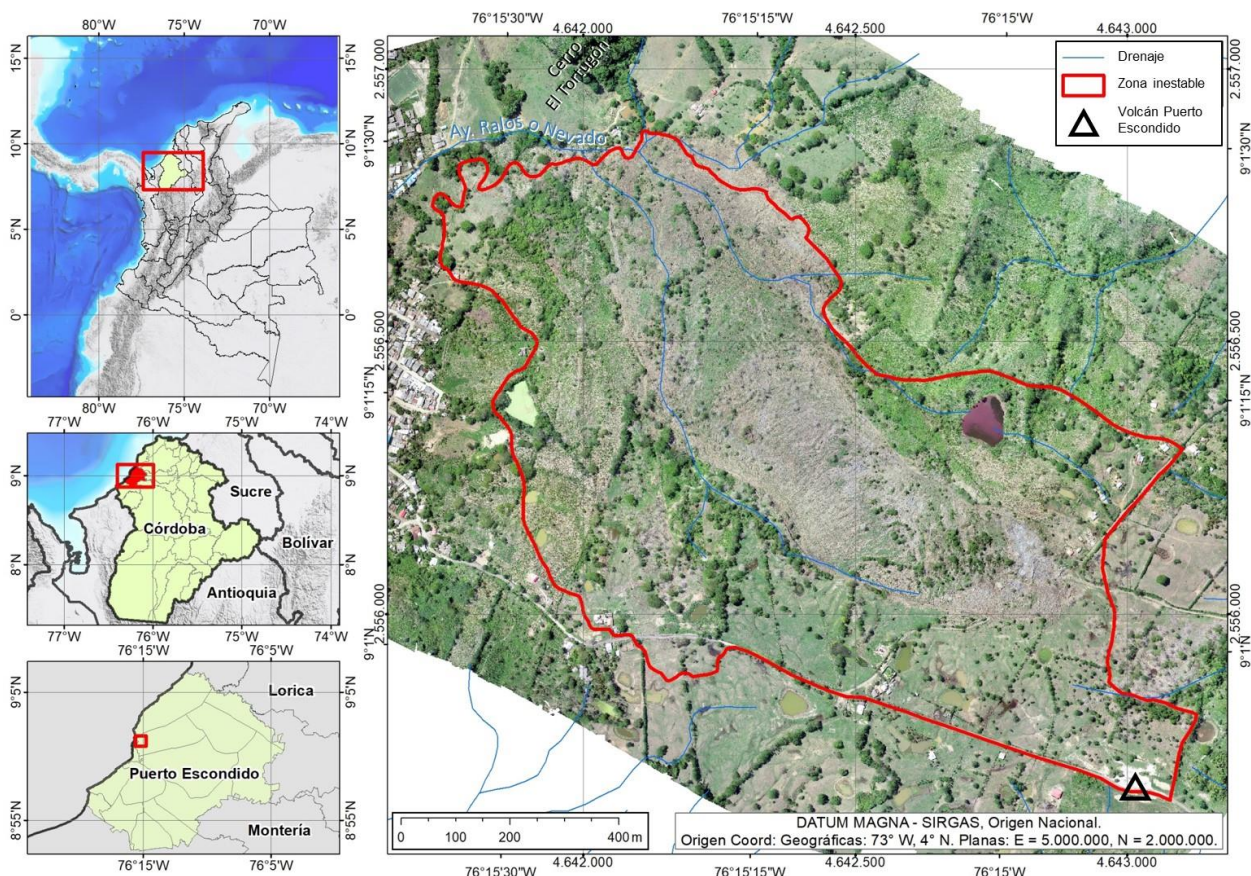


Figura 1. Localización del área visitada en el municipio de Puerto Escondido, Córdoba
El polígono de borde rojo indica el área inestable que fue objeto de la visita de emergencia.

3. Antecedentes

La inestabilidad identificada en el cerro Santa Cruz, el pasado 24 de mayo de 2023, ya había sido reportada anteriormente en 1989 y 2003. A continuación, se presenta una breve síntesis de estos y otros antecedentes encontrados para el área visitada.

3.1. Informe preliminar del deslizamiento de Puerto Escondido (Parra, 1989)

En marzo de 1989, la Dirección de Ingeominas – Medellín, a través del geólogo Eduardo Parra, realizó una visita al municipio de Puerto Escondido. En este informe se reporta que los habitantes del sector identificaron la generación de grietas en diciembre de 1988, las cuales aumentaron en tamaño en febrero de 1989, donde además se detectó un olor a gas metano y ruidos similares a los del cráter del volcán.

En la visita técnica realizada se identifica un deslizamiento con dirección de movimiento al oeste, en la ladera ubicada al oriente y nororiental del centro poblado. Este movimiento presenta una diferencia de altura de 100 m entre la corona y la punta, una longitud y ancho total de 1500 m, con una velocidad de desplazamiento inferida de 50 cm/hora en la corona y 40-45 cm/hora en la parte inferior. Se estimó un área afectada de 100 ha. Como principales factores contribuyentes se propone la lluvia acumulada hasta enero de 1989, la presencia de cuatro represas de agua para el uso de ganadería y el agua subsuperficial en el volcán de lodo. El material desplazado fue descrito como arcillo limoso, plástico y poco permeable.

En este trabajo se concluyó que el proceso corresponde a un deslizamiento por saturación del material y no a actividad del volcán. Se argumentó que la tasa de desplazamiento del proceso no ponía en peligro inminente a las personas. Se recomendó realizar seguimiento a la evolución del movimiento previendo una posible afectación al casco urbano. Al corto plazo, se recomendó drenar las represas existentes y al mediano, elaborar un estudio de amenazas del municipio. Debido a la magnitud del proceso no se consideró posible realizar ningún tratamiento con obras de ingeniería para estabilizarlo. Se cuenta con el registro y cartografía del proceso y de algunos rasgos de la inestabilidad (figura 2).

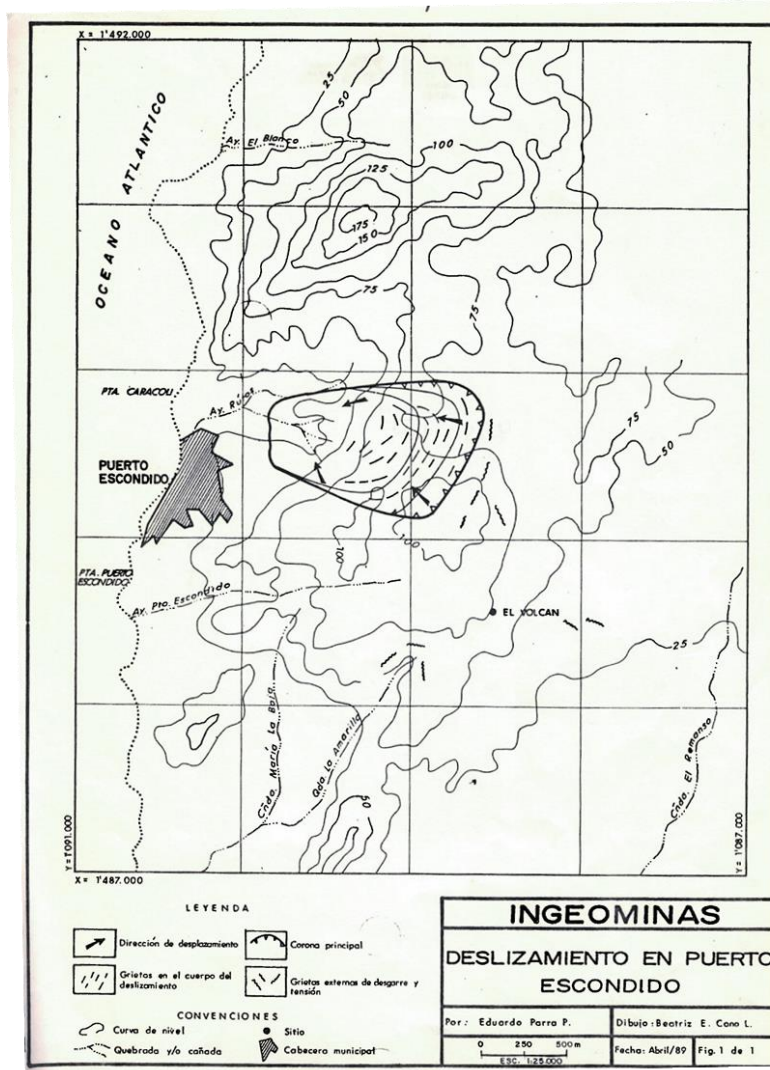


Figura 2. Cartografía del deslizamiento elaborada en la visita de emergencia a Puerto Escondido en 1989
Fuente: Parra (1989)

3.2. Geología de la plancha 50 Puerto Escondido, escala 1:100.000 (Ingeominas y Geotec, 1999; Ingeominas y Geotec, 2003)

Corresponde a la cartografía oficial escala 1:100.000 de la plancha 50, dentro de la cual se encuentra la zona de interés de esta visita. En el área, se tiene cartografiada la estructura del volcán de lodo superpuesta sobre rocas del Neógeno (Mioceno) de la Formación Morrocoy - El Pantano compuestas por arenitas líticas que gradan a lutitas con algunas interposiciones de conglomerados arenosos bioclásticos. Es el principal referente a nivel de cartografía geológica que existe para el área (Figura 3).

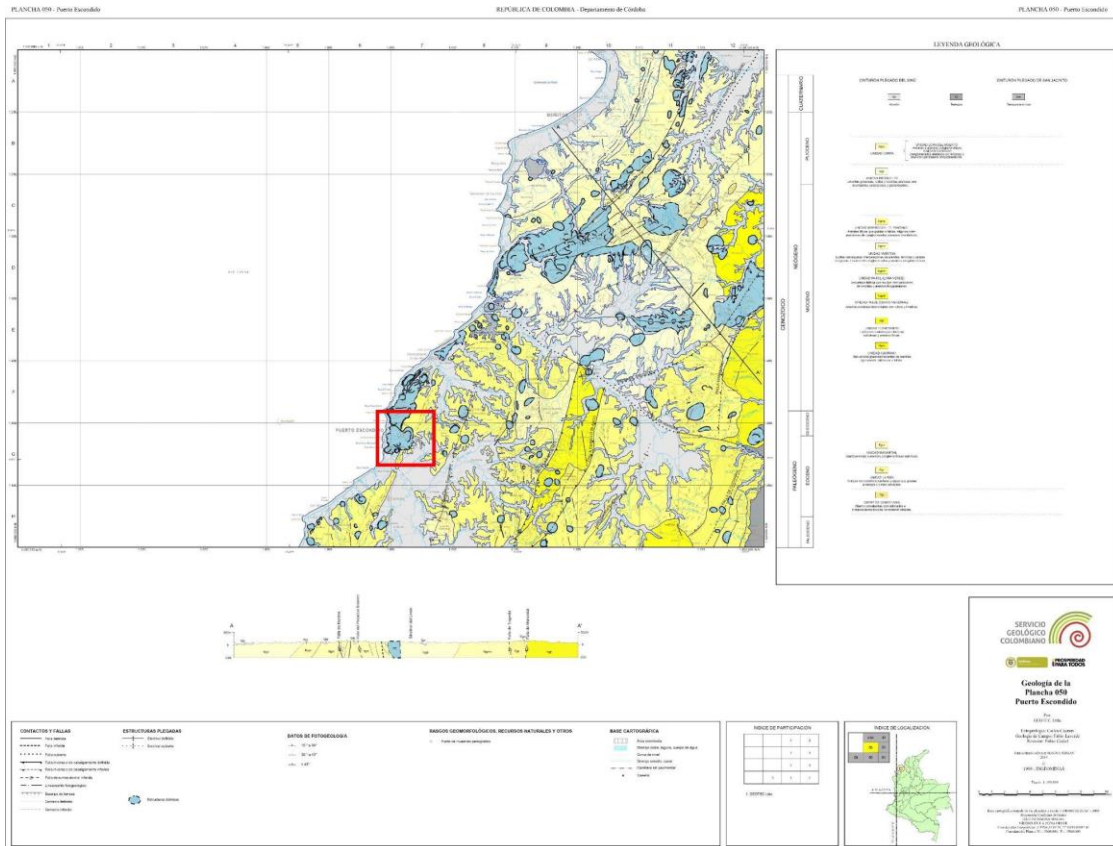


Figura 3. Imagen del mapa geológico de la plancha 50 Puerto Escondido. Se indica en el recuadro de rojo, el área del movimiento en masa visitado. Fuente: adaptado de Ingeominas y Geotec (1999).

3.3. Caracterización de los problemas de inestabilidad del terreno en el volcán de lodo de Puerto Escondido - Córdoba (Carvajal, 2001)

Este informe corresponde a la visita realizada por el geólogo Henry Carvajal al denominado sector “Dos Caminos” en el oriente del casco urbano de Puerto Escondido, en el 2001. Se reportan agrietamientos el 24 de junio que se reactivaron el 17 de julio, con movimientos sísmicos leves reportados por la población y aparición de 15 nuevas bocas e incremento de escape de gases.

En este trabajo se cartografiaron algunas geoformas y rasgos como grietas recientes, coronas y depósitos de coluvión antiguos. El autor define además, un par de lineamientos fotogeológicos cerca del sector del proceso de inestabilidad (figura 4).

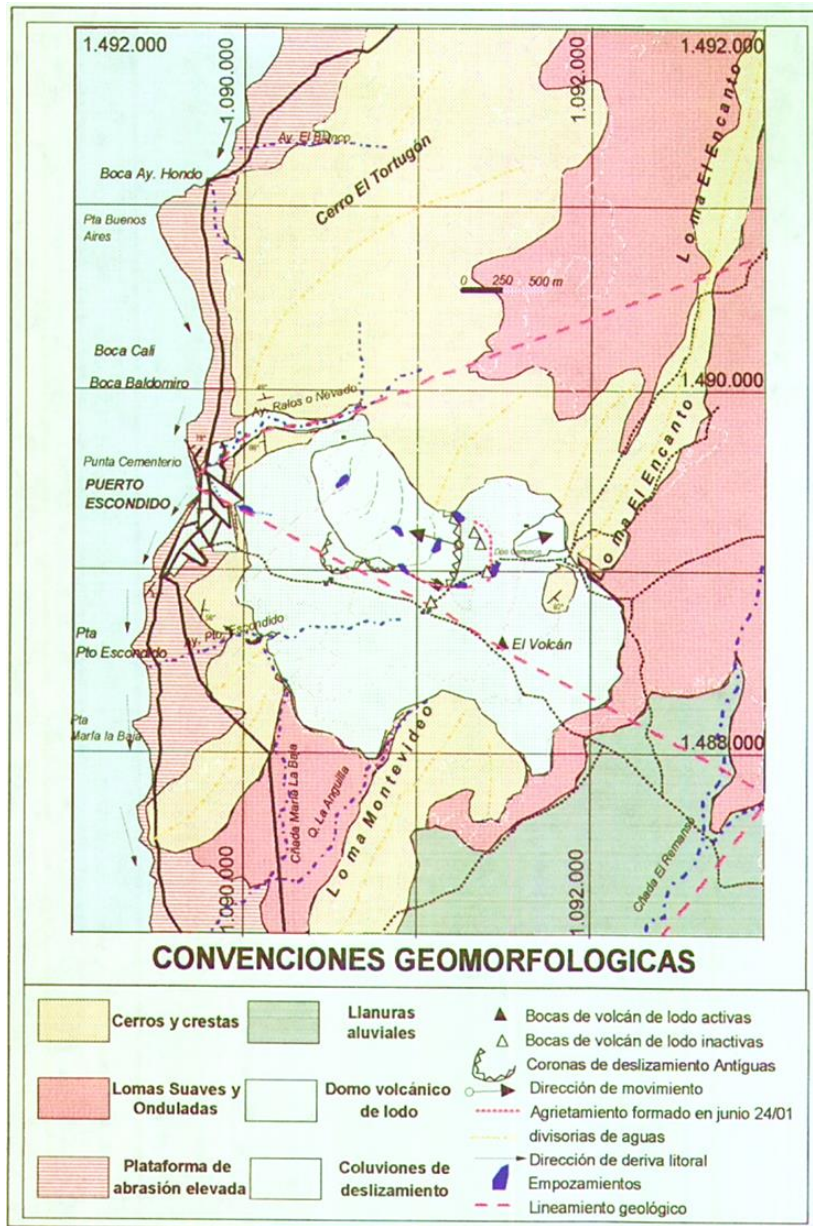


Figura 4. Cartografía geomorfológica local y del antiguo movimiento en masa
Fuente: Carvajal (2001)

Se realizó una caracterización de la estructura del volcán y el estado de actividad actual de sus bocas. Se reportan antiguos deslizamientos de carácter local en la estructura dómica, que se evidencian por la morfología aborregada y la deformación del terreno, lo que causó truncamientos en drenajes y frecuentes empozamientos de agua. El deslizamiento principal se registra al noroccidente de la zona dómica, clasificado como rotacional, con una morfometría dada por 750 m de longitud de la corona, 1000 m de longitud total y un ancho de 750 m. Se hace referencia a que la última actividad del movimiento fue la

reportada por Parra (1989). Adicionalmente, se caracterizan las grietas que abarcaron una distancia de 700 m y se desarrollaron nuevas bocas con escape permanente de gases.

Se concluyó que las grietas evidencian la reactivación de la corona del antiguo deslizamiento con carácter retrogresivo, sin presentar desplazamientos recientes de la masa antigua movilizada, esto como consecuencia de los movimientos verticales generados por la expansión de gases. Se explica la saturación y acumulaciones de agua en el terreno, debido a que cuando estos gases buscan la superficie generan la migración de fluidos que mantienen altos los niveles freáticos, y, por ende, el suelo se mantiene húmedo y con condiciones propicias para deslizarse a manera de reptación y deslizamientos de gran magnitud. Por las evidencias observadas, no se descarta que estos procesos sean la evidencia de una posible reactivación del fenómeno volcánico de lodo en la región.

Finalmente, se infiere que el área es susceptible a presentar daños por posibles erupciones del volcán, lo cual pondría en riesgo a las personas que transitan o viven en cercanías a los centros activos o inactivos de emisión de gases. Así mismo, se dan algunas recomendaciones a corto y largo plazo, entre las que se destacan: aislamiento de la zona afectada en un radio de 500 m a la redonda; monitoreo del avance de las grietas y de la actividad de emanación de gases; llevar a cabo estudios geológicos, geofísicos, geoquímicos, geomorfológicos y geotécnicos detallados en la zona dómica del volcán de lodo para determinar el grado de susceptibilidad y amenaza tanto por erupciones futuras como por deslizamientos; realizar muestreo de los materiales presentes para dataciones de eventos antiguos y establecer la recurrencia en los procesos eruptivos, así como para caracterizar física y composicionalmente las arcillas de la zona a fin de conocer su influencia en las amenazas del área.

3.4. Mapa de amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 de la plancha 50 (SGC y UN-Medellín, 2015; 2016)

Este estudio, elaborado por el SGC y UN-Medellín (2015), aplicó un método heurístico con ponderaciones de variables temáticas utilizando el criterio experto. Para el cálculo de la susceptibilidad se tuvieron en cuenta variables como pendiente, curvatura, geología, geomorfología, cobertura y uso del suelo. Se elaboraron dos capas de detonantes: sismo y lluvia, con los cuales se elaboró el mapa de amenaza relativa por movimientos en masa. En el área de Puerto Escondido, se tiene un predominio de la amenaza media por movimientos en masa sobre las laderas de la zona oriental del casco urbano, con sectores específicos posiblemente asociados a mayores pendientes que se encuentran en amenaza alta. Por su parte, el área donde se sitúa el casco urbano, se encuentra en amenaza baja por movimientos en masa (figura 5).

En la leyenda de este mapa de amenaza se advierte para la categoría media que: *“En la zona de estudio se encuentran domos diapíricos, principalmente en la zona de Puerto Escondido, éstos pueden generar movimientos en masa del tipo flujos de lodo, los cuales serían puntuales y restringidos a las zonas de los domos”*.

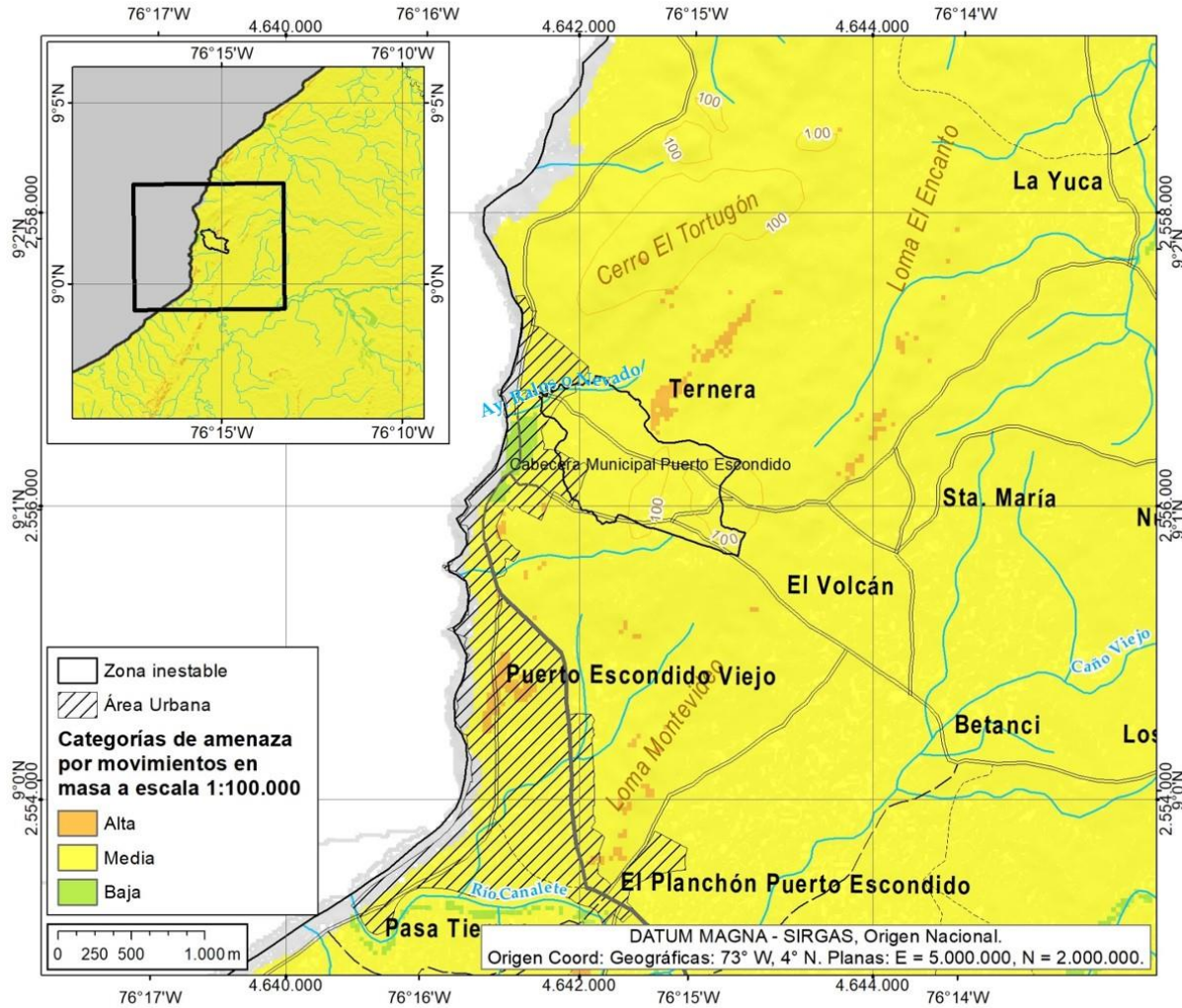


Figura 5. Categorías de amenaza por movimientos en masa a escala 1:100.000, Puerto Escondido
 Fuente: adaptado del mapa de amenaza por movimientos en masa de la plancha 50 Moñitos de SGC y UN-Medellín (2015). Coordenadas en Datum Magna Sirgas origen Oeste.

3.5. Plan básico de ordenamiento territorial del municipio de Puerto Escondido (Córdoba), 2016

En el capítulo 7, Dimensión Ambiental del documento del PBOT de Puerto Escondido, se presenta la caracterización de la geología local, geomorfología, cobertura y uso del suelo y procesos morfodinámicos del municipio. Adicionalmente, el estudio contiene mapas de susceptibilidad, amenaza y condición de riesgo por movimientos en masa, inundación y diapirosis de lodo (figuras 6 y 7). Sin embargo, no se encontró la cartografía relacionada con el inventario de procesos morfodinámicos que contenga la digitalización de los procesos y su caracterización detallada. Si bien, estos mapas son un referente importante, al revisar en el documento con los resultados, no se precisa la metodología utilizada para la zonificación, por lo tanto, no es posible determinar si es apropiada para la escala de trabajo recomendada en el decreto 1807 de 2014, por lo que se presentan mapas a escala 1:50.000. En el mapa de amenaza por movimientos en masa se identificaron áreas con amenaza alta (7,28 %) y media (92,72 %) en el municipio.

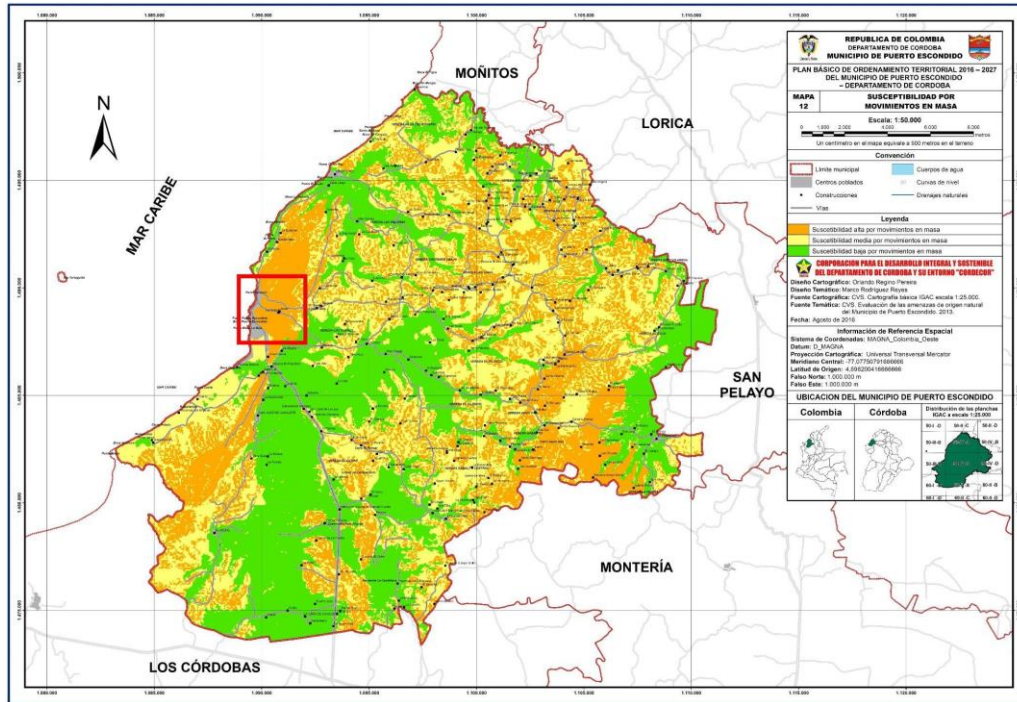


Figura 6. Susceptibilidad por movimientos en masa, escala 1:50.000, municipio de Puerto Escondido. Se indica en el recuadro rojo el área del movimiento en masa visitado. Fuente: PBOT Puerto Escondido (2016).

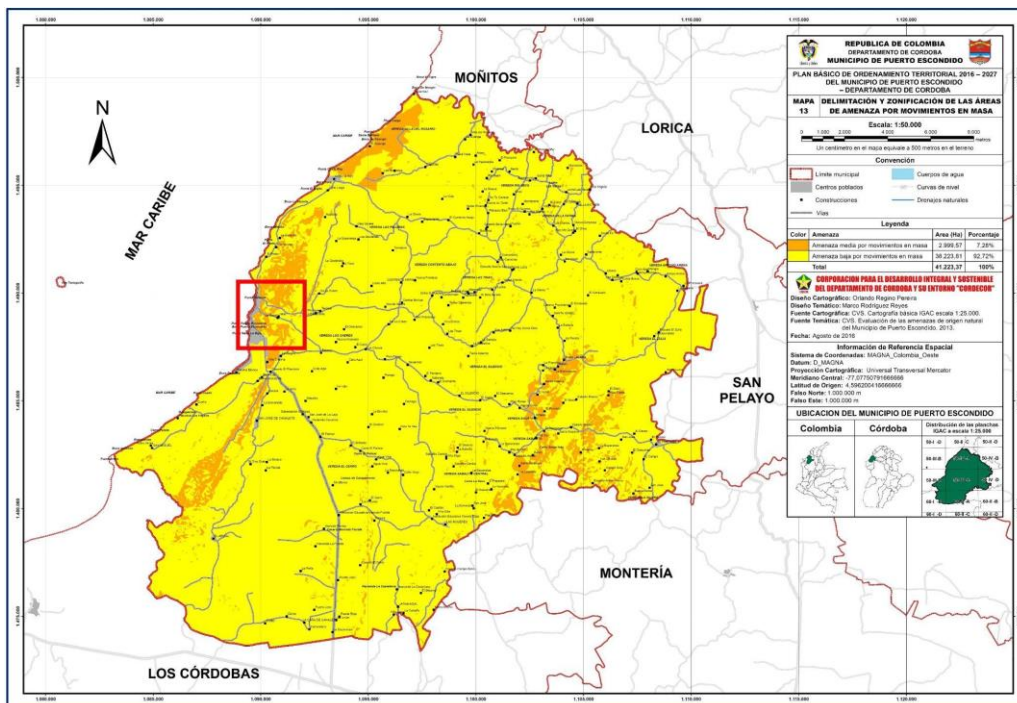


Figura 7. Amenaza por movimientos en masa, escala 1:50.000, municipio de Puerto Escondido. Se indica en el recuadro rojo el área del movimiento en masa visitado. Fuente: PBOT Puerto Escondido (2016).

3.6. Estudio geoelectrico para identificación de acuíferos en el barrio Ciudad Futuro del municipio de Puerto Escondido, departamento de Córdoba (Servihídrica SAS, 2021)

La empresa Servihídrica llevó a cabo un sondeo eléctrico vertical (SEV) en el barrio Ciudad Futuro localizado al sur del casco urbano de Puerto Escondido, aproximadamente a 1,5 km en línea recta de la parte baja del área afectada por movimientos en masa en el cerro Santa Cruz. El SEV registró una profundidad de 105 m, cuya interpretación del modelo geoelectrico define cuatro niveles de materiales de base a tope: 55 m de espesor de arcillas intercaladas con arenas finas; 23 m de espesor de arenas intercaladas con arcillas; 4 m de espesor de arcillas; 7 m de arenas intercaladas con material arcilloso y en la parte más superficial, 1 m de suelo orgánico. Estos materiales se asociaron a un depósito aluvial.

3.7. Identificación y zonificación de áreas con condición de riesgo natural en planes de ordenamiento territorial de dos municipios priorizados del departamento de Córdoba (CVS, 2022)

Con el fin de brindar aportes al conocimiento de las áreas con condición de riesgo natural en los planes de ordenamiento territorial de los municipios de Canalete y Puerto Escondido, la CVS aplicó la metodología descrita en el trabajo de Carvajal (2000) para elaborar la zonificación de amenaza por volcanismo de lodo. El método se basó en la distancia relativa que existe alrededor de las bocas principales de un determinado volcán y a partir de estas se definen unos radios de influencia de las posibles erupciones y en función de ello se categorizan las zonas de amenaza. A partir de este análisis, cerca del 5% del área municipal presenta amenaza alta y muy alta por volcanes de lodo, categorías que se restringen a los radios de influencia directa de las bocas de los diferentes volcanes de lodo. La amenaza media, más distante de las bocas, ocupa menos del 1% y el área restante se clasificó con amenaza baja. Es así, como el casco urbano de Puerto Escondido se encuentra aledaño a una franja de amenaza muy alta y alta por la actividad del diapirismo de lodo del cerro Santa Cruz.

También se identificaron elementos expuestos como construcciones y vías que se superponen con las áreas de influencia de la amenaza muy alta, alta y media y de esta manera se obtuvieron las zonas con condición de riesgo por volcanismo de lodo. Este trabajo recomienda la elaboración de estudios de mayor detalle a nivel geológico, geomorfológico y geotécnico, con el fin de establecer si es necesario reubicar algunas viviendas que se encuentran en condición de riesgo por estos procesos, así como acciones relacionadas con la prevención.

3.8. Sismicidad histórica

Desde el punto de vista tectónico, la esquina noroccidental de Suramérica es uno de los ambientes más complejos, reflejado en los múltiples procesos geológicos y la interacción de las placas tectónicas que allí convergen, situación que conlleva a la ocurrencia de sismos que se caracterizan por presentar profundidades superficiales a medias (0 - 70 km). En la Figura 8, se ilustra de manera general la sismicidad histórica en el Caribe Colombiano, con registros entre los años 1993 hasta la fecha.

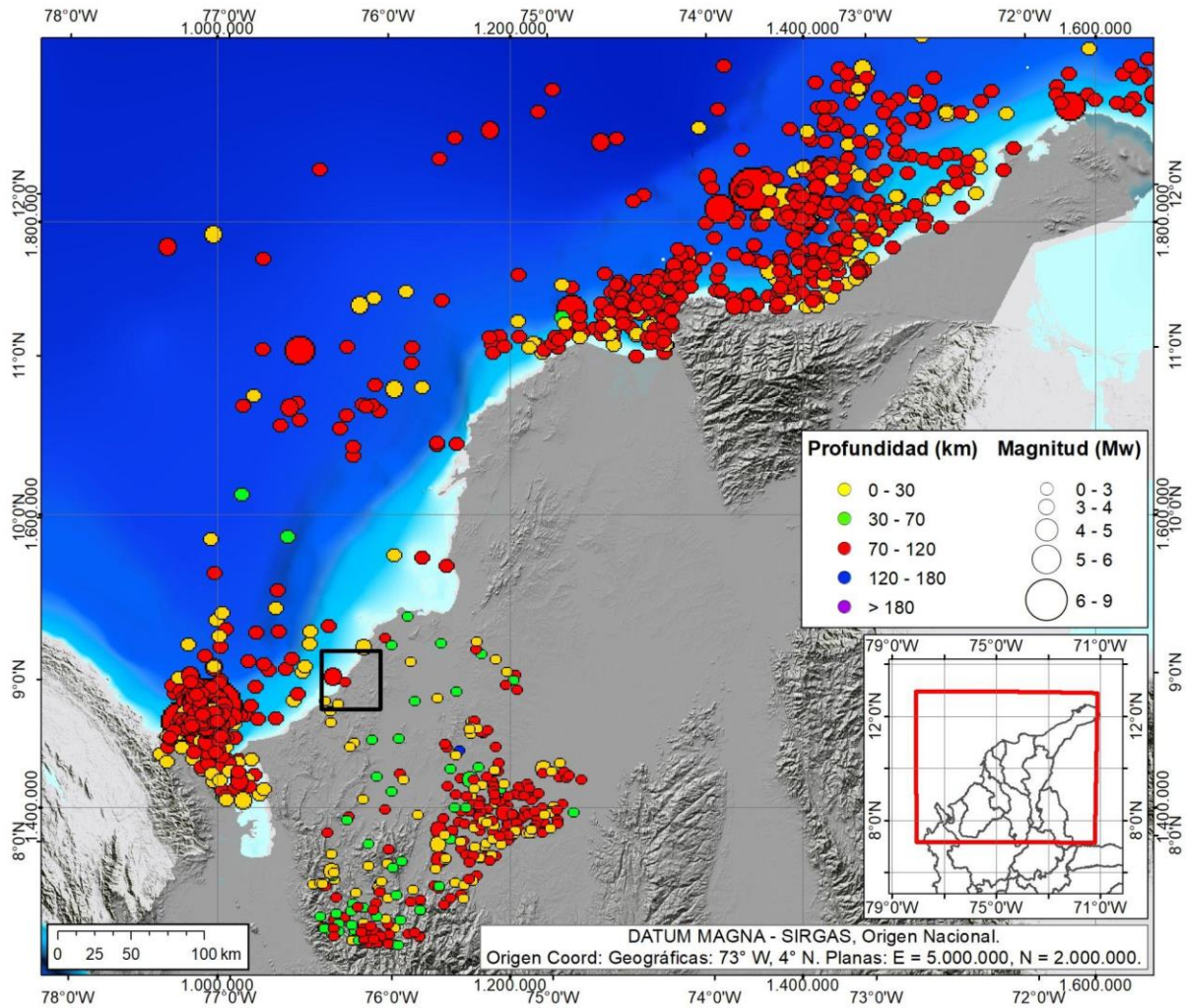


Figura 8. Sismicidad histórica con epicentro en el Caribe colombiano

Fuente: Catálogo de sismicidad del SGC (http://bdrsnc.sgc.gov.co/paginas1/catalogo/Consulta_Experta_Seiscomp/mapa_sismicidad_experta.php).

3.9. Inventario y catálogo histórico de movimientos en masa

Se realizó la consulta en el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) del SGC (web oficial: <https://simma.sgc.gov.co/#/public/basic/>), pero no se encontraron registros de inventario o catálogo de movimientos en masa para el municipio de Puerto Escondido. Adicionalmente, al consultar la plataforma Desinventar (<https://db.desinventar.org/>), tampoco se encontraron reportes de deslizamientos o flujos; de tal manera que, la mayoría de los eventos que han afectado al municipio corresponden a fenómenos de origen hidrometeorológico como inundaciones, vendavales e incendios forestales. Sin embargo, en 2016 se reportó un evento relacionado con la erupción del volcán de lodo (Tabla 1).

Tabla 1. Registro de eventos naturales de origen geológico afectaron al municipio de Puerto Escondido

Serie (Id)	Evento	Fecha	Descripción
UNGRD-2016-0158	Erupción	22/04/2016	El CDGRD de Córdoba informa la “erupción” del volcán de lodo que causó daños en los alrededores. Así mismo, reporta que hace 28 años se presentó la misma situación, causando daños en cultivos y animales.

Fuente: consulta realizada para el municipio de Puerto Escondido en la plataforma online Desinventar

4. Características geológicas

4.1. Marco geológico regional

Según Cediél, Shaw y Cáceres (2003) el control tectónico en la esquina noroccidental de Suramérica está dominado por tres placas tectónicas: las placas de Nazca (Pacífica) y Caribe con afinidad oceánica, en interacción con la placa suramericana, representada en esta región por el Escudo Guayanés y el Bloque Norandino (Figura 9).

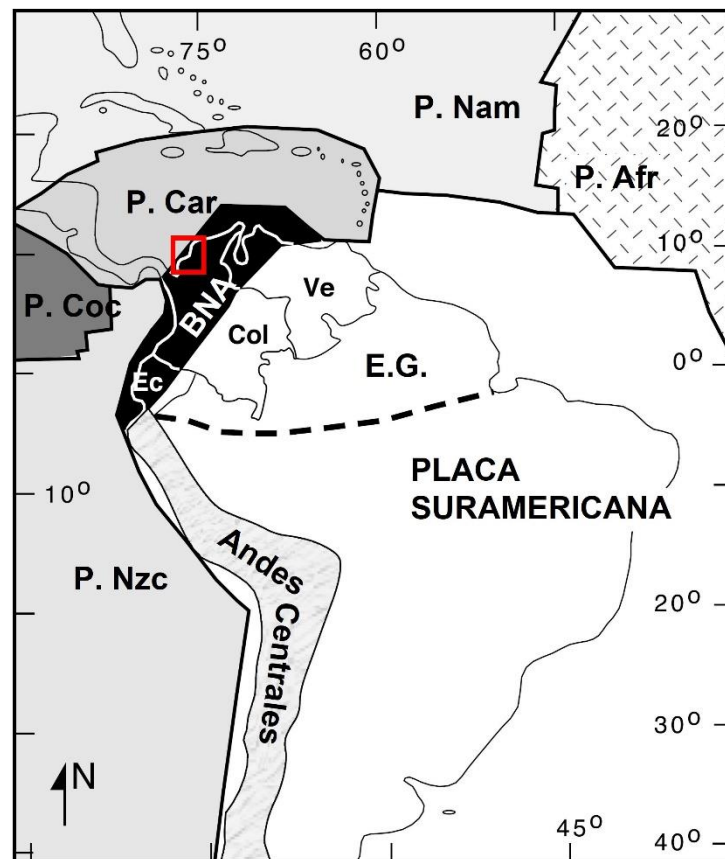


Figura 9. Esquema general del marco tectónico del noroeste de Suramérica

BNA: Bloque Norandino; Co: Colombia; Ve: Venezuela; Ec: Ecuador; P. Car: placa Caribe; P. Coc: placa de Cocos; P. Nzc: placa de Nazca; E.G.: Escudo Guayanés; P. Nam: placa norteamericana; P. Afr: placa Africana. En el recuadro rojo se indica el área donde se localiza el municipio de Puerto Escondido.

Fuente: adaptado y traducido de Cediel, Shaw y Cáceres (2003)

Dentro de este bloque tectónico se encuentra la región a la que Ingeominas y Geotec (2003) denominan la cuenca Caribe Colombiana, la cual está estructurada en dos fajas, conocidas como los cinturones plegados del Sinú (CPSN) y San Jacinto (CPSJ) que se encuentran separados por el sistema de fallas del Sinú (Lozano y Zamora, 2014).

El CPSN está conformado por una gruesa secuencia sedimentaria y desarrolla un estilo estructural caracterizado por fallas inversas y pliegues con dirección general sur-suroeste. ICP (2001) citado por ANH y B&G Unión Temporal (2006) realizaron un análisis de los aspectos estructurales y estratigráficos que incluyen esta región y definen el estilo estructural de la cuenca del Sinú como un sistema imbricado de fallas de cabalgamiento y pliegues estrechos y alargados con sus flancos fallados (figura 10).

Varios autores (Edgard *et al.*, 1971; Duque-Caro, 1984; Duque-Dueñas, 1987; Lindberg, Ellis y Dekker, 1989) citados por ANH y B&G Unión Temporal (2006) concluyen que las estructuras dominantes de la cuenca Sinú fueron producidas por fallas de cabalgamiento con vergencia hacia el oeste que están afectadas por fallas de rumbo con tendencia noroeste-sureste. Además, enuncian que los numerosos volcanes de lodo son expresiones de shales sobrepresionados que migraron hacia la superficie a lo largo de fallas de cabalgamiento y rumbo-deslizantes. Las fallas de cabalgamiento se expresan como anticlinales asimétricos separados por sinclinales amplios rellenos con sedimentos clásticos durante el Terciario.

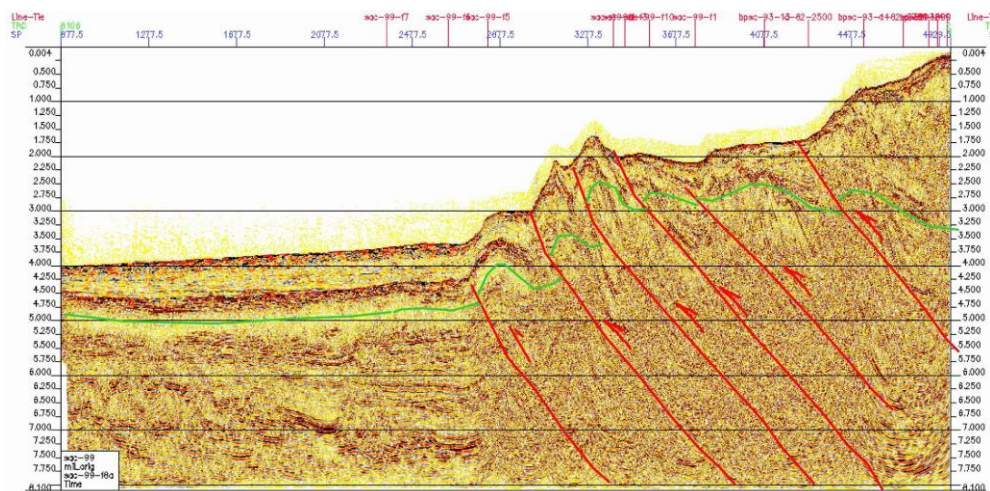


Figura 10. Sistema de cabalgamiento imbricado que caracteriza el estilo estructural del CPSN

Fuente: Gómez (2003) citado por ANH y B&G Unión Temporal (2006)

Según la interpretación de Lozano y Zamora (2014), el CPSN se puede subdividir en dos provincias de deformación: costa adentro (OnShore) y costa afuera (OffShore). En particular, la zona de interés en Puerto Escondido forma parte de la provincia de deformación costa adentro del CPSN (figura 11), la cual consiste en estructuras con tendencia NNE-SSW y NS en cercanías al sistema de fallas de Uramita. Esta región presenta diapirismo de lodo, lo que ha producido partición en el prisma sedimentario del Neógeno, y permite la formación de amplios pliegues y estrechos anticlinales que han dado lugar a mini cuencas sedimentarias sucesivas de forma ovalada en superficie.

Dentro de los sinclinales se desarrollan sucesiones sedimentarias asimétricas con pliegues de arrastre, estratos de crecimiento y desarrollo de inconformidades sin-deposicionales del Plioceno, edad también

asignada al diapirismo de lodo. Bermúdez & Hincapié (2008) citados por Lozano y Zamora (2014), consideran que al sur de la cuenca hay transpresión sinistral con presencia de fallas y deflexión de las estructuras, producto de la colisión del bloque Choco-Panamá. Un esquema de interpretación sísmica regional muestra a grandes rasgos la configuración de la Provincia costa adentro (figura 12), donde el depocentro ha sido afectado por el diapirismo de lodo, generando mini-cuencas.

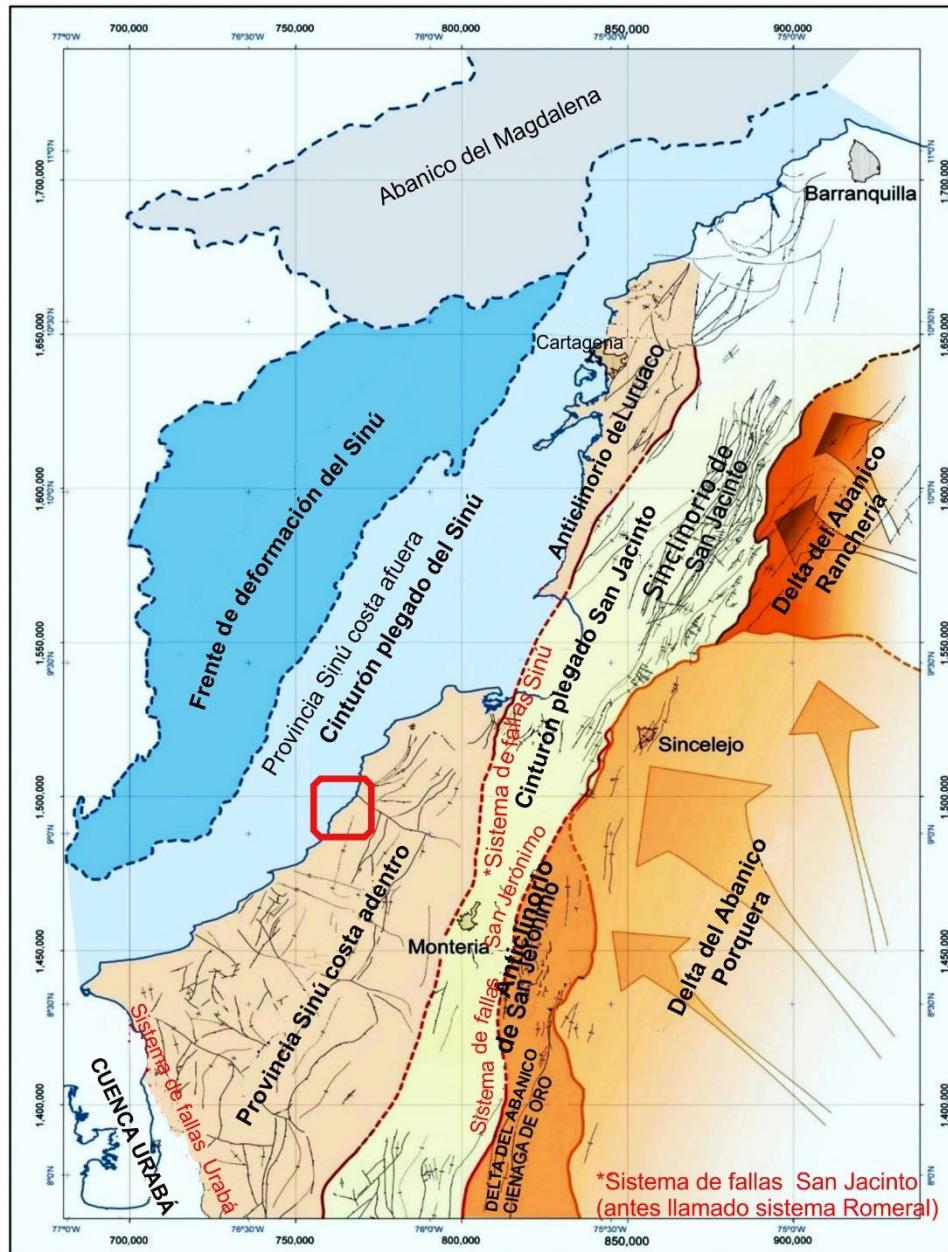


Figura 11. Provincias del cinturón plegado del Sinú: costa adentro y costa afuera
Se indica en el recuadro rojo, el área del movimiento en masa visitado en Puerto Escondido.
Fuente: adaptado y traducido de Aguilera (2011) citado por Lozano y Zamora (2014).

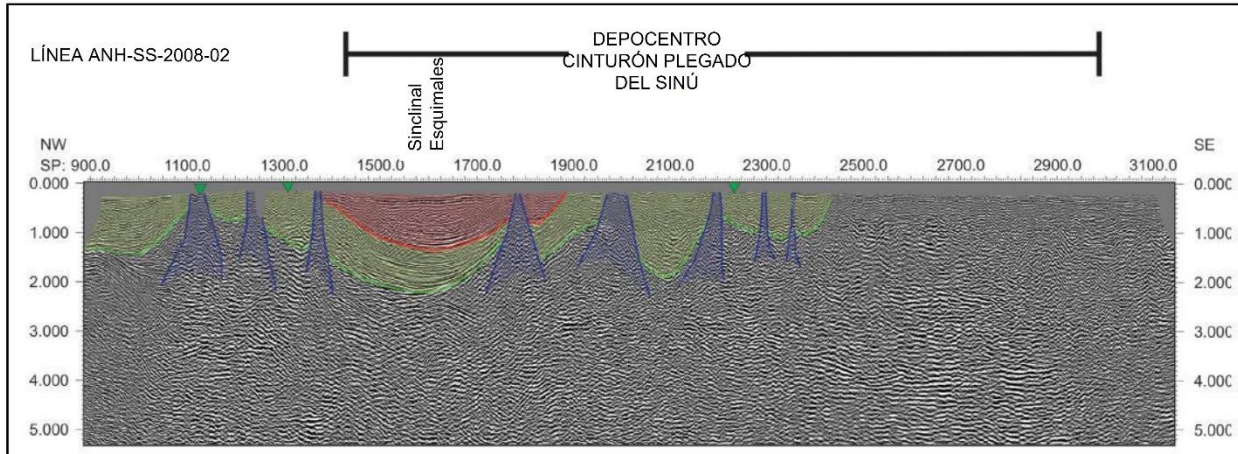


Figura 12. Esquema estructural general de una zona costa adentro del CPSN

Las áreas sombreadas en verde y rojo corresponden a los sedimentos de las mini-cuencas formadas por la afectación del diapirismo de lodo, áreas azules.

Fuente: Aguilera (2011) citado por Lozano y Zamora (2014).

4.1.1. Características del volcanismo de lodo del Caribe central colombiano

De acuerdo con Carvajal y Mendivelso (2017), el volcanismo de lodo se constituye en una de las manifestaciones de un fenómeno geológico denominado diapirismo de lodos, el cual se origina por la presencia en profundidad de material arcilloso de características plásticas y gases en condiciones de alta presión, que se movilizan lateralmente y hacia la superficie a través de fracturas o zonas de debilidad, generando tanto levantamientos y fracturamiento del terreno como expulsión de lodo y gases por bocas de variadas formas y tamaños.

El diapirismo de lodo es típico del llamado cinturón del Sinú, franja de rocas de la región costera colombiana situada entre el golfo de Urabá y Barranquilla, que incluye igualmente las zonas marinas de plataforma continental. Las geoformas, como cerros de aspecto cóncavo, plataformas arrecifales basculadas e islas arrecifales, encontradas en la región, deben su origen al diapirismo de lodo, generado al menos en parte por la tectónica convergente transpresiva de las placas Nazca, Caribe y Suramérica. Los volcanes de lodo (figuras 13 y 14) se presentan como cerros en forma de domo de morfología colinada, de 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 diapirismo, y disparados por uno o varios de los siguientes factores: compresión tectónica, alto contenido de gases o diferencia de densidad entre los materiales confinados en profundidad y la cobertera sedimentaria superior más densa (Carvajal y Mendivelso, 2017).

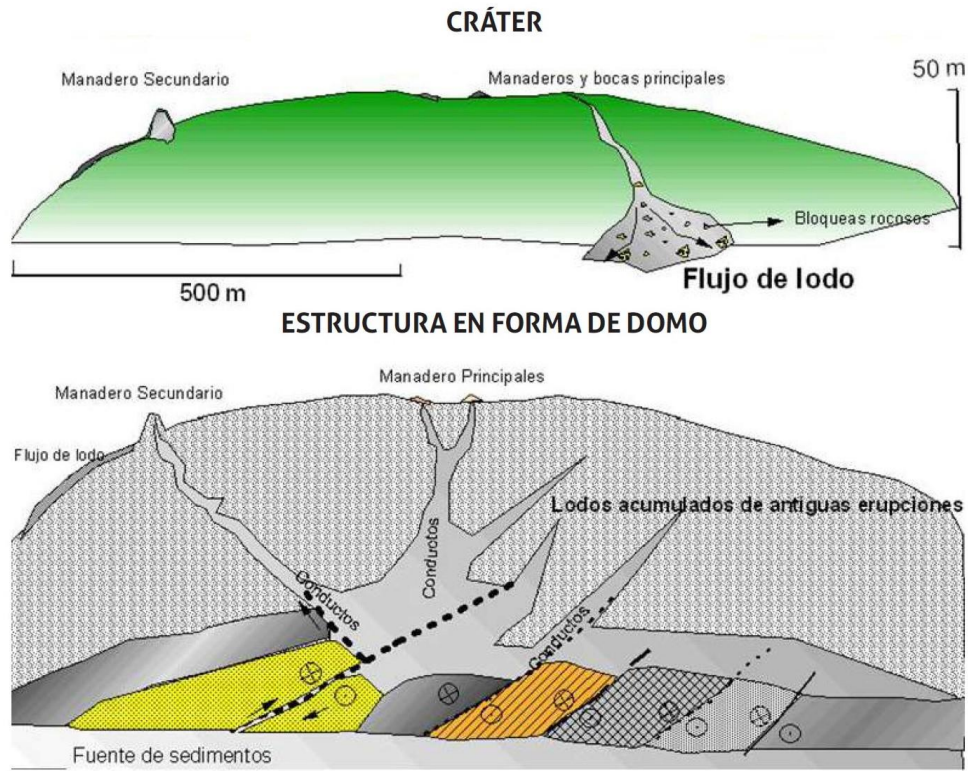


Figura 13. Esquema generalizado de un volcán de lodo, en superficie y profundidad
Fuente: tomado de Carvajal y Mendivelso (2017)

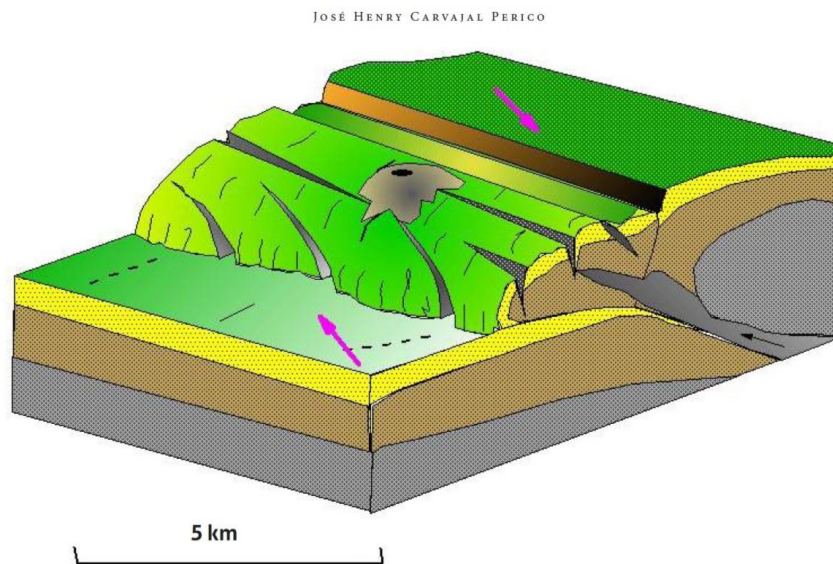


Figura 14. Modelo esquemático de emplazamiento de un volcán de lodo
Fuente: tomado de Carvajal y Mendivelso (2017)

4.1.1.1. Volcán de lodo de Puerto Escondido

El volcán de lodo de Puerto Escondido (figura 15) es una estructura en forma de domo de 2 km de diámetro promedio y una altura sobre el nivel del mar de 100 m. Se presenta elongada en dirección NW-SE con laderas convexas y patrón de drenaje radial. Esta estructura está formada por la acumulación de lodos de antiguas erupciones, presenta una morfología suavemente ondulada relacionada con procesos de reptación de suelos (Carvajal, 2001).

La zona principal de emanación de lodos se localiza en las coordenadas, 9° 0'52.29" de latitud, 76°14' 51.63" de longitud (figura 16). Carvajal (2001) identificó 38 manaderos de lodo activos, los cuales presentan formas cónicas (manaderos tipo O), circulares de 10 cm a 10 m de amplitud por donde fluye lodo acompañado de expulsión de gas metano y a 450 m al norte del sitio, en el sector de Dos Caminos, se identificaron tres centros de emisión inactivos. Otro centro de emisión de 5 cm de diámetro fue identificado por el autor a 500 m al oeste de la zona de emanación principal.

En la visita técnica realizada durante los días 31 de mayo y 1 de junio del 2023, se identificaron 18 focos de emanación de lodos tipo O, con diámetros aproximados entre 5 y 15 cm (figura 16). En el sector Dos Caminos-cerro Santa Cruz se reconocieron cinco manaderos de lodo entre 1-10 cm de diámetro, en un área aproximada de 50 m², sobre la corona de un deslizamiento activo dentro y fuera de las grietas distensivas, un humedal burbujeante y espejos de agua locales con burbujeo, localizados entre las grietas.

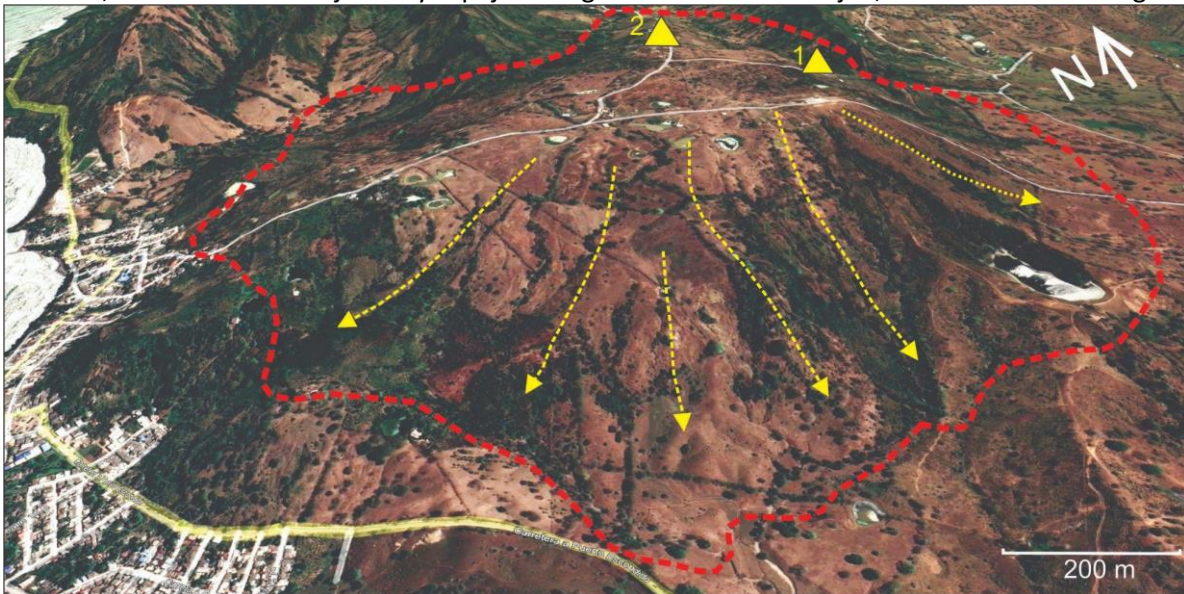


Figura 15. Esquema generalizado del volcán de lodo de Puerto Escondido

La línea punteada de color rojo indica el límite aproximado de la estructura volcánica. Las líneas punteadas de color amarillo indican el contorno del edificio volcánico. La zona 1, corresponde al manadero de lodos principal. La zona 2, corresponde a manaderos de lodo y humedales con burbujeo en el sector de Dos Caminos. Fuente: edición sobre imagen satelital de Google Earth (2023).



Figura 16. Muestreo de gases en los focos de emisión principal



Figura 17. Zona de emisión de lodos en el sector Dos Caminos - cerro Santa Cruz

a) Humedal burbujeante; b) espejo de agua transitorio intragrietas, con presencia de burbujeo; c) manadero de lodo Tipo O (2 m de diámetro); d) espejo de agua con burbujeo local en zona de grietas; e) manadero de lodo en corona de deslizamiento activo y zona de grietas distensivas.

4.2. Estratigrafía regional

El área de interés de esta visita se localiza dentro de la plancha 50 Puerto Escondido, cuya geología fue elaborada por Ingeominas y Geotec (1999; 2003). De acuerdo con dicha cartografía y teniendo en cuenta las observaciones de campo de Carvajal (2001), en el área del cerro Santa Cruz, donde se presentó el movimiento en masa, se encuentran rocas sedimentarias de la denominada unidad Morrocoy-El Pantano (Ngmp) cubiertas localmente por depósitos de flujos antiguos y recientes del volcán de lodo de Puerto Escondido, mientras que en las zonas circundantes al cerro se tienen depósitos aluviales y de playas (figuras 18 y 19).

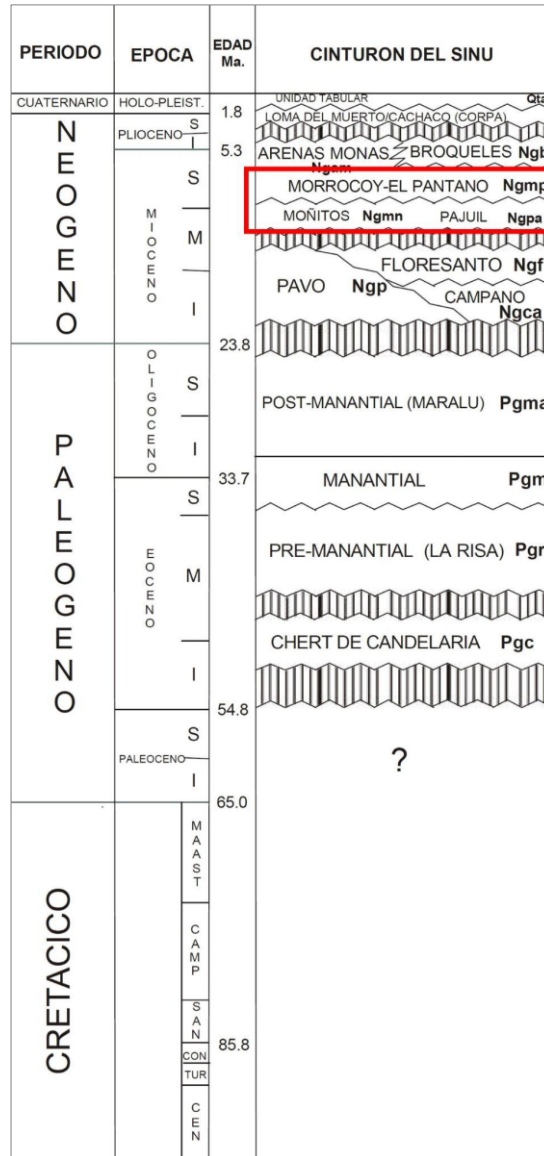


Figura 18. Columna estratigráfica generalizada para el cinturón plegado del Sinú. Se señalan en el recuadro rojo las unidades litoestratigráficas aflorantes en el área visitada y alrededores. Fuente: adaptado de Ingeominas y Geotec (2003).

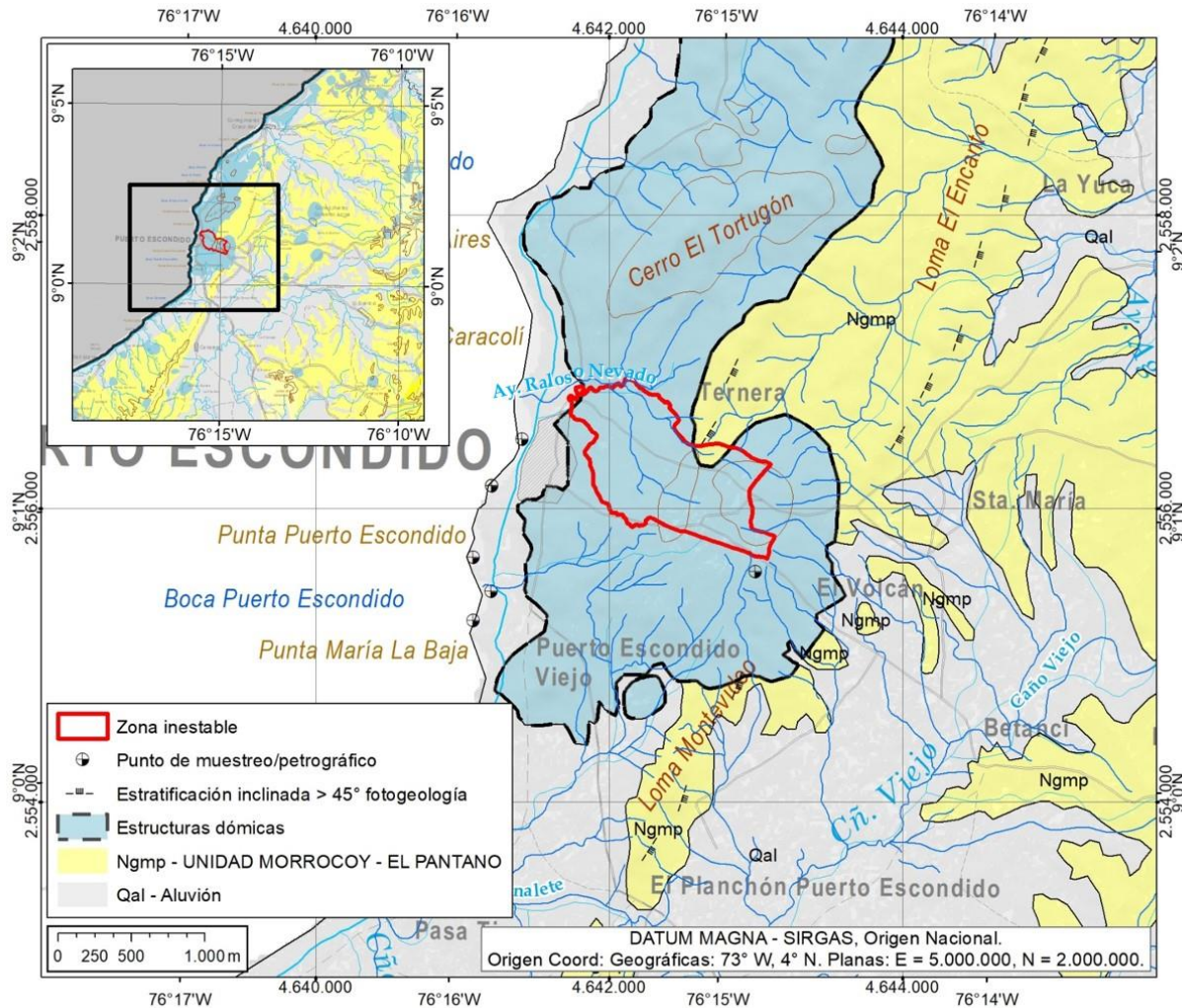


Figura 19. Esquema de la geología regional del cerro Santa Cruz en el municipio de Puerto Escondido. Se delimita en el polígono rojo, el área del deslizamiento analizado en el presente trabajo. Fuente: adaptado de Ingeominas y Geotec (2003)

4.2.1. Unidad Morrocoy-El Pantano (Ngmp)

Según Carvajal (2001) e Ingeominas y Geotec (2003), esta unidad está conformada por una secuencia de arcillolitas de colores grises y ocre, con intercalaciones de bancos de 3-4m de espesor de areniscas friables (deleznales) de grano fino color amarillo parduzco localmente conglomeráticas con esporádicos lentes de conglomerados compuestos por chert marrón y negro y cuarzo lechoso. Se pueden encontrar concreciones calcáreas de formas elongadas entre 10-25 cm de diámetro mayor.

4.2.2. Depósitos de flujo del volcán de lodo (Qfvl)

Son depósitos asociados a los diferentes eventos eruptivos del volcán que han dado lugar a flujos de lodo. Están compuestos por arcillas pardo grisáceas, plásticas, con bloques fracturados diseminados de 10-70cm de calizas arrecifales, limolitas calcáreas, areniscas de grano medio y conglomerados (Carvajal, 2001).

4.2.3. Depósitos aluviales y de playas (Qal; Qpl)

De acuerdo con Carvajal (2001) los aluviales recientes se restringen a los cauces de arroyos y están conformados por arenas arcillosas pardas amarillentas variando localmente a gravas de bloques angulares y redondeados de 5-10 cm. Mientras que los depósitos de playas están compuestos por arenas de grano fino, parduzcas, de composición cuarzo-feldespática, localmente con acumulaciones de gravas finas compuestas de chert negro, marrón y cuarzo lechoso.

4.3. Geología estructural

A nivel regional, las rocas de la Unidad Morrocroy-El Pantano (Ngmp) se encuentran conformando el flanco occidental del sinclinal Los Esquimales. Por lo tanto, la disposición estructural que presentan las rocas de esta unidad en el área de Puerto Escondido, se caracteriza por buzamientos entre 40°-60° en dirección sureste (Carvajal, 2001). De acuerdo con Ingeominas (2004) citado por SGC y UN Medellín (2015), el sinclinal Los Esquimales es una estructura cuyos flancos presentan rumbos variables E-W a N30°E y N17°E. El núcleo está conformado por la unidad Morrocroy-El Pantano, Corpa y depósitos aluviales del río Canalete.

Carvajal (2001) reporta que a partir del análisis de algunas fotografías aéreas del área, se infiere un lineamiento con dirección 60°NW que pasa por la zona del domo y determina cambios de buzamiento en la punta del Cementerio. También define otro lineamiento con dirección 60°NW por el norte del sector cerro Santa Cruz, que alinea el arroyo Ralos o Nevados con el cerro El Tortugón.

4.4. Geología local

La geología local del área de la visita realizada al sector cerro Santa Cruz, se realizó aplicando el concepto de Unidad Geológica Superficial (UGS). De acuerdo con Rodríguez *et al.* (2017) una UGS corresponde a un conjunto (homogéneo) de materiales geológicos que afloran en la superficie y se extienden hasta algunas decenas de metros por debajo de la superficie del terreno, tienen el mismo origen y presentan en general las mismas características físicas y de comportamiento geomecánico.

Las UGS se clasifican en suelos y rocas; las unidades de roca se clasifican según su origen, composición mineralógica, grado de meteorización o alteración, dureza o resistencia, índice de resistencia geológica (GSI). Por su parte, los suelos son diferenciados de acuerdo con su origen, composición mineralógica, clasificación genética, características y propiedades del suelo, estructura o empaquetamiento, selección, gradación, color, tamaño, forma y composición de las partículas, grado de meteorización, consistencia, resistencia, condición de humedad, densidad relativa, compacidad, propiedades de la masa del suelo, estructuras relictas o discontinuidades en la masa de suelo y propiedades ingenieriles (Rodríguez *et al.*, 2017).

La clasificación en UGS tipo roca y tipo suelo, de acuerdo con su origen, según lo propuesto por Hermelín (1985) citado por Rodríguez *et al.* (2017), se realiza dentro de los siguientes grandes grupos:

- Rocas.
- Suelos residuales y saprolitos (según perfil de meteorización de Dearman, 1974).
- Suelos transportados de diferente origen (aluvial, de ladera o coluvial, costero, volcánico, eólico y glaciario).
- Suelos antrópicos.

En el sector visitado de Puerto Escondido se hallaron tres unidades de suelo, cuya nomenclatura se basa en lo propuesto por SGC y UN (2016) y Rodríguez *et al.* (2017), de la siguiente manera:

- La primera letra, en mayúscula, indica el suelo (S).
- La segunda letra indicará el origen: transportado (t), residual (r) o antrópico (a). La tercera letra indica el tamaño del grano predominante o la textura del material, por ejemplo, "a" para arcilloso, "l" para limoso, "ar" para arenoso, "g" para gravoso y asociando las respectivas letras para sus combinaciones. Finalmente, si se considera pertinente, se pueden agregar al nombre otras letras que indiquen alguna característica geotécnica del material.

A continuación, se describen las UGS identificadas a partir de las observaciones de campo en el área del movimiento en masa del cerro Santa Cruz, que son: suelo transportado de flujo del volcán de lodo (Stfvl), suelo residual de arcillolitas de la Formación Morrocoy (Sram) y suelo transportado de coluvión (Stco).

4.4.1. Suelo transportado de flujo del volcán de lodo (Stfvl)

Este suelo se origina como producto de antiguos eventos eruptivos del volcán de lodo de Puerto Escondido. Conforman un depósito con pulsos de diferentes flujos que van cubriendo la superficie del terreno favorecidos por la pendiente de las laderas.

El suelo es matriz soportado (matriz 80 %, clastos 20 %); la matriz es de textura predominantemente arcillosa que varía localmente a limo arcillosa, clasificada según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos - SUCS como CH "arcilla de alta plasticidad"; de color marrón a pardo con tonos grises, con índice de plasticidad del 33 % (altamente plástico); contenido de humedad media del 25 %, en algunos sectores con flujo de agua presente; de consistencia blanda ($S_u=26,36$ kPa), sin estructuras relictas. Cuando se encuentra en estado seco desarrolla grietas por desecación. Puede tener algunos restos vegetales carbonizados de pequeño tamaño (< a 1 cm).

Los clastos observados están compuestos por calizas arrecifales de color blanco grisáceo y en estado de meteorización amarillo ocre con manchas naranja, con alto contenido de material orgánico (bioquímico) como restos de corales y bivalvos. Los clastos son de tamaños predominantemente entre gravas gruesas a cantos (7-30 cm), con algunos bloques tabulares o prismáticos hasta de 70 cm, con bordes angulares y subangulares y un estado de meteorización moderado a leve. Este material comprende una buena parte de la masa desplazada en la zona topográficamente alta (zona de inicio) y parte central del cuerpo del movimiento en masa. Por sus características y origen, es un suelo sensible a la humedad, propenso al desarrollo de procesos de erosión y movimientos en masa. No fue posible observar su contacto inferior, sin embargo, por lo visto en campo se estima que puede tener un espesor superior a los 10 m (figuras 20 y 21).

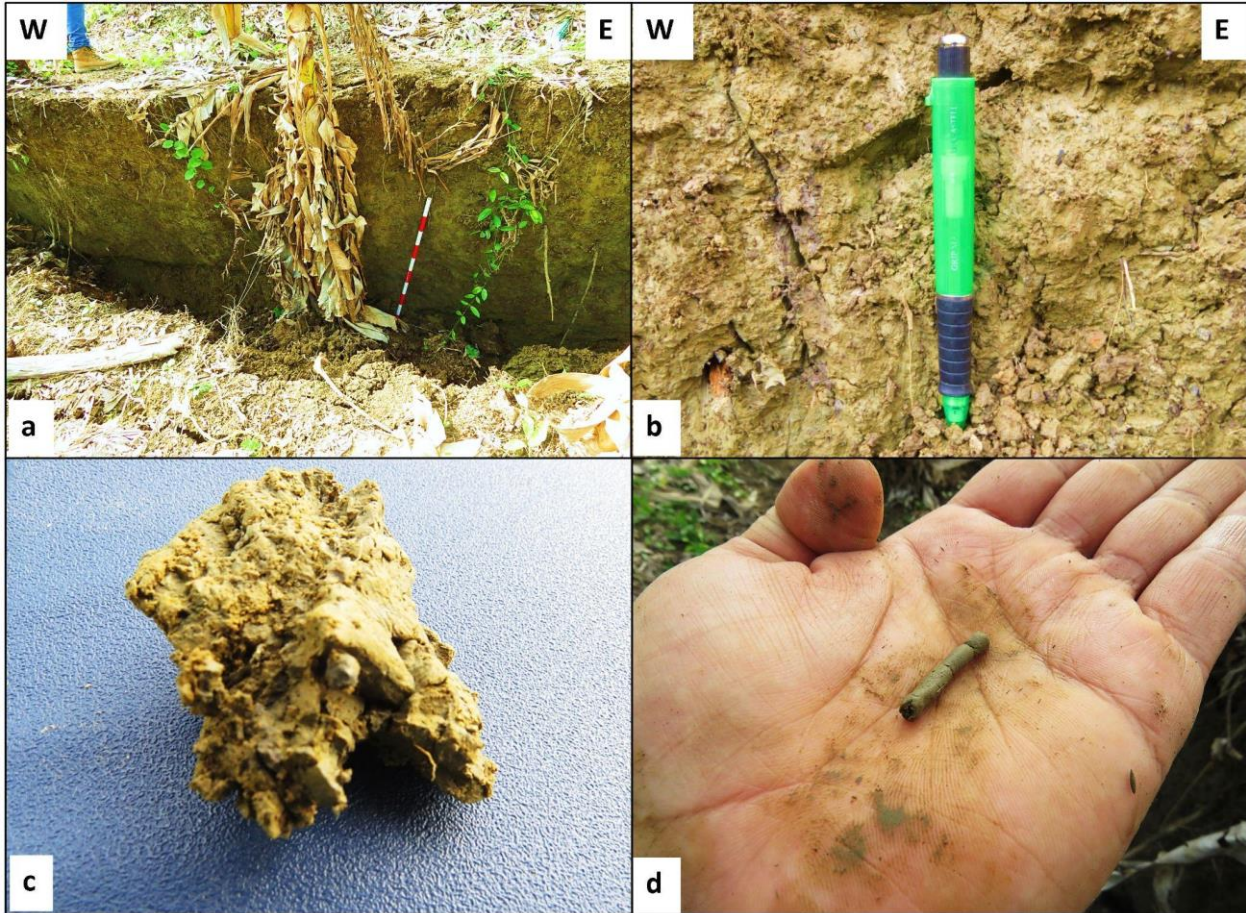


Figura 20. Suelo transportado de flujo del volcán de lodo (Stfvl)
Afloramiento encontrado sobre un escarpe que conforma la parte alta del flanco derecho del movimiento. a) y b) Panorámica y detalle del afloramiento; c) detalle de clastos de limolitas, tamaño grava fina, embebidos en matriz arcillosa; d) aspecto de la plasticidad del suelo.

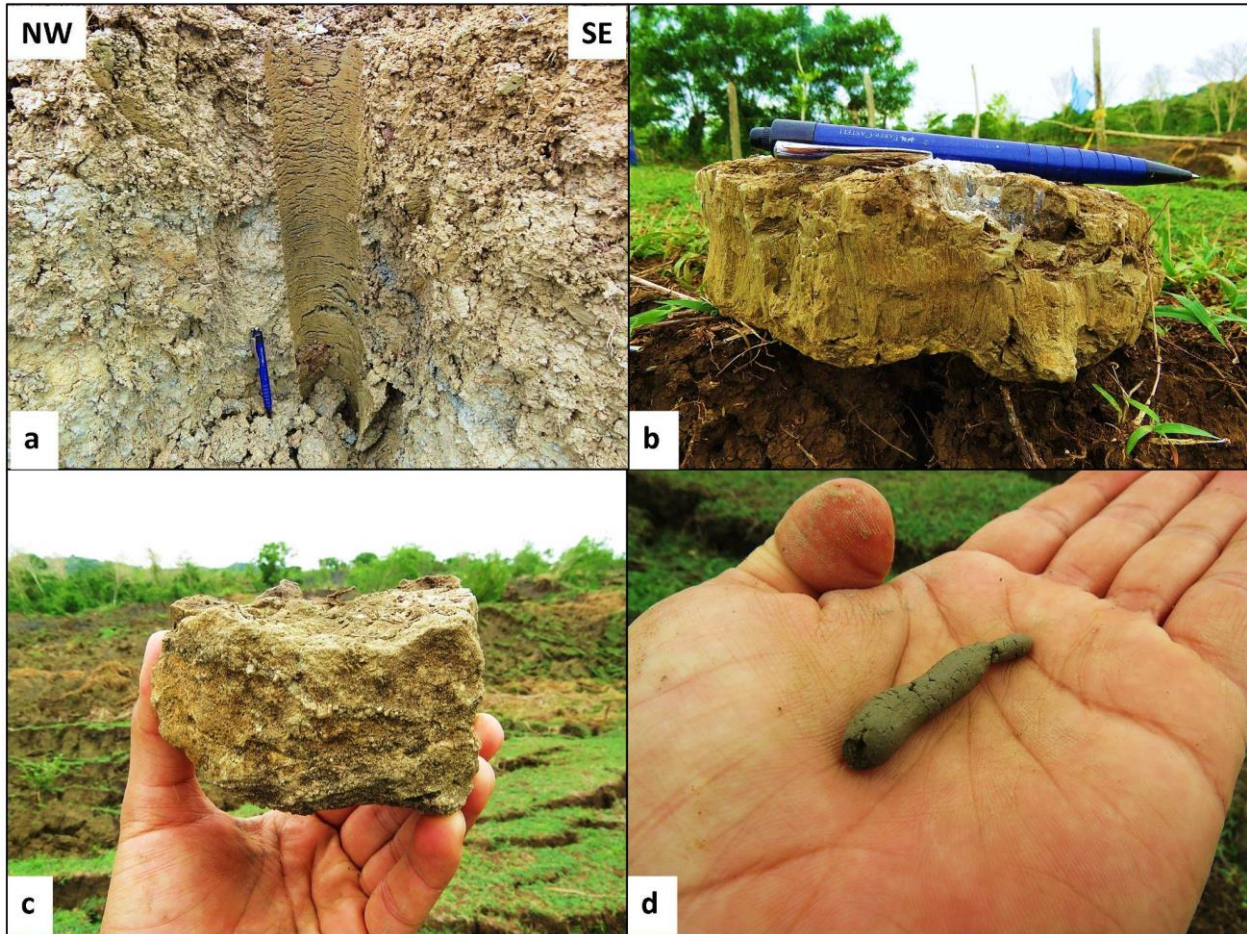


Figura 21. Afloramiento de la unidad de suelo transportado de flujo del volcán de lodo (Stfvl) Afloramiento sobre un escarpe en la zona de transición entre la corona y flanco izquierdo del proceso. a) Panorámica del afloramiento; b) y c) detalle de los bloques de calizas arrecifales encontrados en el suelo; d) aspecto de la plasticidad de la matriz arcillosa del suelo

Es importante mencionar que localmente en la parte alta del movimiento, el suelo puede tener un aumento en la proporción de clastos hasta un 40%, lo que se pudo constatar mediante visuales hacia la masa desplazada del proceso, sin poder acceder hasta el sitio debido a las dificultades de tránsito por las grietas y escarpes (figura 22).



Figura 22. Proportión de clastos dentro del almacén del suelo
Visual hacia la masa desplazada en la parte alta del movimiento.

4.4.2. Suelo residual de arcillolitas de la Formación Morrocoy (Sram)

Es un suelo derivado de intercalaciones entre arcillolitas y limolitas de color gris parduzco a ocre de la unidad Morrocoy-El Pantano (Mgmp). Corresponde a un suelo residual grado de meteorización V (según Dearman, 1974) con presencia de fragmentos de roca parental menor al 30%.

La fracción fina del suelo es de textura arcillosa a limo arcillosa color crema a habano claro, consistencia blanda a media, muy húmedo a saturado, plástico a moderadamente plástico, con algunas zonas que conservan ciertas estructuras relictas de estratificación. En estado seco, puede desarrollar grietas por desecación.

La fracción gruesa del suelo está compuesta por fragmentos de limolitas de color gris a pardo rojizo claro, de tamaños gravas finas a gravas gruesas (hasta 7 cm), de formas laminares, tabulares y prismáticas, subangulares a muy angulares, con meteorización leve a moderada (manchas por oxidación). También se encontraron fragmentos de concreciones lodosas con anillos de oxidación, de tamaños entre 8-15 cm.

Este material fue identificado hacia la parte alta de la ladera que conforma el flanco izquierdo del movimiento, sobre algunos taludes de corte de la vía que comunica hacia el cerro Santa Cruz. También se observó sobre la ladera sur del cerro Tortugón, límite topográfico natural para detener el avance progresivo del movimiento en masa. Puede estar cubierto parcialmente por suelo transportado de flujo del volcán de lodo o por suelo transportado de coluvión. En los afloramientos identificados se estima que puede tener un espesor variable entre 1 m a 2 m (figura 23).

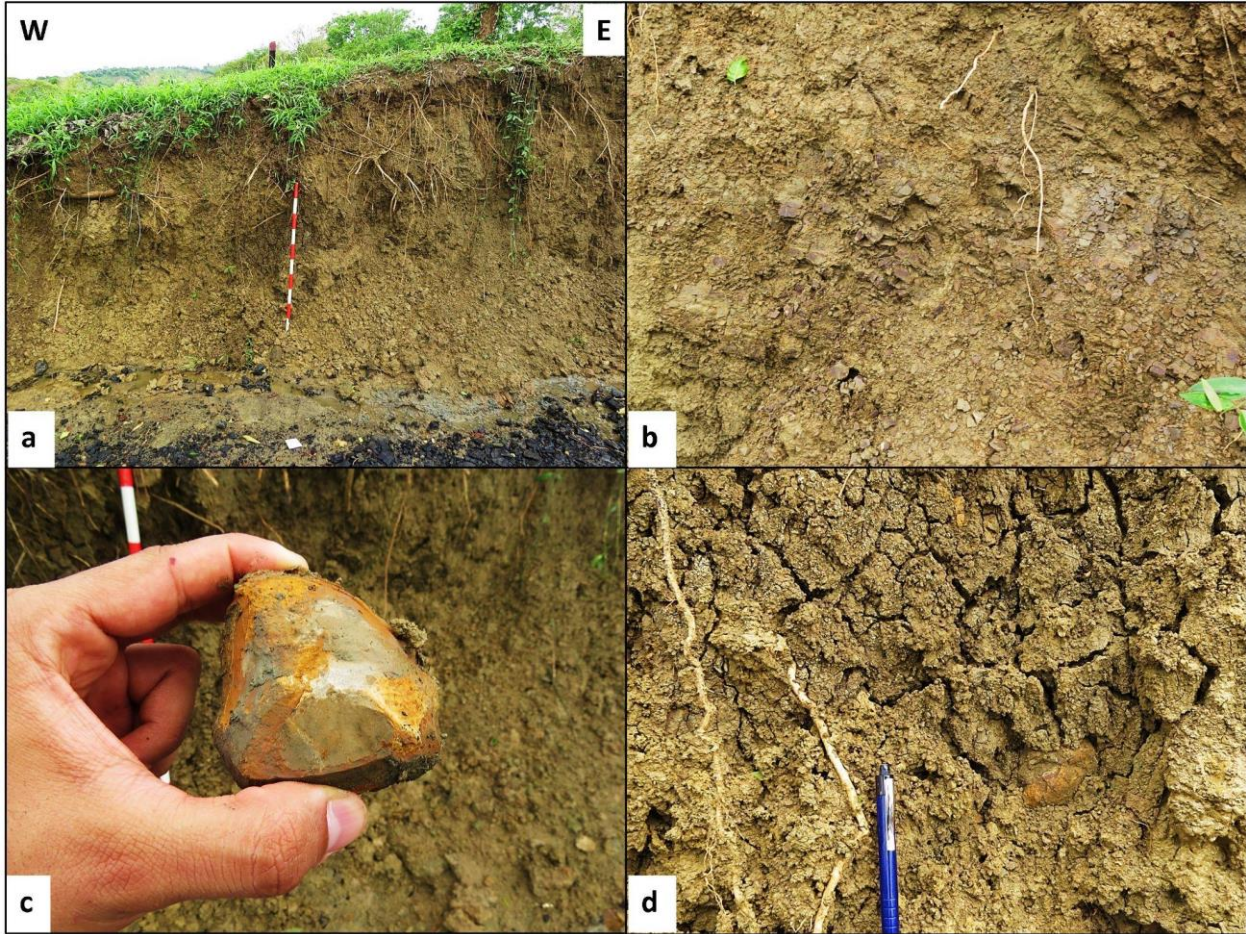


Figura 23. Afloramiento de la unidad Suelo residual de arcillolitas de la Formación Morrocoy (Srafm) Talud de corte vial, en el cerro Santa Cruz, en la parte alta de la ladera del flanco izquierdo del movimiento en masa. a) y b) Panorámica y detalle del afloramiento; c) detalle de fragmento de concreción lodosa con anillos de oxidación; d) detalle de grietas por desecación en la fracción fina del suelo.

4.4.3. Suelo transportado de coluvión (Stco)

Depósito de suelos removilizados por antiguos movimientos en masa sobre las laderas del volcán de lodo. Este tipo de suelo es matriz soportado (matriz 95 %, clastos 5 %) predominantemente fino; la matriz es de textura arcillosa clasificada según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos - SUCS como CH “arcilla de alta plasticidad”, de color marrón claro, con contenido de humedad del 73 % (húmeda a saturada), con índice de plasticidad del 52,5 %, de consistencia muy blanda ($S_u=14,43$ kPa). Los clastos son de limolitas principalmente y se encuentran diseminados esporádicamente, de tamaños gravas finas a gruesas (hasta 4 cm), formas prismáticas a tabulares con meteorización moderada.

Se identificó en la parte media y baja de algunas laderas del flanco izquierdo del movimiento. También se observaron algunas ocurrencias de este material al pie de una ladera en cercanías al barrio Simón Bolívar, pero no dentro del cuerpo del movimiento en masa. El espesor de este tipo de suelo puede estar entre 2-4 m (figura 24). En la ladera del flanco izquierdo del movimiento principal se encontraron deformaciones en el terreno a manera de ondulaciones relacionadas con la presencia de coluviones, asociados a antiguos movimientos en masa que fueron reportados por Carvajal (2001) en el mismo sector. Adicionalmente, en la parte central y baja del movimiento en masa se distribuye también este tipo de suelo, asociado al

antiguo deslizamiento reportado por Parra (1989). Por tratarse de materiales que han sido removidos de manera natural, han perdido sus propiedades y resistencia natural, por lo que son inestables y pueden movilizarse nuevamente bajo ciertas condiciones del terreno y ante posibles eventos de lluvia máxima o sismos de gran magnitud.

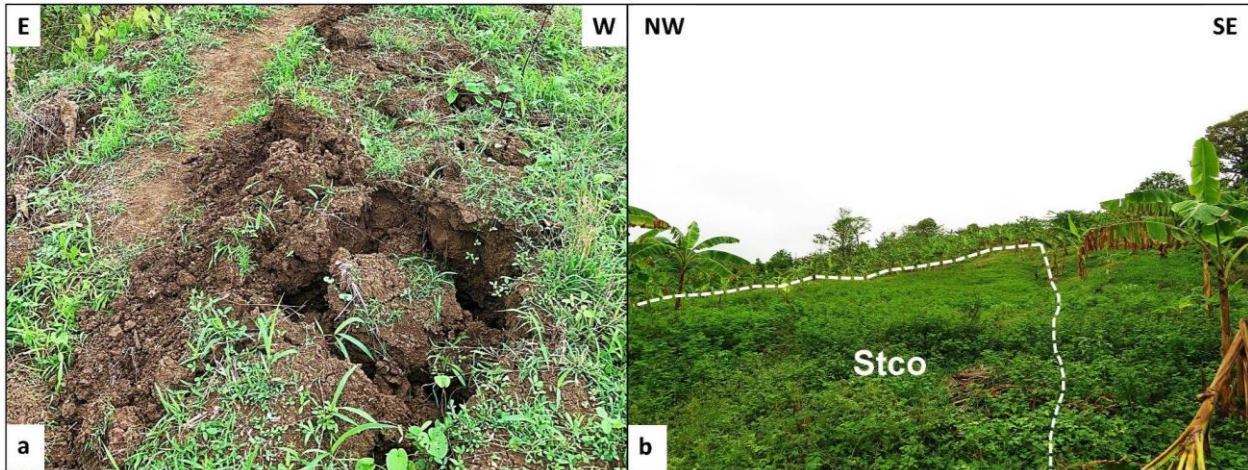


Figura 24. Suelo transportado de coluvión (Stco)

a) Material movilizado por deslizamiento sobre la ladera del flanco izquierdo del movimiento principal; b) depósito de coluvión antiguo en la ladera que se encuentra sobre el barrio Simón Bolívar

5. Características geomorfológicas

5.1. Unidades geomorfológicas

De acuerdo con el mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa de la plancha 50 Puerto Escondido (SGC y UN Medellín, 2015), en el área circundante al cerro Santa Cruz y al centro poblado de Puerto Escondido, se encuentran geoformas de origen estructural como domo diapírico (Sdd) y lomos (SI); de origen marino como terraza marina (Mtm) y de origen denudacional como lomo residual (Dires) (figura 25).

5.1.1. Domo diapírico (Sdd)

Prominencia topográfica de morfología redondeada en planta y alomada a colinada en superficie, con alturas relativas muy bajas a bajas (20-100 m); pendientes inclinadas a muy inclinadas (6° - 13°) y laderas cortas a largas (180-1000 m). Esta geoforma corresponde al cerro Santa Cruz que conforma la estructura del volcán de lodo de Puerto Escondido (SGC y UN Medellín, 2015). Carvajal (2001) lo definió como domo volcánico de lodo.

5.1.2. Lomos (SI)

Prominencia topográfica de morfología alomada y elongada preferencialmente en dirección noreste, conformada por sistemas o conjuntos de filos ubicados a diferentes alturas. Presentan laderas cortas a moderadamente largas (hasta 430 m en algunos sectores), escalonadas, cóncavas y convexas, con pendientes que varían de abruptas a escarpadas (17° - 39°). Las cimas son redondeadas a

semiredondeadas, que siguen una tendencia estructural regional demarcada por múltiples lineamientos dentro de la unidad. La altura relativa varía entre muy baja a baja (70-225 m) con respecto al nivel base local.

Su origen está relacionado con la acción conjunta de procesos tectónicos moderados a intensos, zonas de fallas y procesos de meteorización y denudación que afectan rocas sedimentarias de la unidad Morrocoy–El Pantano (SGC y UN Medellín, 2015). Se localizan al oriente y sur del cerro Santa Cruz, el cual interrumpe de manera discordante la tendencia de los lomos y la secuencia sedimentaria que los conforma.

5.1.3. Terraza marina (Mtm)

Superficies elevadas, horizontales a sub-horizontales, con alturas variables con respecto al nivel del mar; se pueden extender por varios kilómetros y limitadas al occidente por el mar y al oriente por lomeríos, acantilados o domos diapíricos.

Su origen se encuentra influenciado por la tectónica y por los cambios en el nivel del mar. Antes de la formación de una terraza marina es necesario un medio propicio para el crecimiento de corales y algas coralinas, o formación de playas. En contraste, también pueden generarse terrazas marinas a partir de plataformas de abrasión levantadas (SGC y UN Medellín, 2015).

En Puerto Escondido, el centro poblado se localiza sobre esta geoforma hacia la línea de costa, donde su altura promedio es de 20 m, predominando en algunos sectores alturas entre 1 y 4 m. Se encuentran a lo largo de la franja costera, intercaladas con bahías de playas y lomeríos; aunque son formaciones recientes, presentan indicios de erosión por acción del mar, como cuellos, pilares, grietas y canales submarinos. Carvajal (2001) las definió como plataformas de abrasión elevadas.

5.1.4. Lomo residual (Dlres)

Elevación del terreno con morfología alomada y alargada, con alturas relativas de muy bajas a bajas (10-160 m) sobre el nivel base local y generalmente modelada sobre materiales afectados por intensa meteorización diferencial. Esta unidad presenta cimas amplias, circulares a semicirculares, con laderas rectas, de longitudes cortas a moderadamente largas (110-380 m) y pendientes muy inclinadas a muy abruptas (8°-30°) y ocasionalmente escarpadas (>33°) (SGC y UN Medellín, 2015). Están constituidos por rocas sedimentarias de la unidad Campano y la Morrocoy-El Pantano. Carvajal (2001) la definió como cerros, crestas y lomas.

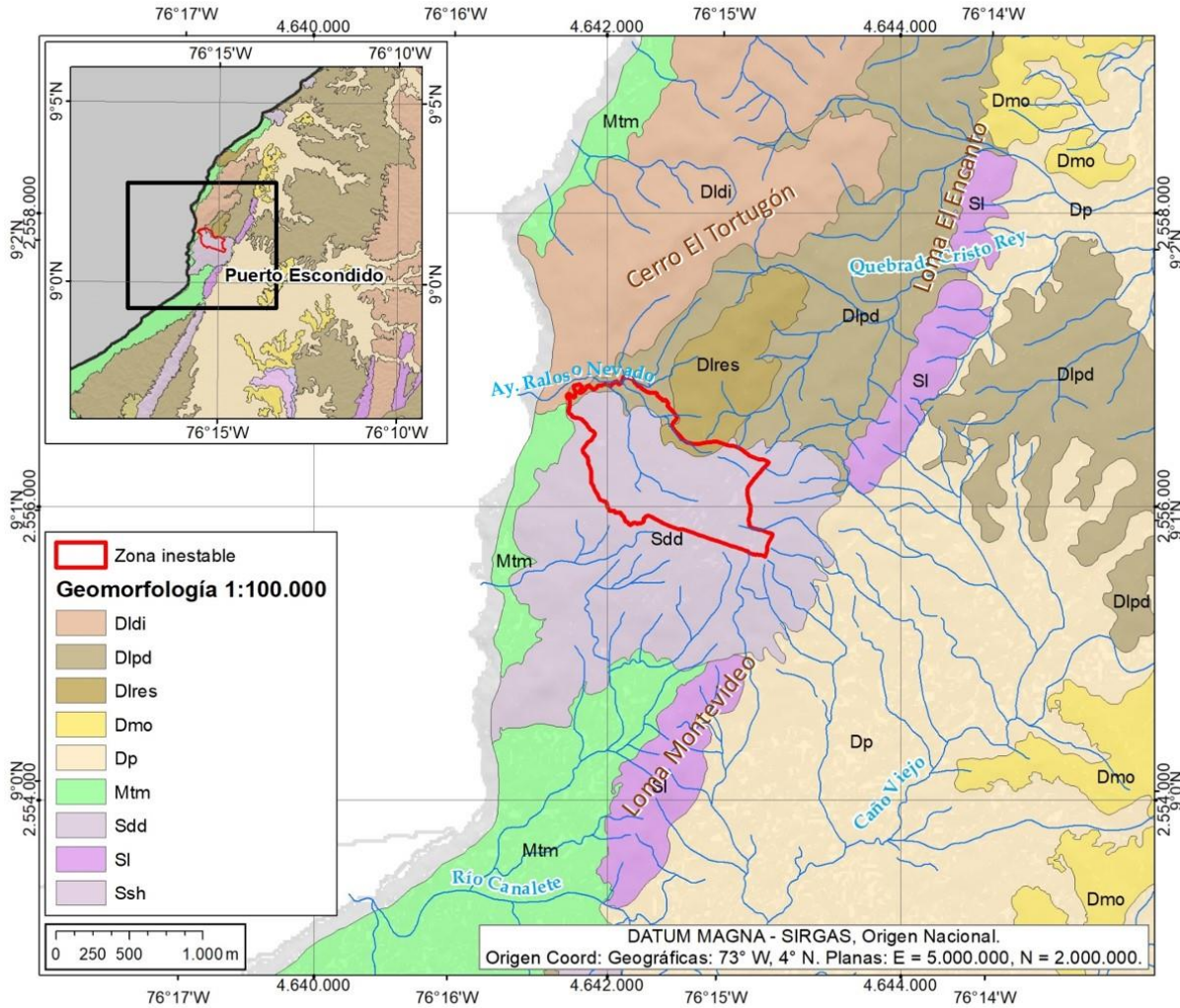


Figura 25. Contexto geomorfológico regional del área de Puerto Escondido, sector cerro Santa Cruz. Se indica en el polígono rojo el área de interés de la visita. Se destacan las geomorfomas domo diapírico (Sdd), lomo (SI), terraza marina (Mtm) y lomo residual (Dlres). Fuente: adaptado de SGC y UN Medellín (2015).

6. Caracterización de la precipitación

En el municipio de Puerto escondido se encuentran dos estaciones que registran la precipitación, ubicadas cerca del área de interés (figura 26). Sin embargo, al hacer una revisión exhaustiva de los registros se verificó que la estación JARAMAGAL [12040010] tiene registro hasta el 31 de agosto del 2021, por lo que se utiliza la estación CRISTO REY - AUT [12045020], la cual cuenta con registro de precipitación diaria desde 1973 hasta 2023. Esta última se encuentra ubicada al norte del municipio, a 7 km aproximadamente del sitio afectado por el movimiento en masa.

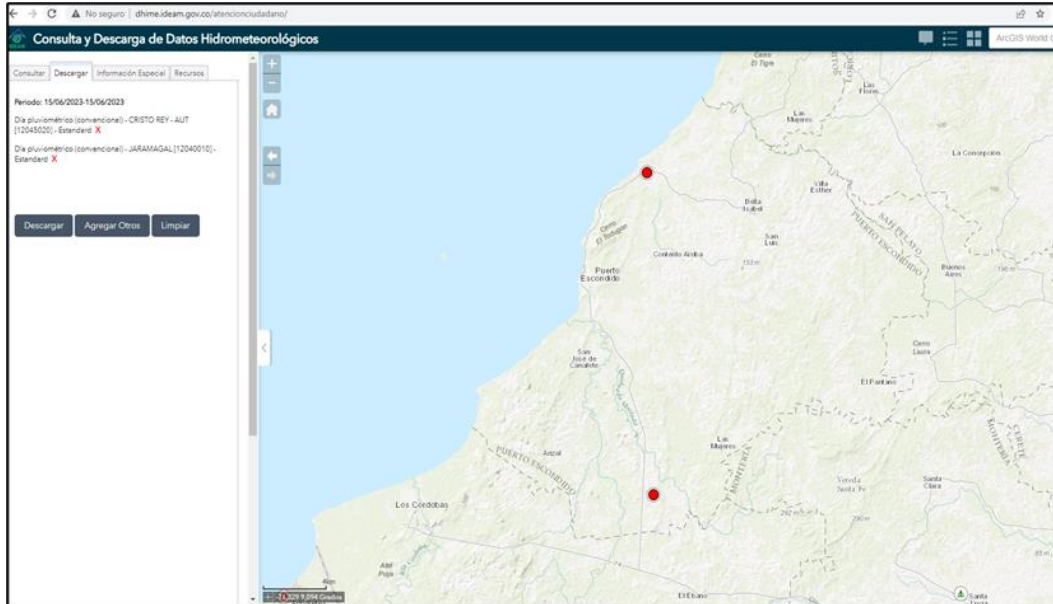


Figura 26. Estaciones de precipitación operadas por el Ideam, cercanas al municipio de Puerto Escondido
Fuente: <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

Con la información obtenida de la estación pluviométrica se construye la serie de tiempo de precipitaciones totales diarias (figura 27).

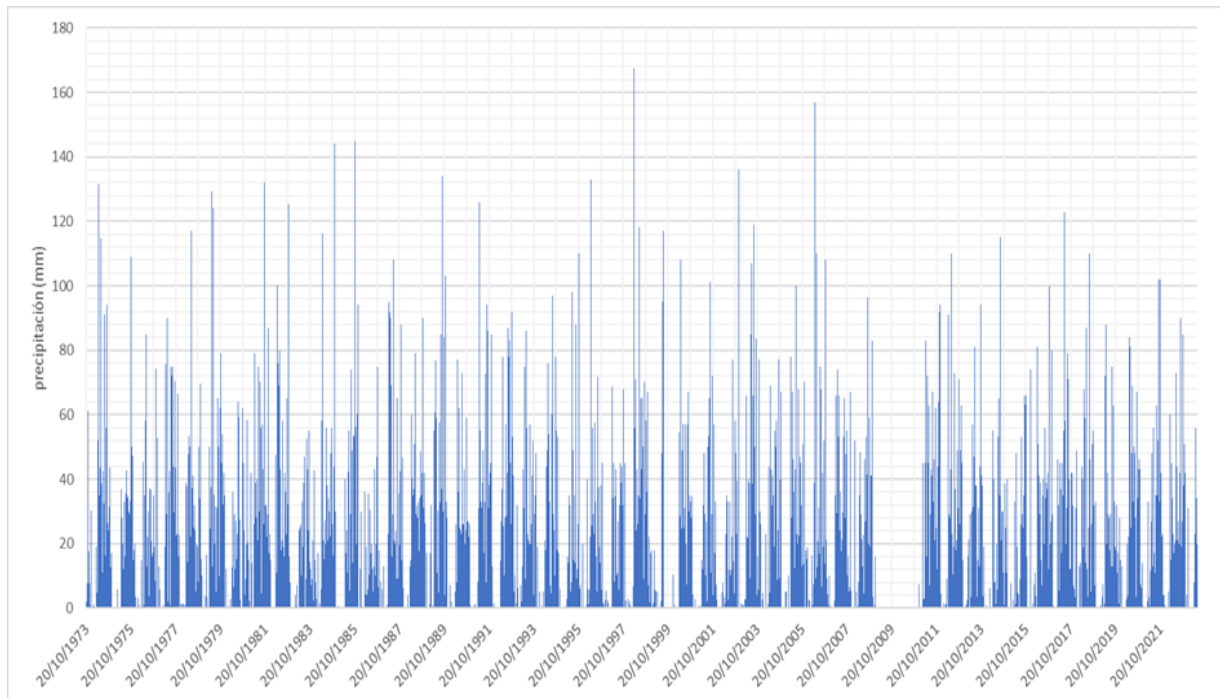


Figura 27. Serie de precipitación diaria –Estación CRISTO REY-AUT [12045020]
Fuente: <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

6.1. Análisis exploratorio de la serie de precipitación

Este análisis tiene como objetivo caracterizar la precipitación en la zona de estudio y su distribución temporal a lo largo del año, evaluando la homogeneidad y consistencia de los datos y así determinar el régimen de precipitación en el municipio.

6.1.1. Homogeneidad y estacionariedad de los datos

El análisis de homogeneidad y estacionariedad de los datos se realiza para determinar la tendencia de los datos o cambio dentro del comportamiento histórico de las series, para lo cual, se aplican las siguientes pruebas.

Prueba estadística de homogeneidad de la media y la varianza

Con el objetivo de determinar si una serie de datos es consistente con respecto a la media aritmética, es decir, que no varía significativamente a lo largo de toda la serie, se realiza la prueba de t de Student, la cual tiene como hipótesis nula la igualdad entre la media de dos muestras relacionadas entre sí, donde se seleccionan cuatro pares de muestras con distintas cantidades de datos. De la prueba se obtiene un estadístico que representa el valor crítico de la prueba t de Student, el cual es un valor fijo establecido según el nivel de significación (5%) y los grados de libertad. Por tal motivo, este valor es consultado en tablas teóricas en las que se satisfagan las características de la serie de datos (relacionado a los grados de libertad). De forma similar que la prueba de media estadística, esta verificación de homogeneidad se lleva a cabo mediante la prueba F de Fisher, la cual se da al comparar la varianza de dos muestras de la serie completa de datos. La hipótesis nula es que los dos conjuntos de valores tienen igual varianza. Al igual que en la anterior prueba, el estadístico teórico se halla consultando tablas con valores definidos por el nivel de significación (5%) y los grados de libertad. Así mismo, esta prueba confronta los valores de los estadísticos obtenidos anteriormente y en consecuencia, se define si la serie es homogénea o no.

En la tabla 2 se presentan los resultados de las pruebas realizadas, donde se observa que la estación es homogénea en la media y en la varianza, por lo cual es apta para los análisis estadísticos.

Tabla 2. Análisis de homogeneidad y consistencia para la estación CRISTO REY - AUT [12045020]

SUBSERIE	% DAT	# DAT	t	T	f	F	CHEQUEO	
SS1	0,2	110					H EN PROMEDIO	t<T
SS2	0,8	442	0,08	1,96	1,07	1,30	H EN VARIANZA	f<F
SUBSERIE	% DAT	# DAT	t	T	f	F	CHEQUEO	
SS1	0,4	221					H EN PROMEDIO	t<T
SS2	0,6	331	0,26	1,96	1,01	1,22	H EN VARIANZA	f<F
SUBSERIE	% DAT	# DAT	t	T	f	F	CHEQUEO	
SS1	0,6	331	-0,26	1,96	1,01	1,22	H EN PROMEDIO	t<T
SS2	0,4	221					H EN VARIANZA	f<F
SUBSERIE	% DAT	# DAT	t	T	f	F	CHEQUEO	
SS1	0,8	442	-0,08	1,96	1,07	1,30	H EN PROMEDIO	t<T
SS2	0,2	110					H EN VARIANZA	f<F

SS= Subserie.

t= Estadístico experimental de la prueba t de Student a partir de los datos de precipitación.

T= Estadístico teórico de la prueba t de Student con 95% de confiabilidad.

f= Estadístico experimental de la prueba f de Fisher a partir de los datos de precipitación.

F= Estadístico de la prueba f de Fisher con 95% de confiabilidad.

H= Homogénea

6.1.2. Patrón temporal de la precipitación

A continuación, se presenta la descripción de los patrones temporales de la precipitación en la estación de estudio, los cuales incluyen la distribución de la precipitación total mensual, la precipitación máxima en 24 horas y el número de días con lluvia.

Precipitación total mensual

Se realizó el análisis de los datos de precipitación disponibles desde 1973 hasta 2022 para la estación CRISTO REY - AUT [12045020], descartando los meses donde falte el 25% de datos diarios. La precipitación total promedio multianual en la estación es de 1443 mm, con valores promedio entre 5,7 mm (febrero) y 208 mm (mayo). Se evidencia que el régimen de lluvias es de tipo monomodal, con periodos altos ocurriendo de abril a noviembre (figura 28). En condiciones mínimas históricas de precipitación, se encuentran meses donde no se presenta precipitación entre diciembre y abril. Por otra parte, los registros máximos se han presentado en el mes de octubre con valores de hasta 505,6 mm.

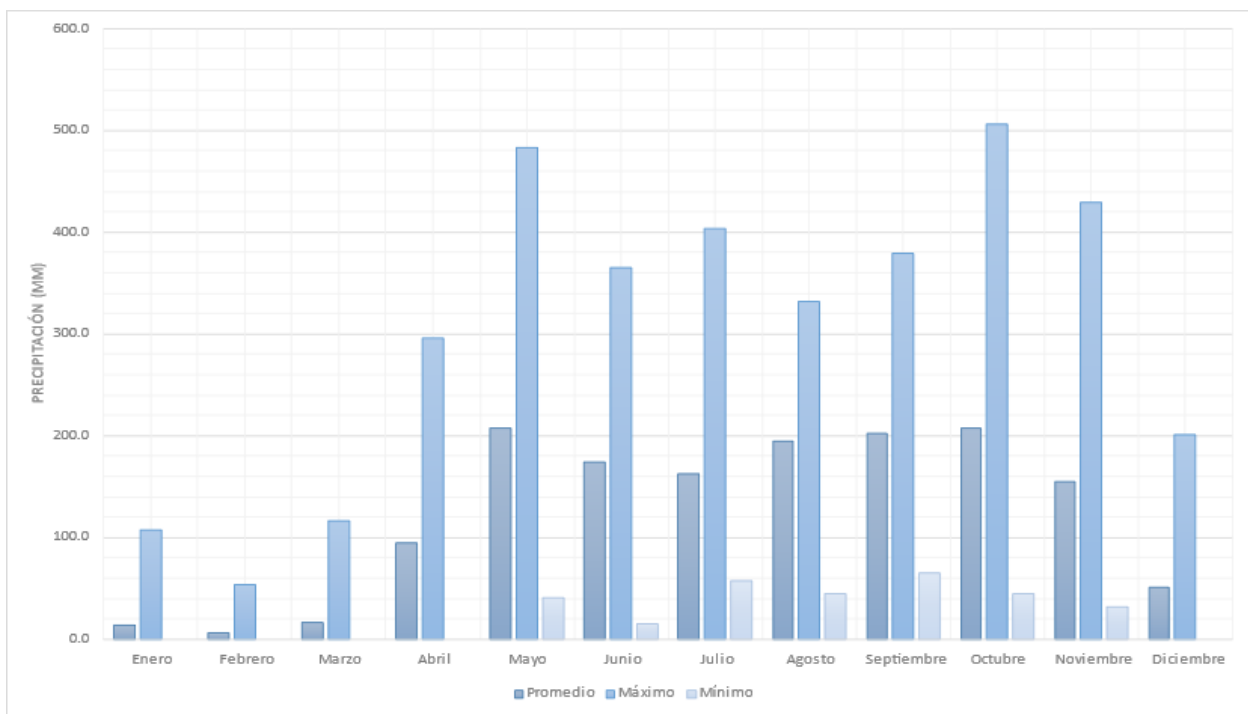


Figura 28. Precipitación total mensual-estación CRISTO REY - AUT [12045020]

En la figura 29 se muestra el comportamiento de la lluvia en cada mes desde 1974 hasta mayo de 2023, donde se destaca en colores azules los valores extremos de precipitación en los meses de octubre de 1985, mayo de 1987 y julio de 2017, entre otros.

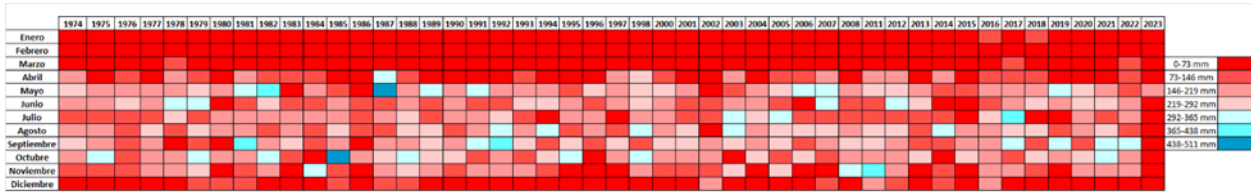


Figura 29. Matriz de calor para la precipitación mensual - estación CRISTO REY - AUT [12045020]

Precipitación máxima en 24 horas

La precipitación máxima en 24 horas promedio multianual en la estación es de 106,9 mm; con valores promedio entre 4,9 mm (febrero) y 62,2 mm (octubre) como se observa en la figura 30. En condiciones mínimas históricas de precipitación, se encuentran meses donde no se presenta precipitación entre diciembre y abril. Por otra parte, los registros máximos se han presentado en el mes de abril con valores de hasta 167,5 mm, correspondiente a un evento de tipo Niña en 1998.

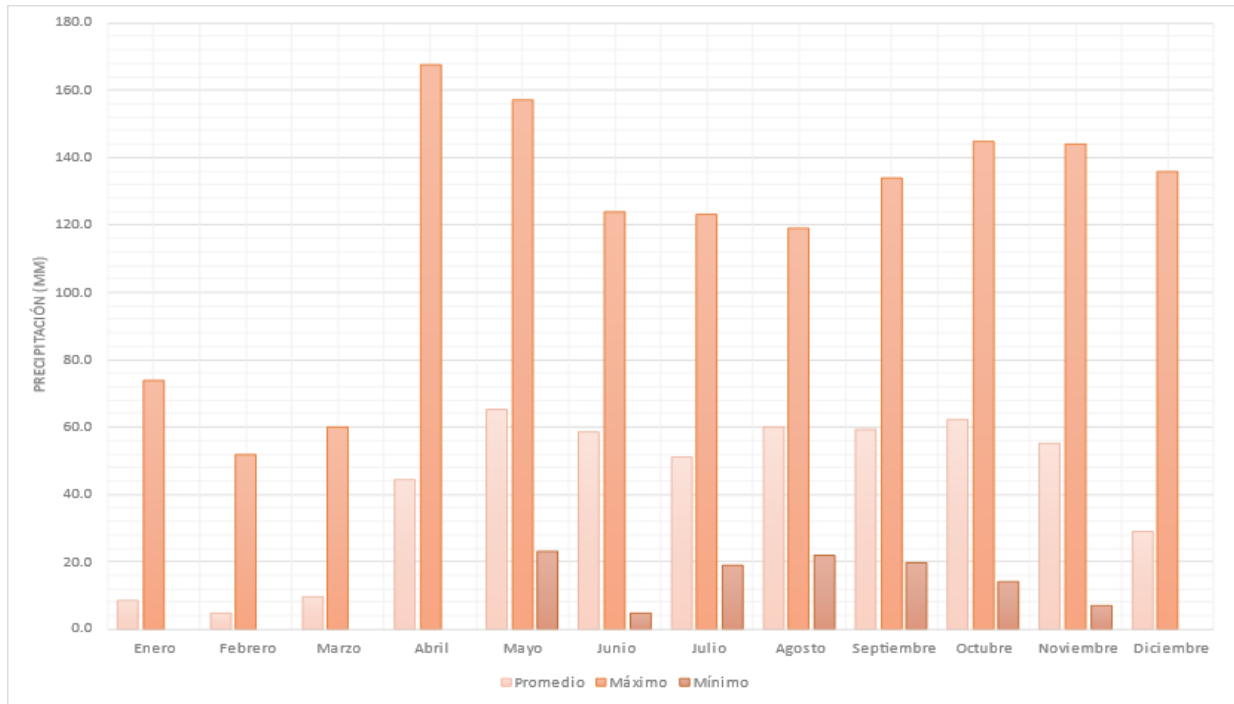


Figura 30. Precipitación máxima en 24 horas- estación CRISTO REY - AUT [12045020]

Número de días con lluvia

En promedio, en la estación se registran 117 días con lluvia, con valores entre 1 día (febrero) y 16 (agosto y septiembre) como se observa en la figura 31. En condiciones mínimas históricas de precipitación, se encuentran meses donde no se presenta precipitación entre diciembre y abril. Por otra parte, los registros máximos se han presentado en el mes de agosto con valores de hasta 25 días de lluvia, correspondiente a un evento de tipo Niña en 1988.

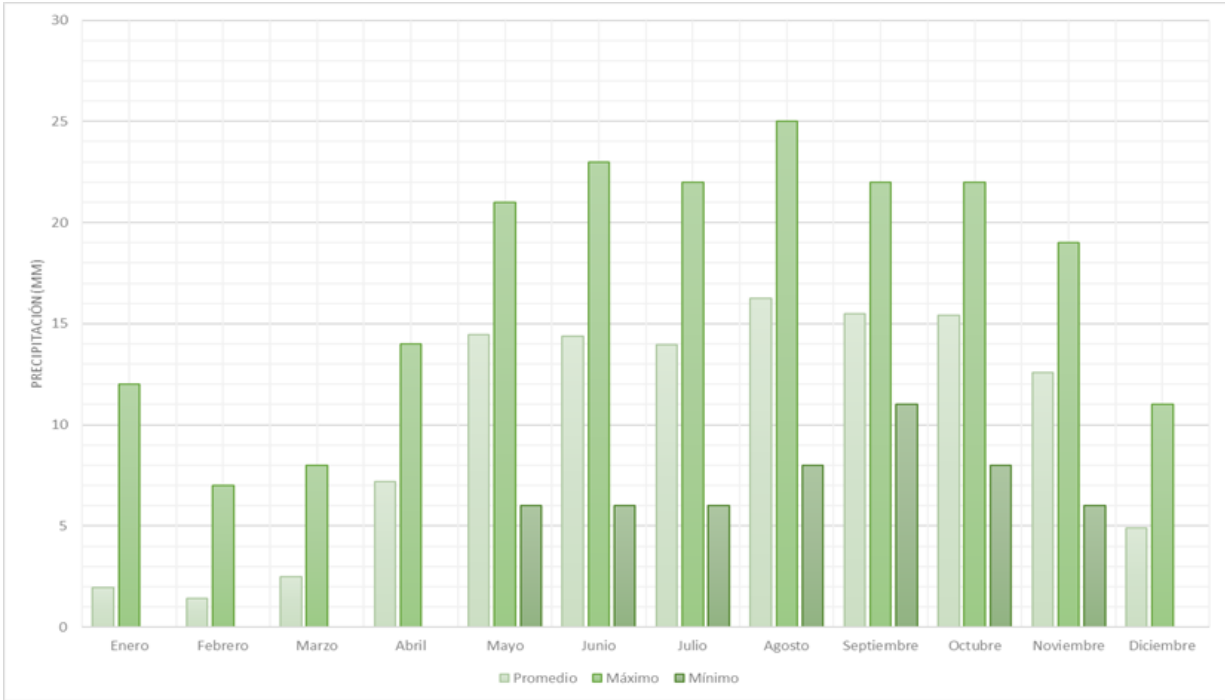


Figura 31. Número de días con lluvia- estación CRISTO REY - AUT [12045020]

6.2. Análisis comparativo de las precipitaciones promedio multianuales

En esta sección se presenta un comparativo acerca de la precipitación promedio multianual. Lo anterior, a partir del análisis del promedio teniendo en cuenta todo el registro de la estación en comparación con el promedio presentado en cada uno de los últimos cuatro años, esto con el objetivo de observar si existe una tendencia al aumento de la precipitación en la zona en los últimos años.

Al observar los promedios multianuales de precipitación de la serie se puede determinar que, en los años 2020, 2021 y 2022, se presentaron valores entre 36 mm y 230 mm superiores al promedio registrado de toda la serie hasta 2018 (figura 32 y tabla 3). Por otra parte, desde 2019 se observa un incremento en los días con lluvia, siendo 2020 el año que presentó un mayor incremento, con 20 días más de precipitación con respecto al promedio de la serie, como se observa en la tabla 3. Sin embargo, no se presenta una tendencia significativa al aumento de la precipitación media anual.

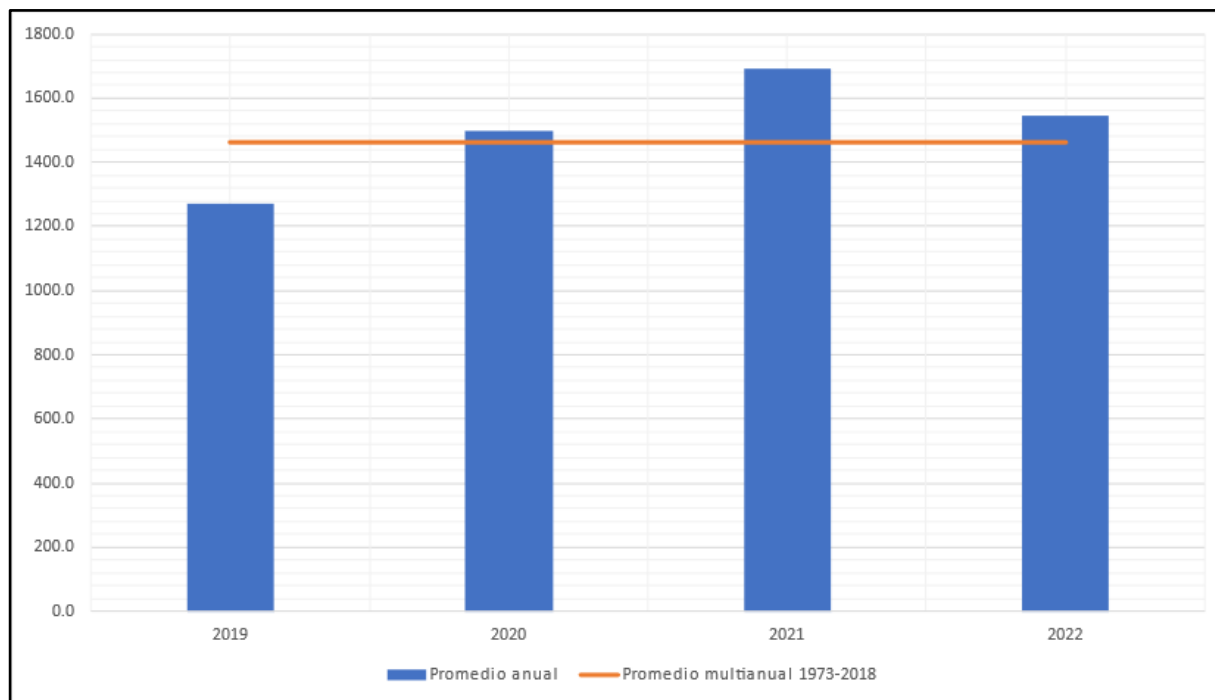


Figura 32. Comparativo de la precipitación media anual

Tabla 3. Precipitación media anual y número de días con lluvia

Año	Promedio multianual	N° de días con lluvia
1973-2018	1460,6	118
2019	1271,5	121
2020	1496,7	137
2021	1690,2	133
2022	1543,0	133

6.3. Análisis comparativo de las precipitaciones promedio multianuales hasta el mes de mayo

El movimiento en masa se presentó el 24 de mayo del presente año, por lo cual se realizó el análisis de precipitación acumulada desde el mes de enero hasta el mes de mayo de los últimos cuatro años y se contrastó con el promedio multianual de precipitación acumulada que registró la estación de estudio desde 1973 hasta 2018.

Al realizar el análisis comparativo se observa que la precipitación acumulada hasta el mes de mayo en el 2023 es menor en 72,2 mm con respecto al promedio histórico de la serie, como se observa en la figura 33. Esto mismo se observa en los días con lluvia, los cuales son menores en 10 días con respecto al promedio de la serie (tabla 4).

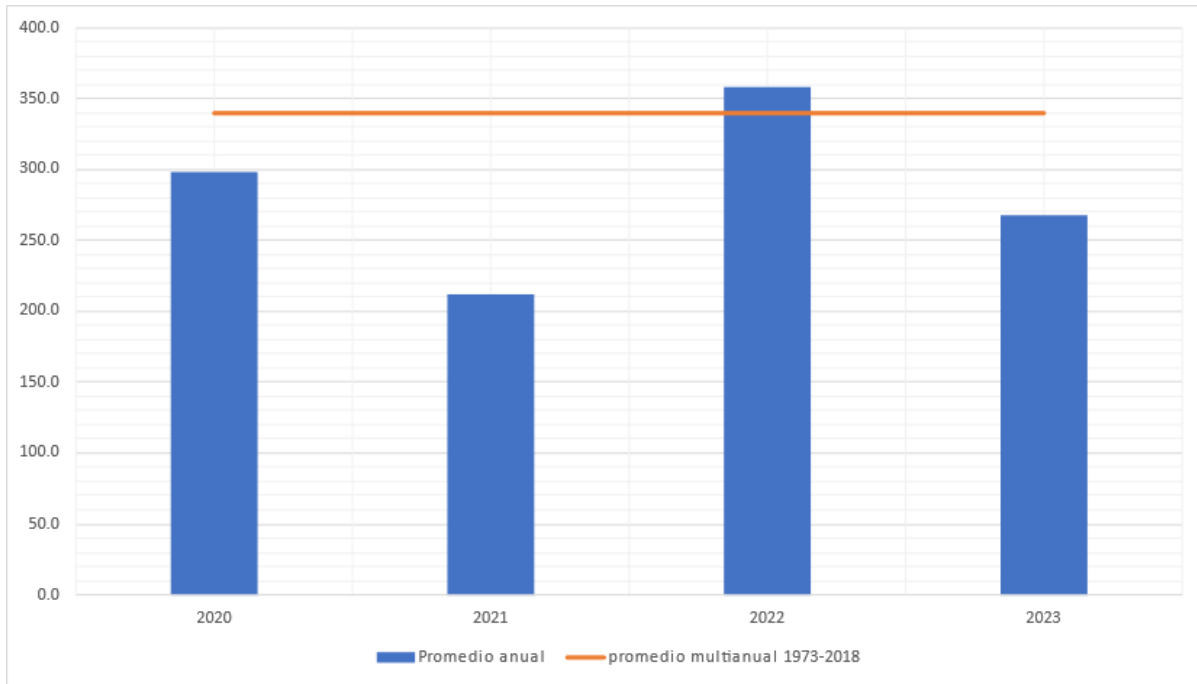


Figura 33. Comparativo de la precipitación acumulada hasta el mes de mayo

Tabla 4. Precipitación acumulada y número de días con lluvia hasta el mes de mayo

Año	Promedio multianual	N° de días con lluvia
1973-2019	340,2	27
2020	298,5	26
2021	211,5	28
2022	358,0	35
2023	268,0	17

A partir de lo anterior, se observa que en los últimos años no se presenta una tendencia al aumento de las precipitaciones de la zona, por lo cual se puede determinar que la precipitación total hasta el mes de mayo en el corrido de 2023 se encuentra dentro de las condiciones normales.

6.4. Análisis comparativo de las precipitaciones diarias previas al movimiento en masa

Como se mencionó anteriormente el movimiento en masa se presentó el día 24 de mayo de 2023, por lo cual se realiza el análisis de las precipitaciones diarias para observar el comportamiento de la precipitación en los tres meses anteriores al evento comparándolas con el evento de tipo Niña 2010-2011, el cual generó afectaciones a nivel nacional. Además, se realiza un análisis de precipitación acumulada para 7, 14 y 21 días antes de la fecha de inicio del movimiento en masa, con el objetivo de observar cómo fue el comportamiento de la lluvia en los días previos al evento.

6.4.1. Precipitación diaria

La figura 34 muestra el comportamiento de lluvia desde febrero hasta el 25 de mayo de los años 2022 y 2023. Para el 2022 se observan lluvias intermitentes, con 32 días de lluvia y un promedio de precipitación de 3 mm, con valores extremos (máximos en 24 horas) de 60 mm, presentados el día 31/03/2022.

Con respecto al 2023, se observan lluvias intermitentes, con 10 días de lluvia y un promedio de precipitación de 1,72 mm, con valores extremos (máximos en 24 horas) iguales a 56 mm, presentados el día 24/05/2023.

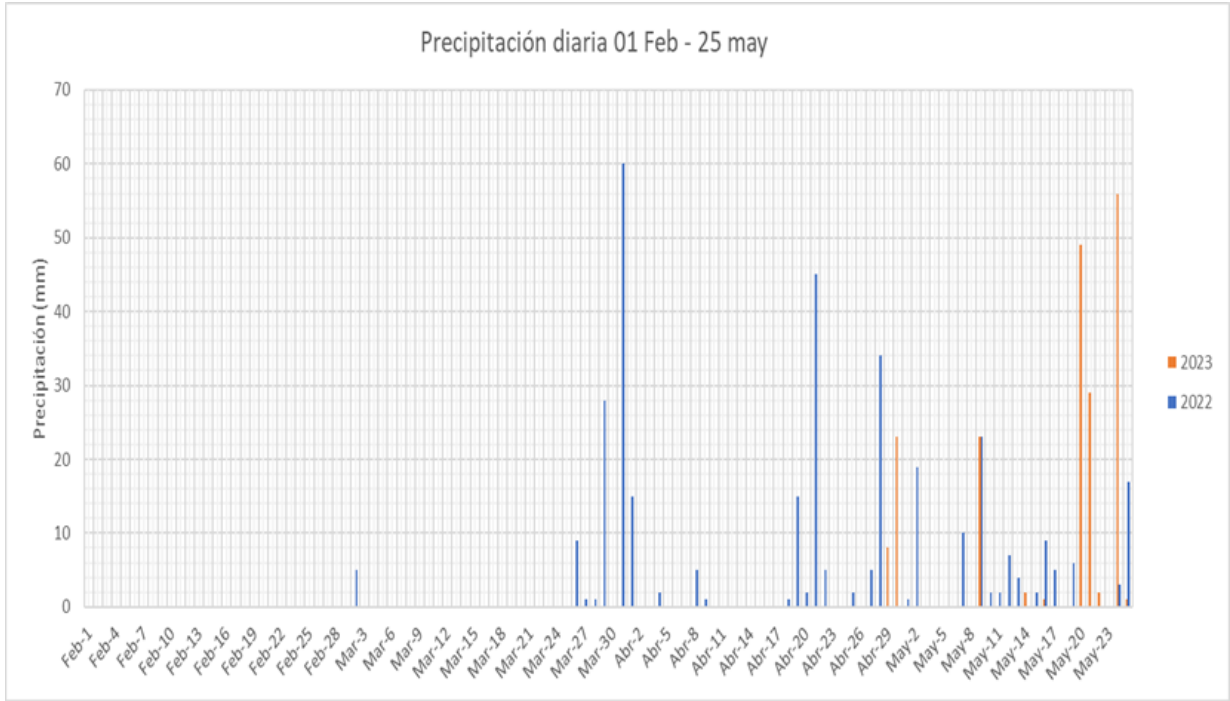


Figura 34. Comparativo de la precipitación diaria desde el 01 de febrero hasta el 25 de mayo

A partir de lo anterior, se puede determinar que el 2023 presentó una menor precipitación total en comparación con el 2022, entre el mes de febrero y el mes de mayo, pero se observa que en el 2023 las precipitaciones se concentraron desde finales de abril hasta la fecha del evento, con valores especialmente altos en los días previos al movimiento en masa.

Debido a lo anterior, se realiza el análisis de precipitación acumulada entre las mismas fechas y comparado con los resultados del fenómeno de la Niña 2010-2011, a partir de lo cual se observa que la precipitación acumulada es mucho menor para 2023 en comparación con el 2022 y con el fenómeno de La Niña. Sin embargo, se presenta una tendencia muy fuerte (pendiente) al aumento de la precipitación en los días previos al evento, efecto que no se observa en los años de comparación (figura 35).

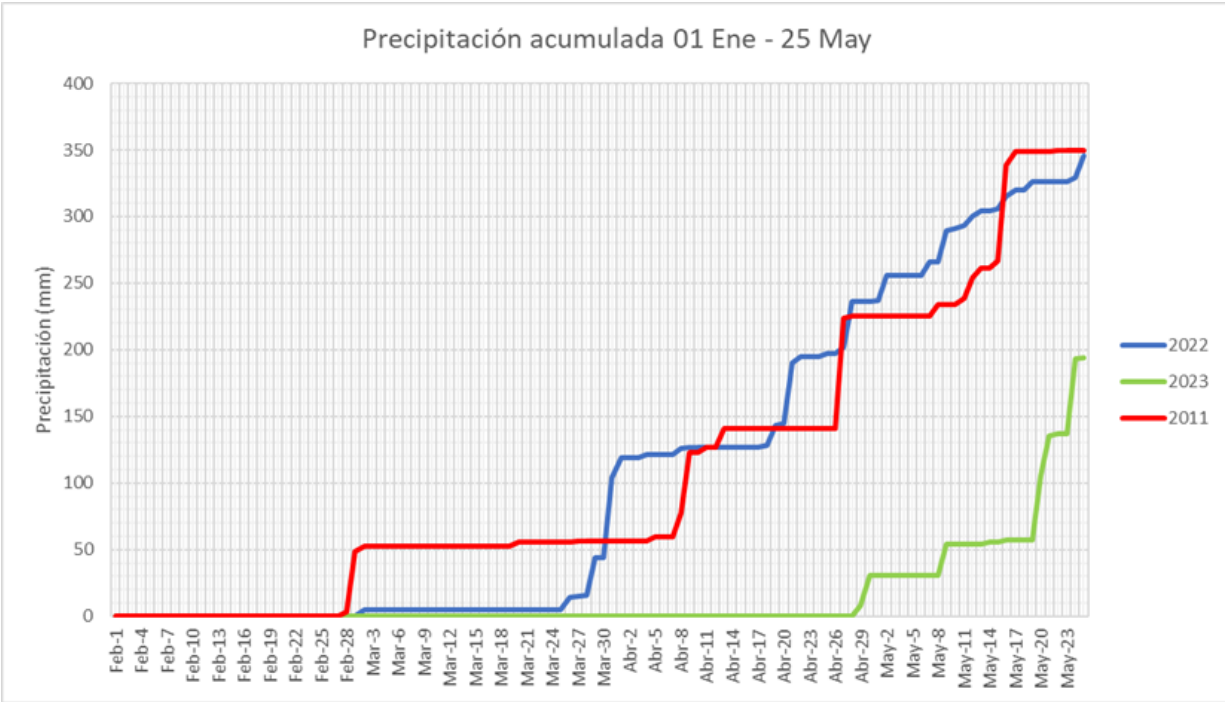


Figura 35. Comparativo de la precipitación acumulada desde el 1 de febrero hasta el 25 de mayo

6.4.2. Precipitación acumulada de 7, 15 y 21 días

A partir del análisis, se observa que en los días previos al evento se presentó una precipitación acumulada de 162 mm, 139 mm y 136 mm para las precipitaciones acumuladas de 7, 14 y 21 días anteriores al evento. En la figura 36 se muestra el comportamiento de la precipitación acumulada, en el cual se observa que la mayor parte de la precipitación se concentró a partir del 19 de mayo, manteniendo una fuerte tendencia al aumento hasta el 21 de mayo, para posteriormente presentar altas precipitaciones el día previo al movimiento en masa.

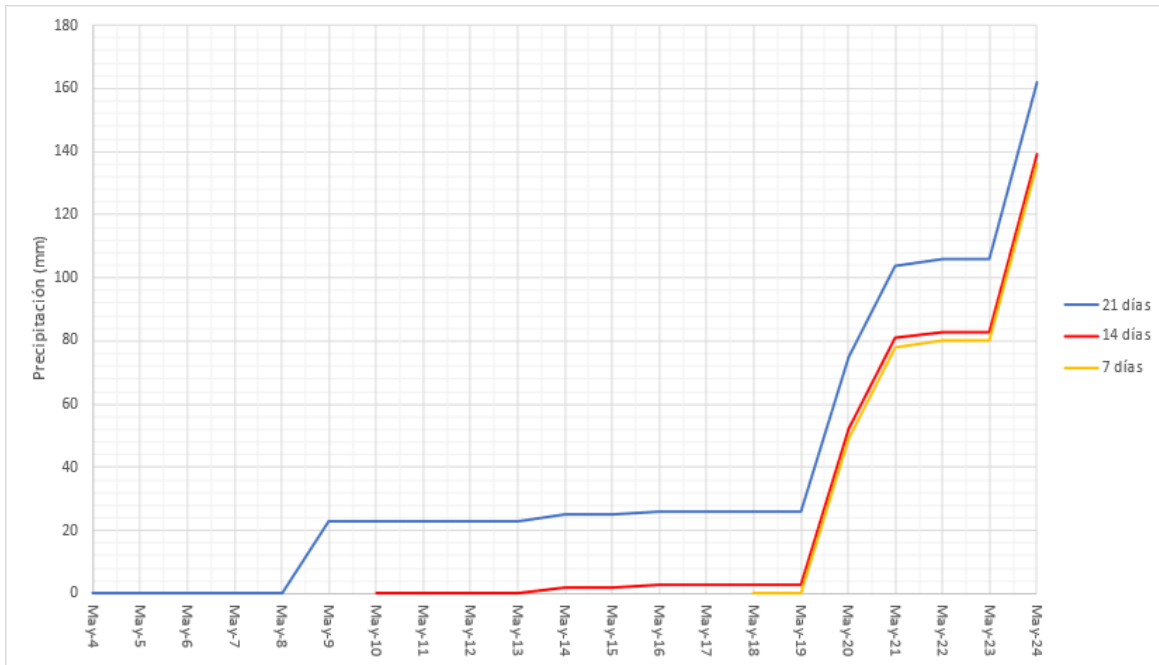


Figura 36. Precipitación diaria acumulada para 7, 14 y 21 días previos al evento

6.4.3. Análisis de la precipitación en los días posteriores al evento

Debido a que durante los días 31 de mayo y 01 de junio de 2023, el material seguía desplazándose, a continuación se realiza el análisis de la precipitación en los días posteriores al evento con el objetivo de caracterizar la lluvia y determinar su efecto sobre el movimiento en masa.

Durante el período del 26 de mayo al 12 de junio de 2023, se observan precipitaciones intermitentes significativas, de acuerdo a los datos de precipitación diaria y acumulada (figuras 37 y 38). Hasta el 6 de junio se presenta una precipitación acumulada de 108 mm, la cual es 28 mm menor a la precipitación acumulada en los siete días previos al evento, sin embargo, sigue siendo una precipitación significativa que posibilita la saturación de la masa movilizada.

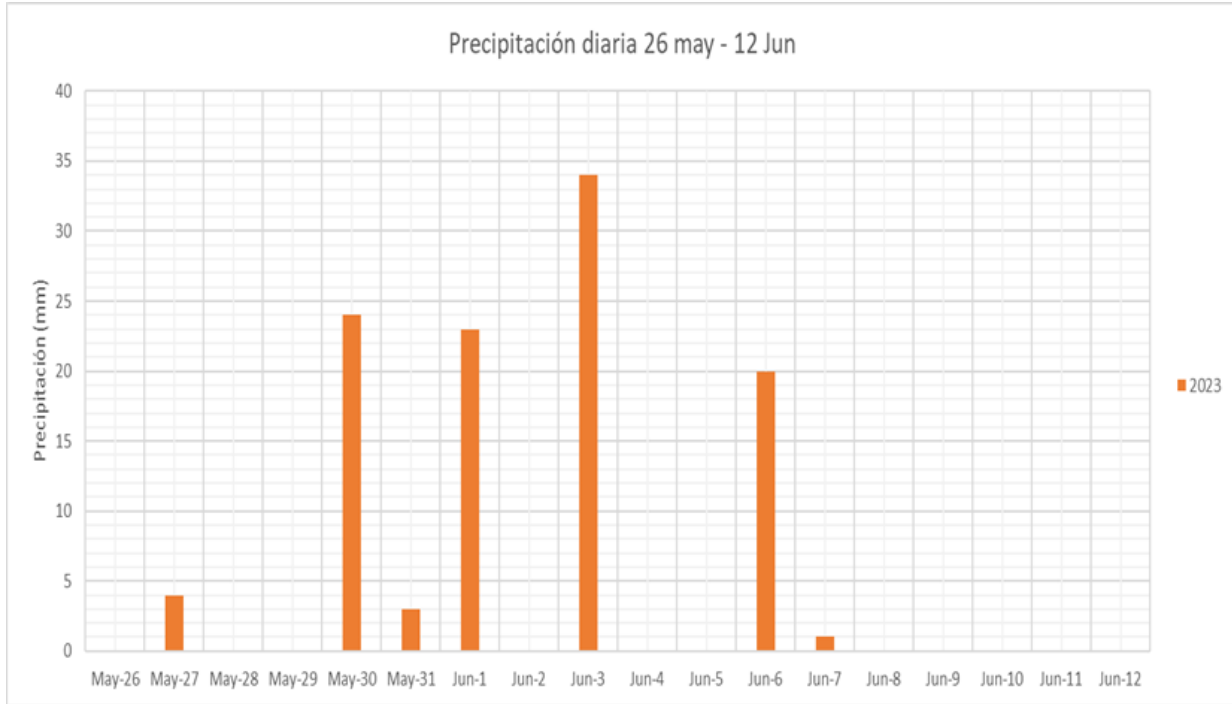


Figura 37. Precipitación diaria desde el 26 de mayo hasta el 12 de junio de 2023

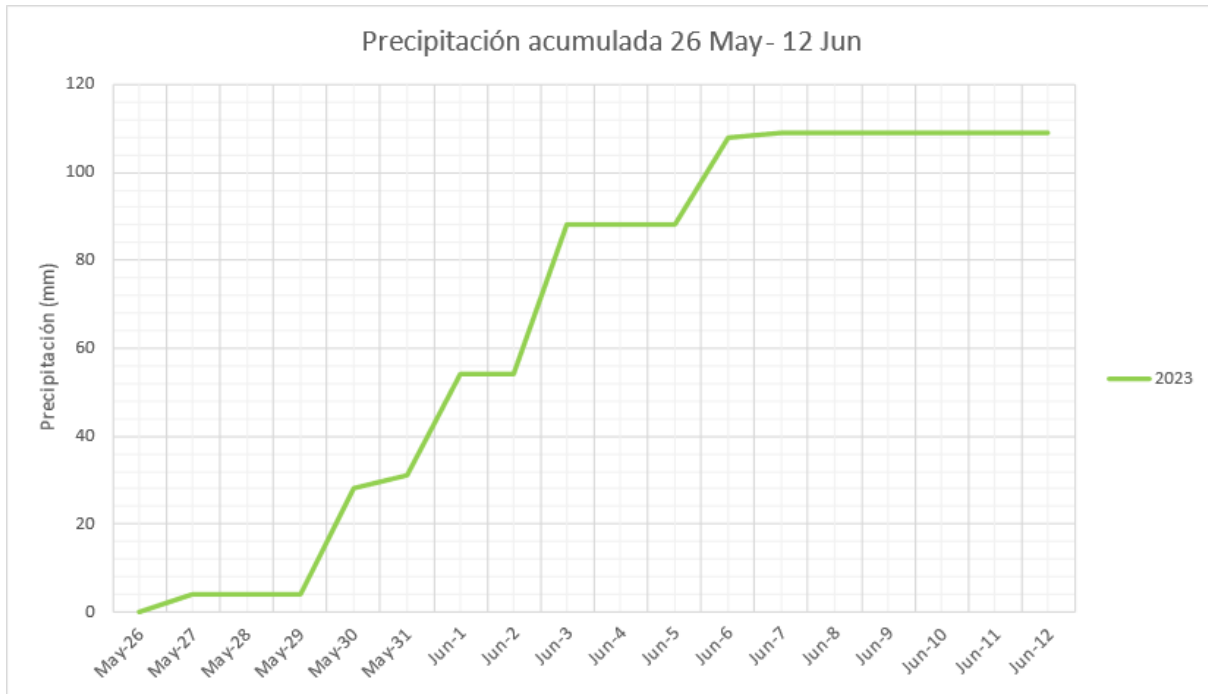


Figura 38. Precipitación diaria acumulada desde el 26 de mayo hasta el 12 de junio de 2023

6.5. Análisis comparativo de precipitaciones diarias en eventos anteriores en el cerro Santa Cruz

A partir de la búsqueda y análisis de los antecedentes de estabilidad en el sector, se determinó que los días 28 de febrero de 1989 y 24 de junio de 2001, se presentaron problemas de inestabilidad del terreno, razón por la cual se decide realizar un análisis de las precipitaciones acumuladas para 7, 14 y 21 días para dichos eventos y de esta manera comparar los datos con el evento del 24 de mayo de 2023.

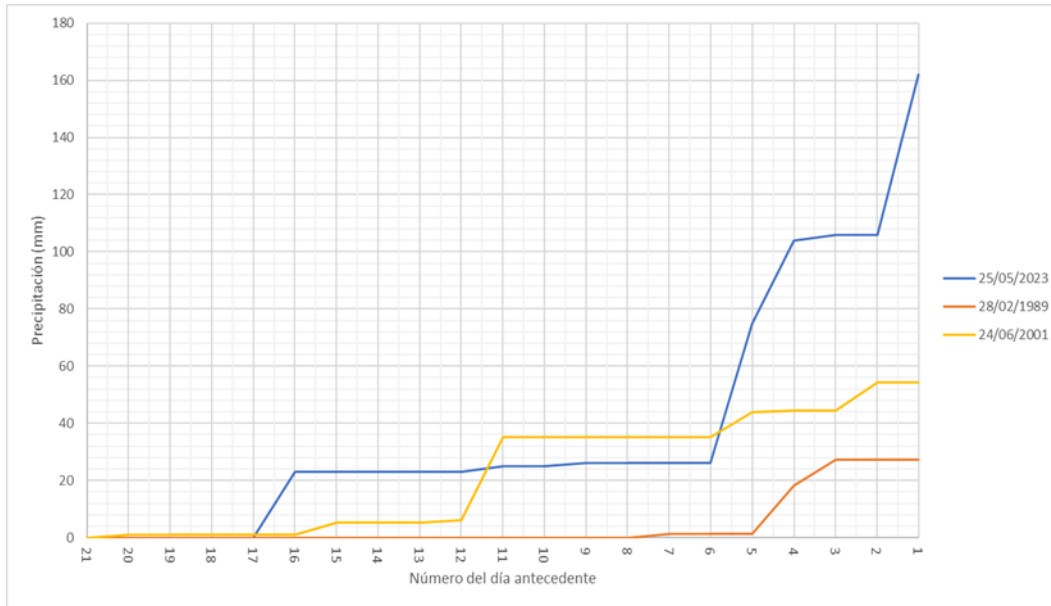


Figura 39. Precipitación diaria acumulada para 21 días en los diferentes eventos reportados

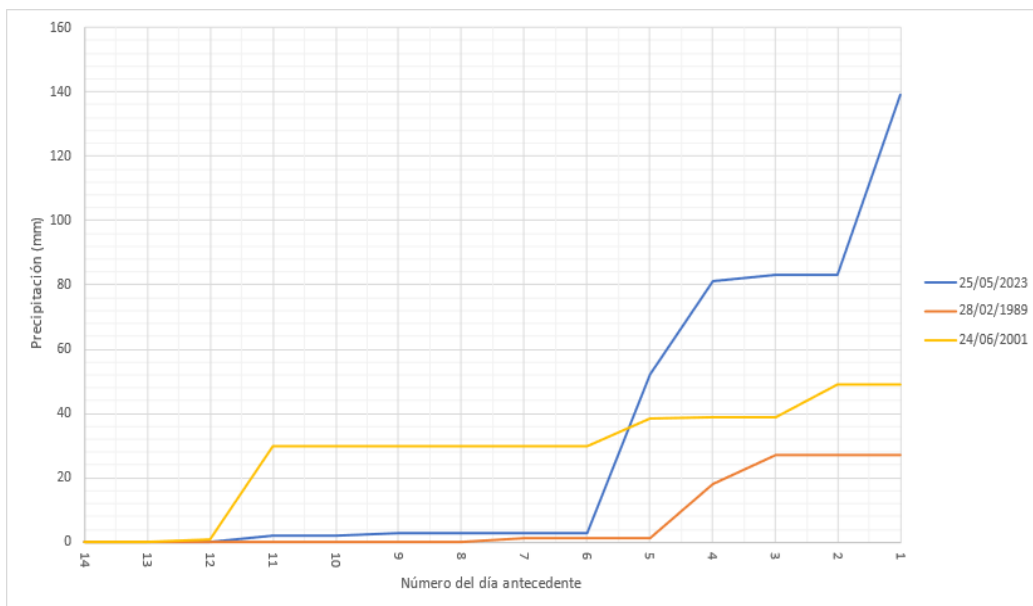


Figura 40. Precipitación diaria acumulada para 14 días en los diferentes eventos reportados

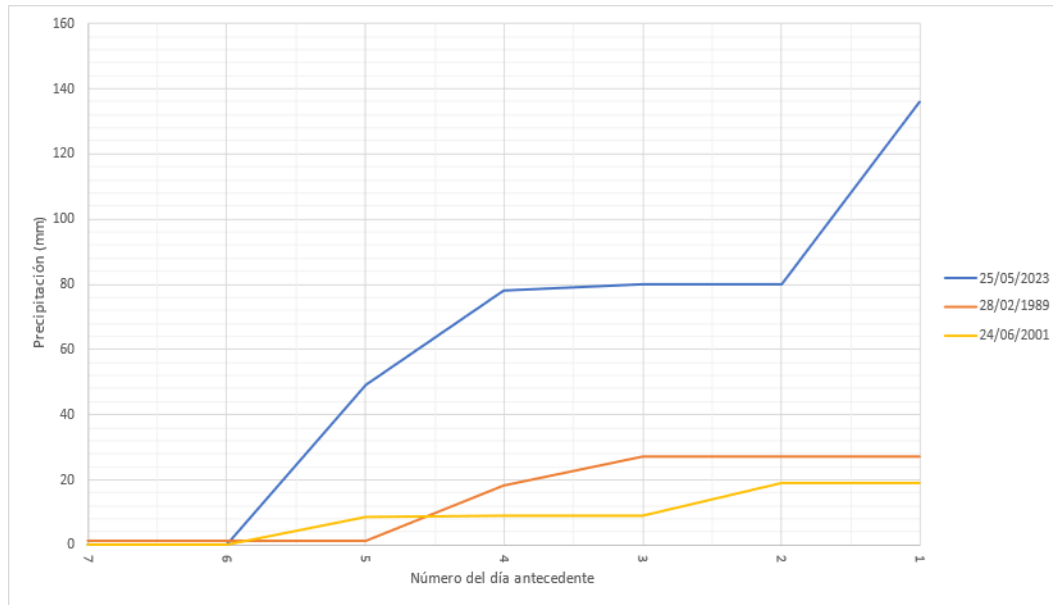


Figura 41. Precipitación diaria acumulada para siete días en los diferentes eventos reportados

Como se observa en las figuras 39, 40 y 41, la precipitación acumulada antecedente a los eventos de 1989 y 2001 es mucho menor a la del 2023 y los valores de precipitación son normales, por lo que no se observa una influencia marcada entre la precipitación y dichos eventos.

7. Caracterización del sismo

De acuerdo con el reporte realizado por la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC) del SGC, el día 24 de mayo de 2023 a las 10:05:34 p. m. Hora Local (2023-05-25 03:05:34 Hora U.T), se presentó un sismo de magnitud 6,6 y profundidad superficial (menor a 30 km). El Servicio Geológico Colombiano localizó el evento en la región fronteriza Colombia-Panamá, en aguas del mar Caribe. Esta región incluye el golfo de Urabá, que se extiende desde punta Caribana en el este hasta cabo Tiburón en el oeste, abarcando el municipio portuario de Turbo y el delta del río Atrato, en las coordenadas 8,845 °N y 77,114°W (<https://www.sgc.gov.co/detallesismo/SGC2023keosra/resumen>)

Este sismo se reportó como sentido en diferentes partes del territorio colombiano, principalmente en los departamentos de Antioquia, Córdoba, Santander, Risaralda, Caldas y Bolívar. Hasta la emisión de este informe, se habían presentado 131 réplicas, destacándose 24 con una magnitud igual o superior a M 3 y 4. Estos sismos se han localizado en la zona de confluencia de la placa Caribe y los bloques Norandino y Chocó-Panamá (figura 42).

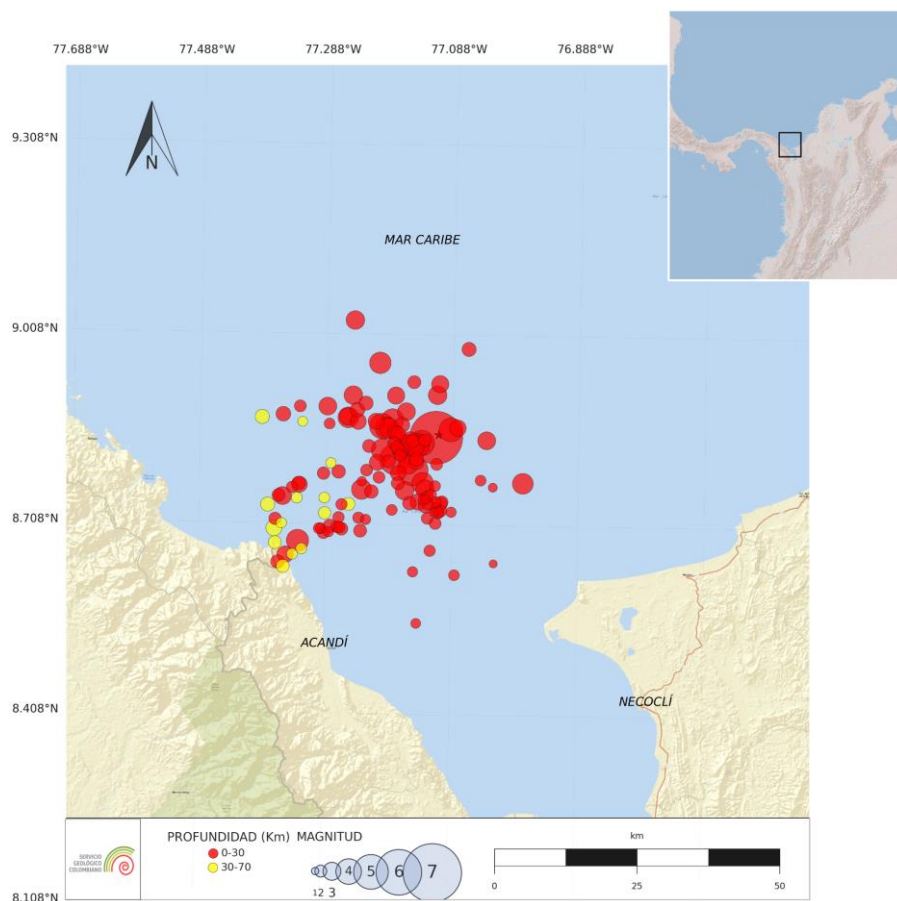


Figura 42. Mapa de réplicas registradas asociadas al sismo principal de Colombia.
 Fuente: SGC-Red sismológica Nacional de Colombia.
 (<https://www.sgc.gov.co/detallesismo/SGC2023keosra/resumen>)

Así mismo, a través de los reportes recibidos por la página www.sismosentido.sgc.gov.co y por la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge (CVS), se informó al SGC la presencia de agrietamientos y desplazamientos del terreno en parte del municipio de Puerto Escondido (Córdoba), localizado a 96 km al noreste del epicentro.

Tabla 5. Aceleraciones registradas en el sismo del 24 de mayo de 2023 – mar Caribe

Estación		Distancias		Aceleraciones	
Estación	Código	Epicentral (km)	Hipocentral (km)	Aceleración máxima	Gravedad (%)
Capurganá Chocó	CAP2	35	36	121,49	12,4
San Carlos Córdoba	SCLC	157	157	0,89	0,09
Murindó Antioquia	MRND	210	210	6,03	0,62
San José de Ure Córdoba	URE	213	213	6,03	0,62

Fuente: SGC - Red Sismológica Nacional de Colombia (<https://www.sgc.gov.co/detallesismo/SGC2023keosra/sm>)

La estación más cercana al epicentro corresponde a CAP2 que registró una aceleración máxima de 121 gales (cm/s^2), que equivale al 12 % de la gravedad y la más cercana a Puerto Escondido corresponde a la de San Carlos-Córdoba que registró una aceleración máxima de 0,89 gales, que equivale a 0,09 % de la gravedad (tabla 5). La RSNC observó que la aceleración decayó rápidamente para distancias superiores a los 100 km de la zona epicentral.

8. Caracterización del movimiento en masa del cerro Santa Cruz

La inspección y recorridos al movimiento en masa del cerro Santa Cruz se realizó sobre la ladera noroccidental que conforma la estructura dómica del volcán de lodo. De acuerdo con lo observado durante el trabajo de campo, se presenta la caracterización y afectaciones causadas por el proceso.

Para la clasificación del movimiento en masa, se considera el sistema de clasificación que se encuentra en PMA: GCA (2007) el cual está basado en la propuesta de Varnes (1978) y Cruden y Varnes (1996). De acuerdo con este sistema de clasificación, se tienen los siguientes tipos de movimientos en masa: deslizamientos, flujos, caídas, deformaciones gravitacionales profundas y reptación, cada uno de los cuales presenta subtipos en función de algunas características como el tipo de material, velocidad y superficie de falla. Adicionalmente, se consideraron algunos de los conceptos de Hungr *et al.* (2014), quienes realizaron una actualización de dicho sistema.

8.1. Descripción del movimiento y clasificación

Según lo reportado por la comunidad y funcionarios de la Alcaldía municipal, luego del sismo del 24 de mayo de 2023, se observaron fisuras y grietas en el terreno hacia la parte alta de la ladera noroccidental del cerro Santa Cruz. Con el paso de las horas y un par de días, estos agrietamientos evolucionaron hasta formar escarpes y hundimientos notablemente pronunciados que alertaron a la comunidad y causaron afectaciones en algunas viviendas rurales localizadas sobre la ladera, por lo que se realizaron evacuaciones preventivas. Posteriormente, se evidenció el desplazamiento de una masa de suelo, ladera abajo con aparición de nuevas zonas deformadas, grietas y hundimientos.

De acuerdo con los testimonios y lo observado en campo, el proceso actual se considera como un movimiento en masa en estado activo, de estilo complejo y distribución retrogresiva. El movimiento involucra al menos tres mecanismos de falla que se han diferenciado en tres zonas (figura 43): en la zona de inicio (parte alta de la ladera) se comporta como una propagación lateral (zona I); hacia el centro y parte baja de la ladera el material se desplaza como un flujo de tierra (zona II); el flanco izquierdo presenta deslizamientos traslacionales donde se destacan sus coronas (zona III). En general el material desplazado corresponde a suelo transportado de flujo del volcán de lodo (Stfvl), que se caracteriza por su alta plasticidad, textura arcillosa y por encontrarse saturado.

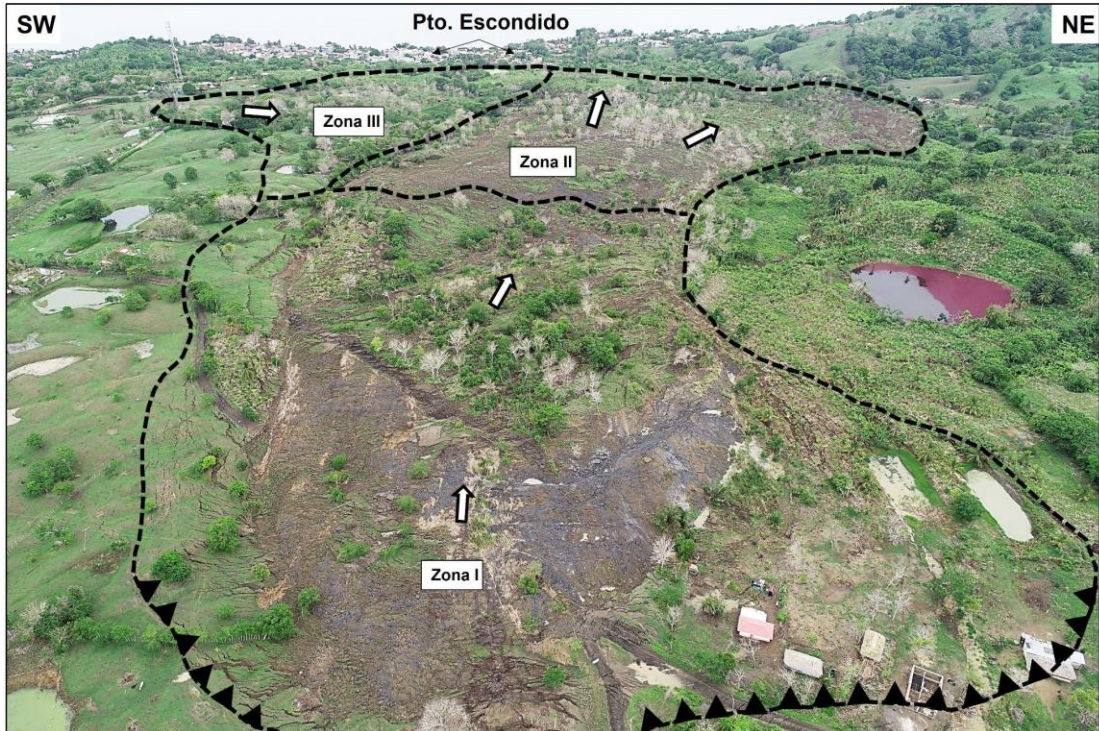


Figura 43. Panorámica del movimiento en masa complejo del cerro Santa Cruz

Vista aérea del proceso desde la corona del movimiento. Las líneas con guiones delimitan el flanco derecho e izquierdo y el pie del movimiento. La línea con triángulos negros delimita la corona o zona de inicio del movimiento. Fuente: modificada y editada de CVS (2023).

8.1.1. Zona I: propagación lateral

En el sector Dos Caminos, parte alta del cerro Santa Cruz, se encontraron evidencias de este tipo de mecanismo de falla, afectando un área aproximada de 60 ha. De acuerdo con PMA: GCA (2007) la propagación lateral es un mecanismo de movimiento donde el desplazamiento se da predominantemente por deformación interna del material. Se distinguen tipos de propagación: una lenta en que el movimiento afecta a todo el material sin distinguirse la zona basal de cizalla, son típicas en materiales rocosos (figura 44 a y b); y otra que es más rápida y ocurre en suelos cohesivos que suprayacen a materiales que han sufrido licuefacción tales como arenas saturadas con densidad relativa baja a media o a materiales en flujo plástico como limos o arcillas sensitivas (figura 44 c).

Hungr *et al.* (2014) definen la propagación en arcillas sensitivas como un tipo de propagación extremadamente rápida de una serie de bloques de material arcilloso flotando en una capa remoldeada de arcillas sensitivas. Este proceso resulta de la propagación de una zona de cizalla casi-horizontal desde el pie de la ladera sobre la cual los bloques de suelo más o menos intactos se mueven lateralmente hacia el valle o zona más baja. Los desplazamientos de los bloques de suelo pueden formar bancos inclinados hacia atrás (dirección contraria a la pendiente) o también dan lugar a formas tipo horst y graben. En este movimiento, la mayor parte del material desplazado permanece en la zona de inicio del proceso. Según PMA:GCA (2007) este tipo de propagaciones tienden a desarrollarse por efectos de un sismo y son altamente peligrosas.

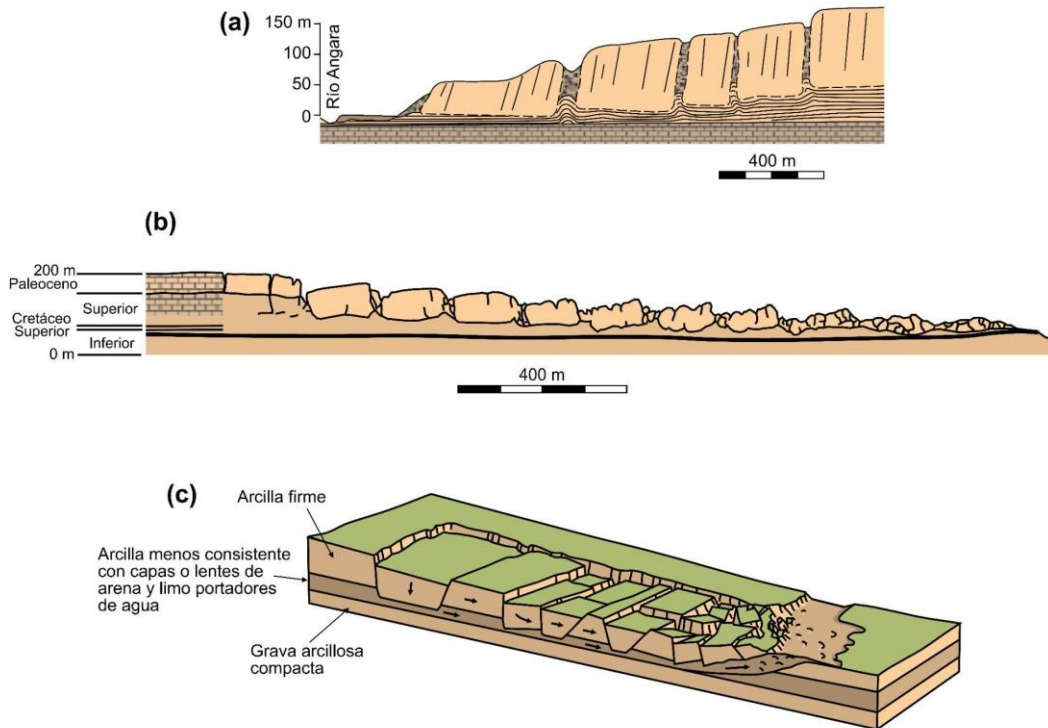


Figura 44. Esquema de los tipos de propagación lateral

a) y b) propagación lateral lenta en material rocoso; c) propagación lateral rápida por licuación o arcillas sensitivas.
Fuente: PMA: GCA (2007).

La ladera afectada por propagación lateral es de morfología suavemente ondulada a plana con pendientes menores a 5° , por lo cual, la propagación se presenta de manera sub-horizontal (figura 45). Allí, se concentran los rasgos de deformación más severos caracterizados por grietas, escarpes, y formas tipo graben y horst. El material desplazado presenta una dirección aproximada entre $N70^\circ W$ a $N80^\circ W$, no obstante entre la corona y los flancos del movimiento, la propagación cambia su dirección moviéndose hacia el cuerpo del proceso. Un aspecto importante, es que el material movilizado se encontraba saturado y con frecuencia se observaban encharcamientos en diferentes sectores, lo que probablemente favoreció una mayor infiltración de agua hacia la parte baja donde se da el cambio de pendiente (hacia la zona 2) que marca la transición del mecanismo de falla de propagación lateral a flujo de tierra.

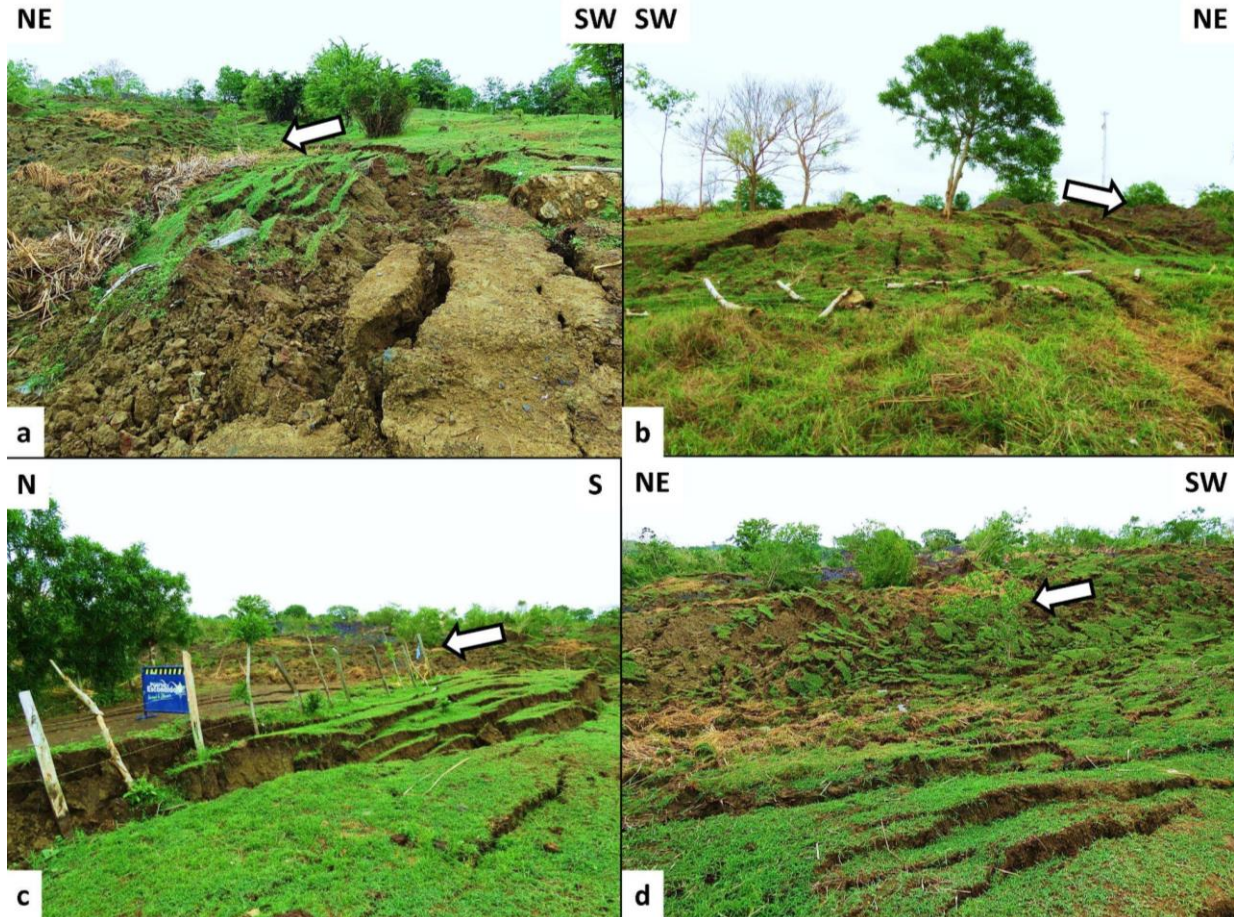


Figura 45. Propagación lateral vista en diferentes sectores de la zona de inicio del movimiento

La flecha indica la dirección aproximada de la propagación en cada caso. Nótese la pendiente suave del terreno y el alto grado de deformación ocasionado por el avance del proceso.

Las grietas observadas en la parte alta del proceso inician sobre la vía, en el sector Dos Caminos y marcan la dirección de la propagación lateral. En general, las grietas presentan formas relativamente rectas o sinuosas, cuyo arreglo puede conformar bloques hundidos y levantados a pequeña escala. Allí se presentan al menos tres familias de grietas, la mayoría abiertas, con alturas centimétricas, que en otros casos evolucionan a escarpes (figura 46).

La primera familia de grietas (que podría considerarse como el principal) presenta una orientación entre $N10^{\circ}E-N25^{\circ}E$, con variaciones en la zona más cercana a la corona y al escarpe principal de $N50^{\circ}E-N80^{\circ}E$, con espaciamento entre 0,5-1,9 m que disminuye en dirección de la propagación. La inclinación de las grietas tiende a ser subvertical, desde 2-5 cm hasta 2 m de abertura, longitudes entre 1-25 m y un promedio de 10 m de longitud. Esta es la familia en la que se detecta el escape de gas metano que afecta el sector.

La segunda familia de grietas se distribuye en la zona de transición desde la corona hacia el flanco derecho del proceso. Su orientación preferencial es de $N8^{\circ}W-N15^{\circ}W$ y el espaciamento es de 2-5 m. Las grietas presentan aberturas entre 20-40 cm y longitudes entre 2-4 m.

La tercera familia de grietas se localiza en el flanco izquierdo del movimiento, con tendencias preferentes N50°W-N70°W, subparalelas a la corona y oblicuas a la dirección principal del movimiento en masa. El espaciamiento entre grietas está entre 0,5-2 m. Las grietas presentan inclinaciones verticales a subverticales (hasta 70° hacia el noreste), con una longitud máxima de 30 m, aberturas entre 20-100 cm y hasta 2 m de profundidad.



Figura 46. Familias de grietas identificadas en la zona de inicio
Las líneas rojas marcan la tendencia de la familia 1 y las líneas negras las de la familia 2. La flecha blanca indica la dirección principal de desplazamiento del material movilizado.

Los escarpes se asocian en la mayoría de los casos a los mismos patrones de grietas, con alturas relativas de 0,5-4 m e inclinaciones hacia la dirección principal del movimiento, aunque también se identifican contraescarpes (su inclinación es contraria a los escarpes). Los escarpes también están asociados a estructuras de tipo graben-horst, que se traducen en secuencias de bloques hundidos y otros levantados debido a la pérdida de rigidez del material que se encuentra en el nivel inferior del subsuelo (figura 47). Algunos de estos rasgos se encontraron cerca de cuerpos de agua, lo que favoreció la infiltración del agua en el subsuelo y mayor saturación de la masa de suelo desplazada.

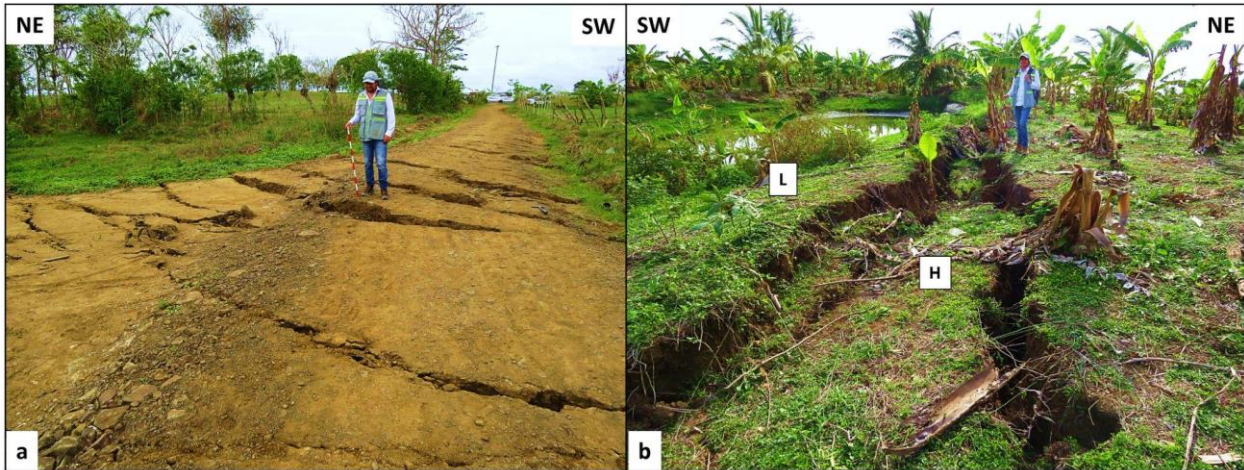


Figura 47. Rasgos de deformación asociados a propagación lateral en la parte alta del movimiento
a) grietas que marcan el avance de la propagación lateral; b) estructura tipo graben en la zona de transición entre la corona y el flanco derecho (H: bloque hundido; L: bloque levantado)

Afectaciones

El avance progresivo del movimiento en masa destruyó y desplazó varios tramos de la vía en afirmado que comunica el cerro Santa Cruz con el centro poblado de Puerto Escondido, presentando daño total y un impacto a las actividades económicas y al transporte de personas, animales y alimentos.

El terreno afectado corresponde a la cima del cerro Santa Cruz, de morfología plana, el cual presenta grietas principalmente transversales a la vía y casi paralelas entre ellas, con aberturas hasta de 1 m y una profundidad hasta de 0,8 m. La longitud total de afectación de la vía es de 150 m y 7 m de ancho, con un desplazamiento al norte de aproximadamente 65 m (figura 48).

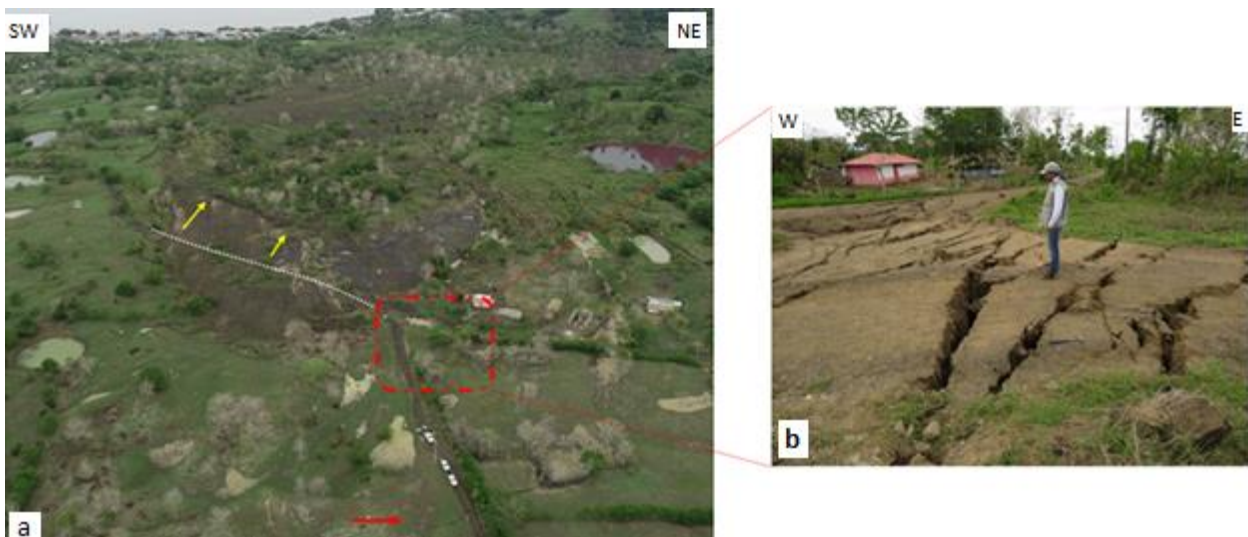


Figura 48. Afectación en la vía del cerro Santa Cruz por la propagación lateral
a) panorámica del movimiento en masa, donde se señala con la línea punteada blanca el trazo original de la vía, con las flechas amarillas la dirección de desplazamiento; b) detalle de las grietas que afectaron la vía en la parte alta del cerro.

Por otro lado, las edificaciones ubicadas en la zona de influencia del proceso presentaron afectaciones moderadas (figura 49). Las viviendas compuestas de una planta, construidas en mampostería reforzada, con estructura ligera y simple no aporticada, evidencian deformaciones, daños en muros estructurales y no estructurales, grietas superficiales a tracción en placa de contrapiso y basculamiento debido a cambio de esfuerzos efectivos en la masa del suelo de cimentación, el cual presenta deformaciones.



Figura 49. Afectación a viviendas por el proceso de propagación lateral
a) vista general de las edificaciones afectadas por propagación lateral en inmediaciones a la corona del movimiento principal; b) c) y d) detalle del desplazamiento y formación de grietas en las edificaciones.

La deformación del terreno generada en la propagación lateral también generó daños ambientales al territorio asociados a pérdida de cultivos de plátano y especies nativas de árboles (figura 50).

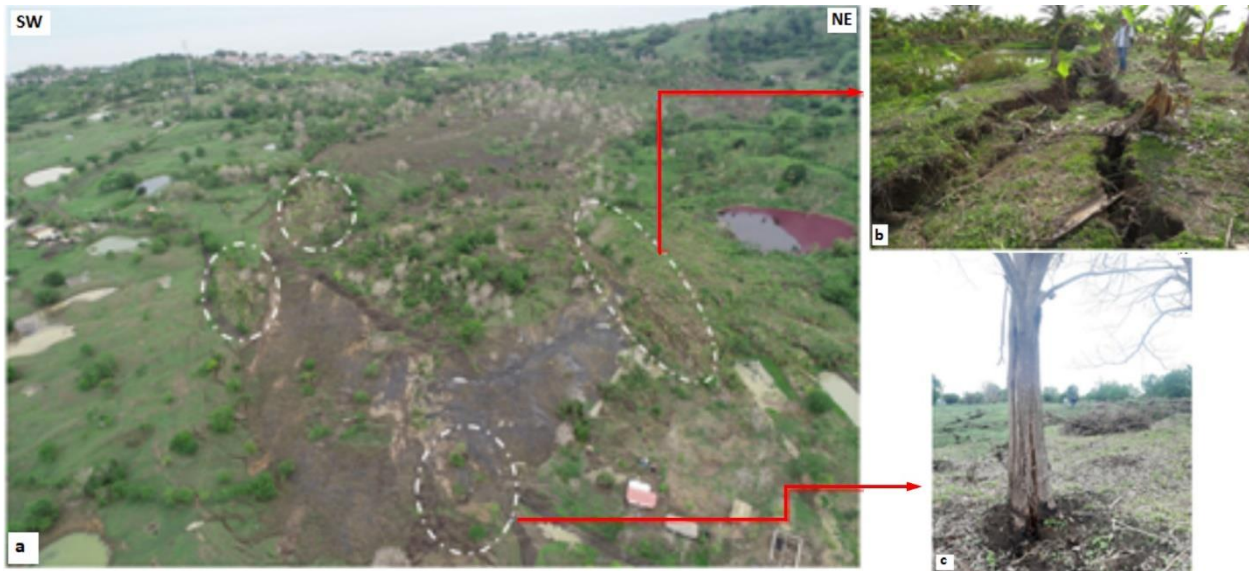


Figura 50. Daños ambientales por la propagación lateral
a) vista general del movimiento en masa principal; b) pérdida de cultivos de plátano por grietas en el terreno; c) árboles con rupturas en el tronco por agrietamientos en el terreno

8.1.2. Zona II: flujo de tierra

Según PMA:GCA (2007), un flujo de tierra es un movimiento intermitente, rápido o lento, de suelo arcilloso plástico cuya consistencia se encuentra cerca del límite plástico (Hungry *et al.*, 2001; 2014). Desarrollan velocidades moderadas, con frecuencia de centímetros por año, sin embargo, pueden alcanzar valores hasta de metros por minuto (Hutchinson, 1998) y pueden desplazar volúmenes de material de hasta cientos de millones de metros cúbicos. El proceso es facilitado por una combinación de deslizamiento a lo largo de múltiples superficies de corte discretas y deformaciones de corte internas.

La fuente de este tipo de procesos puede ser uno o una serie de deslizamientos o una cara empinada erosionada y meteorizada en una roca débil. El material se reblandece sin absorber excesiva humedad, por lo que permanece en estado plástico (índice de liquidez $<0,5$). El cuerpo del flujo de tierra se deforma lentamente o falla a lo largo de múltiples superficies de corte, produciendo una morfología lobulada similar a un flujo (figura 51). La aceleración ("oleada") ocurre cuando el deslizamiento de la fuente se desestabiliza, generalmente por un aumento temporal en la presión de poro (Hungry *et al.*, 2014).

A medida que el material en cualquier parte de la lengua del flujo de tierra se acelera, anula o comprime las masas de suelo pendiente abajo, aumentando la presión intersticial a través de la carga no drenada (Hutchinson y Bhandari, 1971 citados por PMA: GCA, 2007). De esta manera, una onda cinemática se propaga a través de la masa del suelo, para hacer avanzar el pie hacia un arroyo, un cuerpo de agua u otro sumidero de erosión (Hungry *et al.*, 2014).

Según Montero (2017) en este tipo de mecanismo existe aporte de agua de manera casi continua a materiales arcillosos infrayacentes, y el material suelto suprayacente se desplaza lentamente sobre laderas generalmente con pendiente baja (incluso hasta de tan solo 3°).



Figura 51. Esquema de un flujo de tierra
Fuente: USGS (<https://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/>)

El flujo es el mecanismo principal dentro de la masa desplazada, que ocurre en la parte central y baja del movimiento en masa, donde el material involucrado corresponde a suelo transportado de flujo del volcán de lodo (Stfv) y suelo transportado de coluvión (Stco).

La masa desplazada por el flujo abarca un área aproximada de 20 ha que se mueve al noroeste, en dirección N20°W-N30°W. El cuerpo del movimiento presenta morfología de lengua, relativamente lobulada hacia la parte baja, con un ancho de la masa desplazada que varía entre 250 m en la zona distal del flujo (punta) hasta alcanzar 400 m en la zona central más extensa.

Se estima un espesor de la masa desplazada de aproximadamente 10 m, calculada a partir de los escarpes visibles del movimiento. Adicionalmente, con base en los testimonios y mediciones empíricas realizadas por la comunidad, así como las estimaciones hechas en la visita, se infiere una velocidad de desplazamiento en la punta del flujo, de 2 m/hora entre el 30 de mayo y el 01 de junio; mientras que, hacia la parte central y alta del flujo, la velocidad estimada es de 50-60 cm/hora, esta última muy similar a la reportada por Parra (1989) y Carvajal (2001) (figura 52).

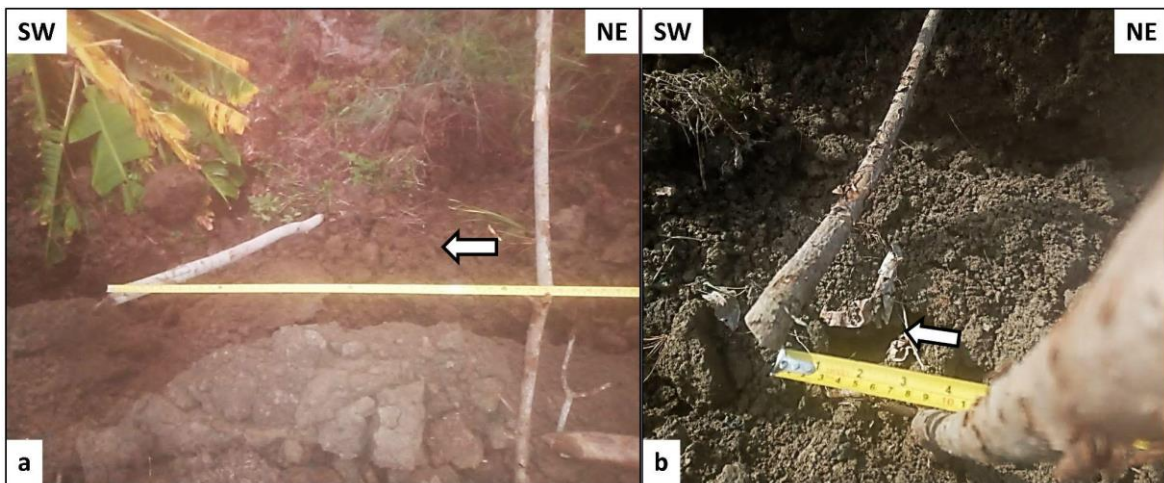


Figura 52. Mediciones empíricas de desplazamiento realizadas por la comunidad del cerro Santa Cruz. La flecha indica la dirección del movimiento. Fuente: cortesía de la comunidad del cerro Santa Cruz.

El material movilizado presenta ondulaciones y escalonamientos asociados a escarpes secundarios generalmente inclinados a favor de la pendiente de la ladera ($>50^\circ$); también se observaron grietas transversales y longitudinales con aberturas variables entre algunas decenas de centímetros hasta varios metros. Todos estos rasgos se distribuyen de manera relativamente homogénea por toda la masa de suelo desplazada por el movimiento. Hacia la punta del flujo, se observó que el material desplazado avanzó en algunos sectores suprayaciendo la superficie actual del suelo semejando un “cabalgamiento” del material (figura 53).

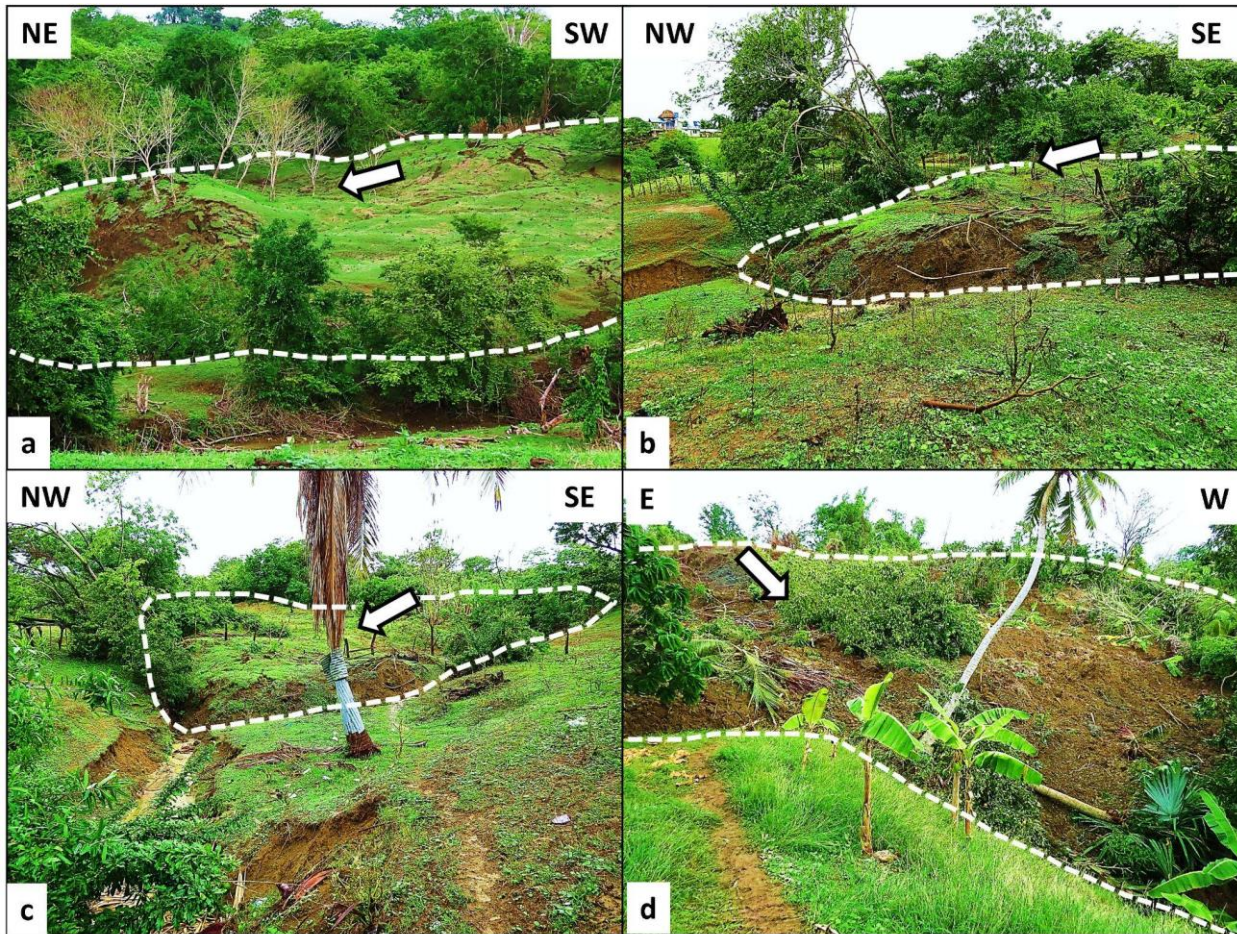


Figura 53. Avance del flujo de tierra en la punta del movimiento

La flecha indica la dirección del desplazamiento. En a) b) y c) se observa como la punta del material se remonta sobre la superficie del suelo actual; en d) se observa el espesor de la masa desplazada por el flujo, en el sitio donde se generó uno de los dos represamientos presentados en el área.

Adicionalmente, se verificó que el 1 de junio el avance del flujo generó represamientos en dos sectores específicos del arroyo Ralos o Nevado, el cual limita con el cerro Tortugón. La acumulación de agua dio lugar a la formación de embalses naturales (figura 54).

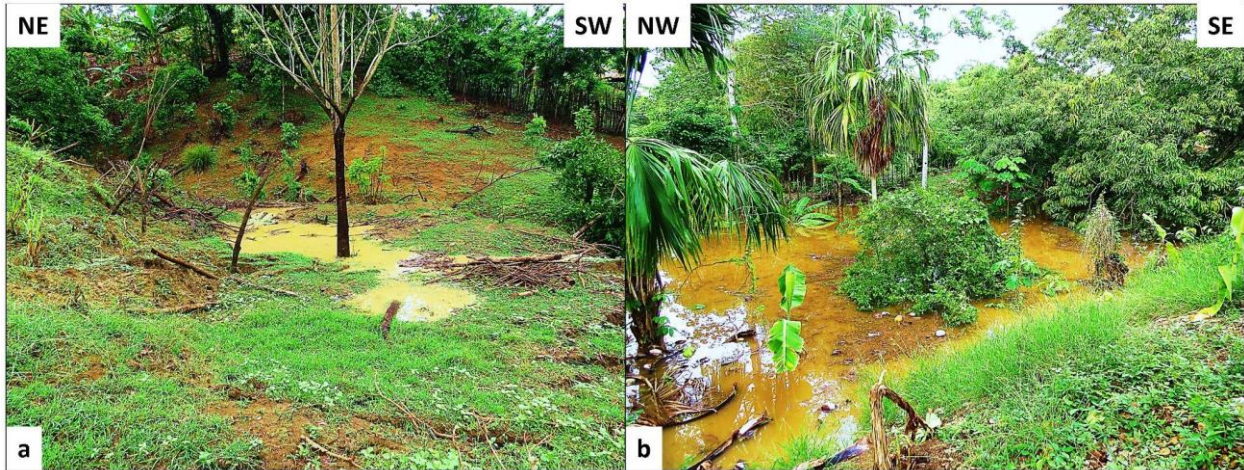


Figura 54. Represamiento causado por el flujo de tierra
a) empozamiento de agua en la punta del movimiento, cerca del barrio Simón Bolívar; b) represamiento en el arroyo Ralos o Nevado que limita con el cerro Tortugón.

Afectaciones

Las viviendas localizadas en el área de influencia del flujo de tierra corresponden a edificaciones de una planta con estructura simple y sin confinamiento. Aunque el material movilizado no afectó viviendas, éstas fueron evacuadas preventivamente por la cercanía al proceso (figura 55).



Figura 55. Vivienda localizada cerca del flujo de tierra

Al igual que en el caso de la propagación lateral descrita en la cima del cerro Santa Cruz, el flujo ocasionó la pérdida de cultivos de plátano y de la cobertura natural en la parte central y baja del cerro. También, afectó las propiedades físicas del agua en los sectores donde ocurrieron los represamientos (figura 56).

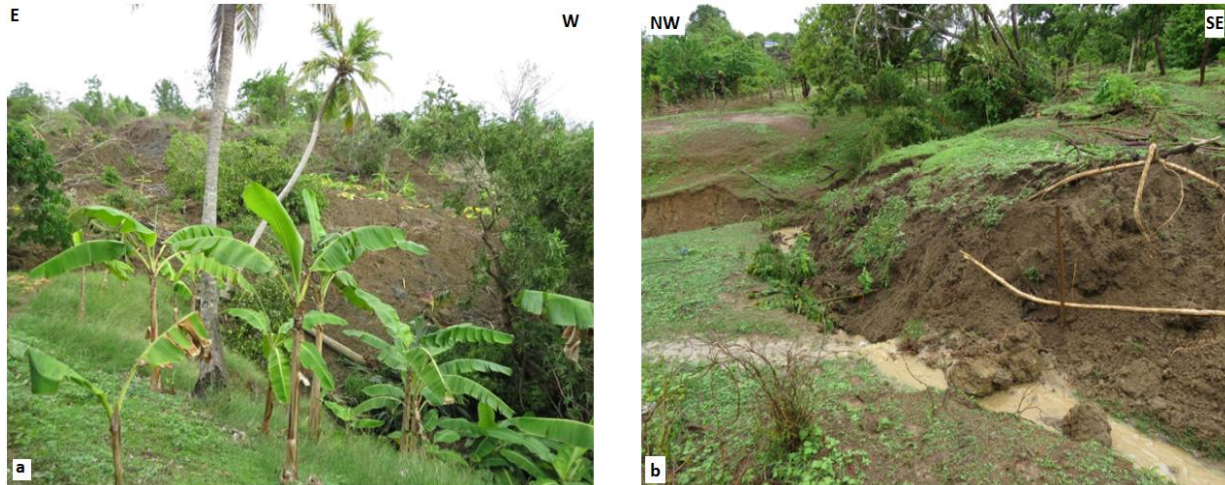


Figura 56. Daños ambientales causados por el flujo de tierra
a) afectación en cultivos de plátano y bosque; b) represamiento de cuerpo de agua

8.1.3. Zona III: deslizamiento

Este tipo de mecanismo de falla fue observado sobre la ladera del flanco izquierdo del movimiento en masa principal. De acuerdo con PMA: GCA (2007), Hungr *et al.* (2014) y Montero (2017), un deslizamiento corresponde al movimiento ladera abajo de una masa de suelo o roca cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de falla, o de una delgada zona en donde ocurre una gran deformación cortante.

De acuerdo con Varnes (1978) citado por PMA: GCA (2007), los deslizamientos se clasifican en traslacionales y rotacionales, según la forma de la superficie de falla por la cual se desplaza el material. Sin embargo, las superficies de rotura de los movimientos en masa son generalmente más complejas que las de los dos tipos anteriores, ya que pueden consistir de varios segmentos planares y curvos, por lo que estos se conocen como deslizamientos compuestos.

La superficie de falla de los deslizamientos traslacionales es plana u ondulada. Suelen ser más superficiales que los rotacionales. El desplazamiento ocurre con frecuencia a lo largo de discontinuidades como fallas, diaclasas, planos de estratificación o planos de contacto entre diferentes tipos de material o con comportamiento geotécnico diferente (figura 57 a y b). La velocidad de los movimientos traslacionales puede variar desde rápida a extremadamente rápida.

La superficie de falla de los deslizamientos rotacionales es curva y cóncava. Los movimientos en masa rotacionales muestran una morfología distintiva caracterizada por un escarpe principal pronunciado y una contrapendiente de la superficie de la cabeza del deslizamiento hacia el escarpe principal (figura 57 c). Los deslizamientos rotacionales pueden ocurrir lenta a rápidamente, con velocidades menores a 1 m/s.

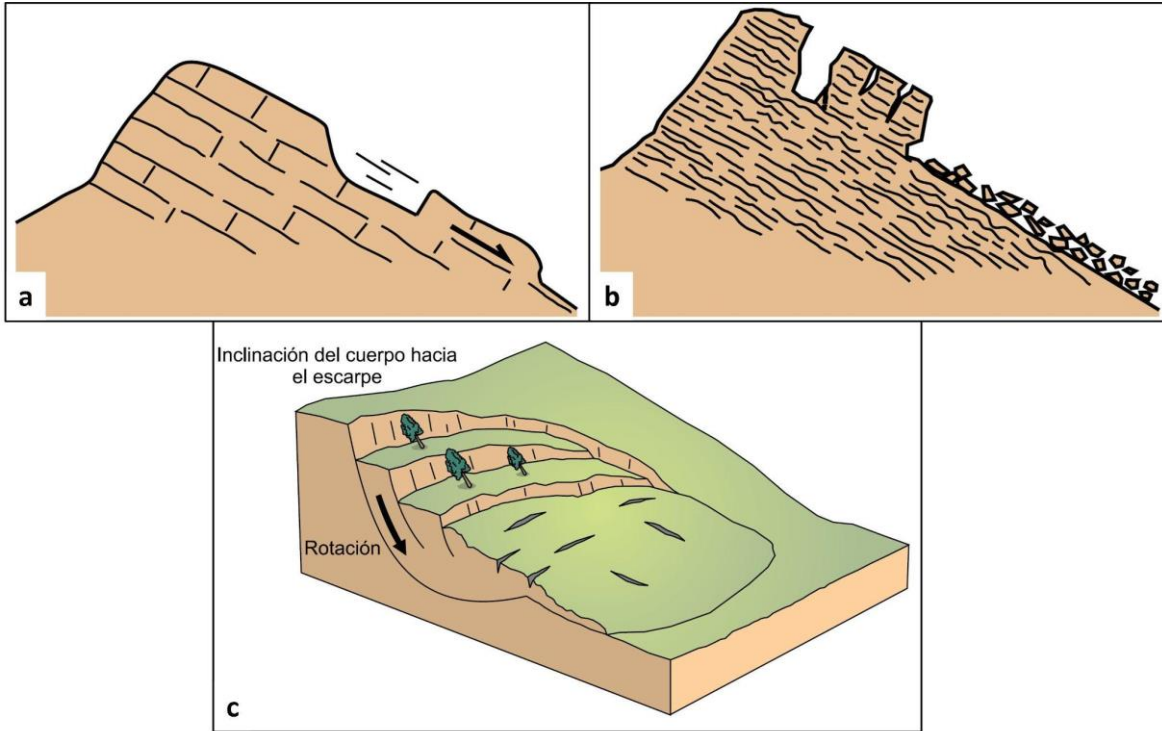


Figura 57. Esquema de deslizamientos de tipo traslacional y rotacional
a) y b) deslizamiento traslacional en roca y en detritos; c) deslizamiento de tipo rotacional. Fuente: adaptado de PMA: GCA (2007).

Los deslizamientos se evidenciaron en la parte alta de la ladera sobre el flanco izquierdo del movimiento en masa principal, en la vía que conduce al cerro Santa Cruz. En este sector se encuentra el llano antrópico que conforma la vía, el suelo residual de arcillolitas de la Formación Morrocroy (Srafm) y el suelo transportado coluvial (Stco) que conforman el límite del flanco izquierdo. Estos materiales son no consolidados, de textura arcillosa a arcillo limosa, plásticos, en estado saturado, con contenido de fragmentos de rocas como arcillolitas grises y concreciones lodosas oxidadas.

El área afectada por los deslizamientos es de aproximadamente 23 ha, donde se identificaron dos coronas en forma semicircular o de medialuna, que inicialmente correspondían a fisuras sobre el terreno y luego evolucionaron a grietas con longitudes entre 20-25 m, aberturas entre 40-70 cm y profundidades entre 0,4-1 m.

Se infiere un espesor de la masa desplazada de 6 m. El cuerpo del deslizamiento se caracteriza por presentar rasgos de deformación e inestabilidad como retrogresión de coronas, escarpes principales y secundarios, grietas transversales y longitudinales, encharcamientos de agua, ondulaciones y escalonamientos en diferentes sectores (figura 58). A estos rasgos recientes producto de la ocurrencia del movimiento actual, se suman algunas deformaciones más antiguas como abombamientos y bloques relativamente rotados dentro de la ladera, que pueden estar relacionados con antiguos deslizamientos rotacionales (figura 59).

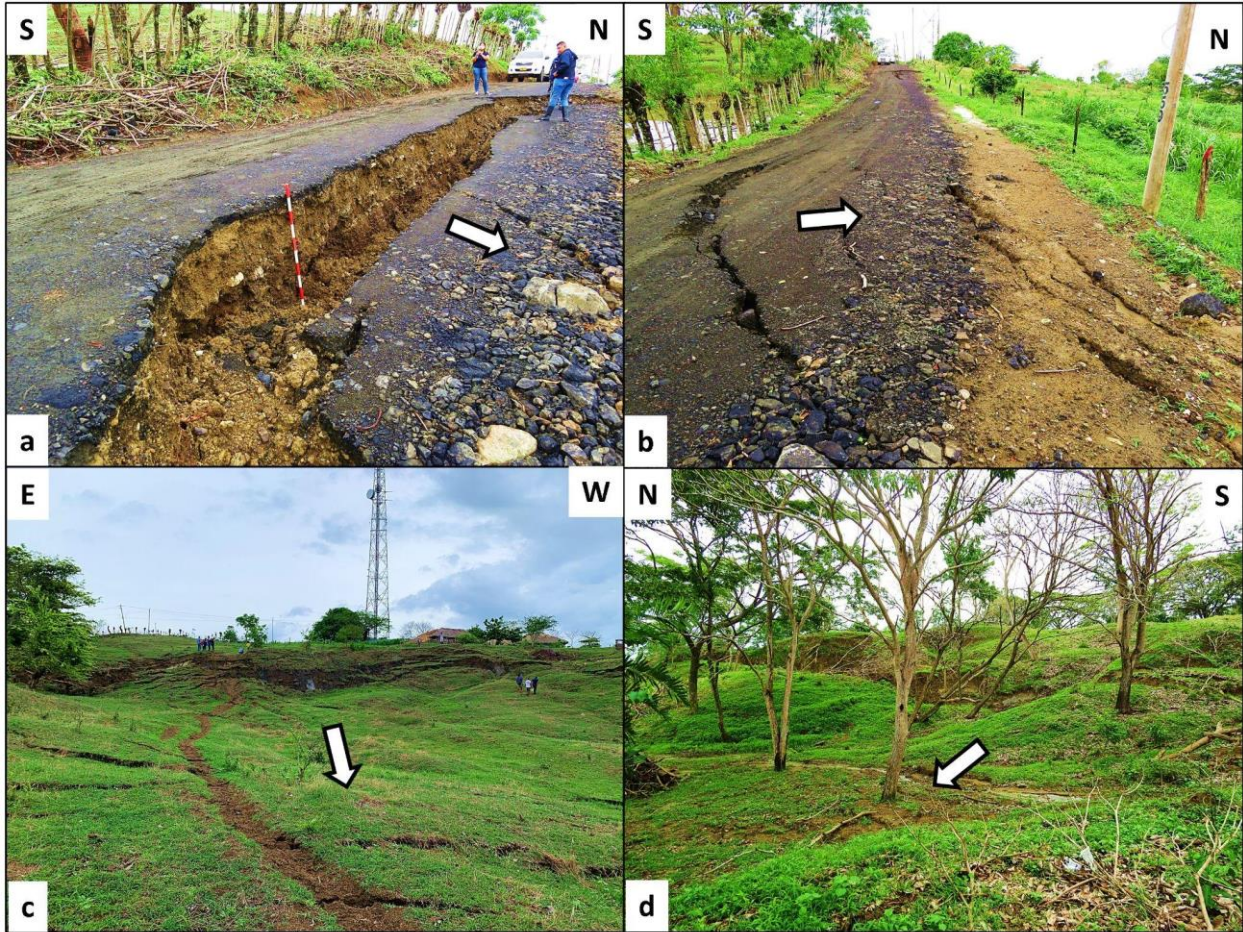


Figura 58. Deslizamiento en la ladera del flanco izquierdo del movimiento en masa principal
a) y b) coronas semicirculares asociadas a la retrogresión del deslizamiento que afectó la vía hacia el sector cerro Santa Cruz; c) escarpe principal del deslizamiento; d) escarpes secundarios dentro del cuerpo del deslizamiento

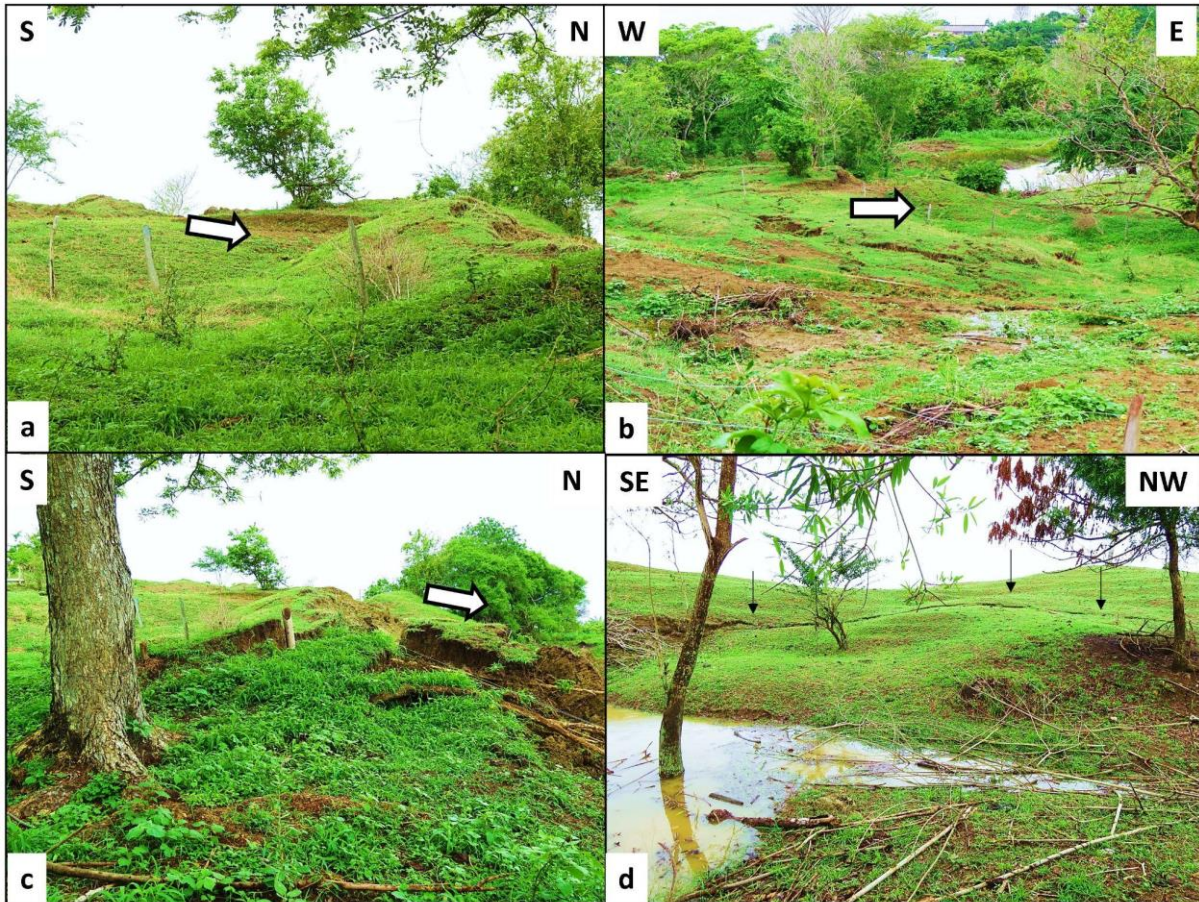


Figura 59. Evidencias de deformaciones causadas por antiguos deslizamientos rotacionales

a) b) y c) rasgos morfológicos antiguos como abombamientos, bloques rotados, contraescarpes, posiblemente asociados a un antiguo deslizamiento con mecanismo rotacional; d) se señala con flechas negras la posición y continuidad de una grieta reciente asociada a la corona localizada en la vía mostrada en la Figura 58 a.

Parra (1989) y Carvajal (2001) ya habían identificado, reportado y cartografiado los principales rasgos de inestabilidad del área afectada por el movimiento actual, confirmando la presencia de cicatrices y coronas antiguas, que son la principal evidencia de procesos de inestabilidad anteriores.

De acuerdo con lo anterior, se sugiere que el área actual deslizada corresponde a la reactivación de un antiguo depósito coluvial, con mecanismo de falla predominantemente de tipo traslacional, que se vio favorecida posiblemente por: alta saturación del material de consistencia blanda y alta plasticidad y por la influencia de los esfuerzos generados en la base de la ladera por el avance del flujo de tierra en el flanco izquierdo.

Afectaciones

La afectación observada corresponde a daños en 60-70m del tramo vial, compuesto en afirmado compactado, que conduce de Puerto Escondido al cerro Santa Cruz (figura 60). El tramo se encuentra afectado por grietas semicirculares, con aberturas máximas de 0,7m y profundidades hasta de 1m, presentando deformaciones y desplazamientos tanto horizontales como verticales, generando pérdida de la banca en dos secciones del tramo de la vía de 180 m².



Figura 60. Afectación de la vía al cerro Santa Cruz por deslizamiento

a) Tramo de vía afectado por grieta semicircular, longitud 20 m, ancho 6 m; b) Detalle de afectación en tramo de vía con desplazamientos horizontales y verticales.

8.1.4. Análisis multitemporal

Con el fin de analizar la evolución del movimiento en masa, se realizó un proceso de reconstrucción, digitalización y comparación de los polígonos cartografiados en los años 1989, 2001 y 2023. La digitalización de los procesos antiguos se realizó con base en las coordenadas existentes en los informes, mientras que, para el polígono actual se utilizó la información recopilada en campo durante la visita y la ortofoto adquirida con dron y suministrada por la CVS con fecha de levantamiento del 03 de junio de 2023.

En la figura 61 se muestra la reconstrucción del primer registro cartográfico del movimiento en masa de 1989, representado sobre una imagen de ESRI Imagery de diciembre de 2019. Se observa que el ancho del movimiento disminuye de la corona hacia la punta, con una dirección de movimiento aproximada de 280° de azimut, es decir hacia el W-NW. El área de afectación directa es de 78,9 ha que también incluye grietas y escarpes dentro del cuerpo del movimiento. Adicionalmente se tienen cartografiadas algunas grietas de tensión y desgarre asociadas a la retrogresión del proceso. Según esta representación, en ese entonces, el avance del proceso habría podido alcanzar el cauce llamado Ralos por el noroeste hacia su punta y parte de su flanco derecho, en límites con el cerro Tortugón, sin embargo, no se reportaron represamientos ni afectaciones en viviendas (Parra, 1989).

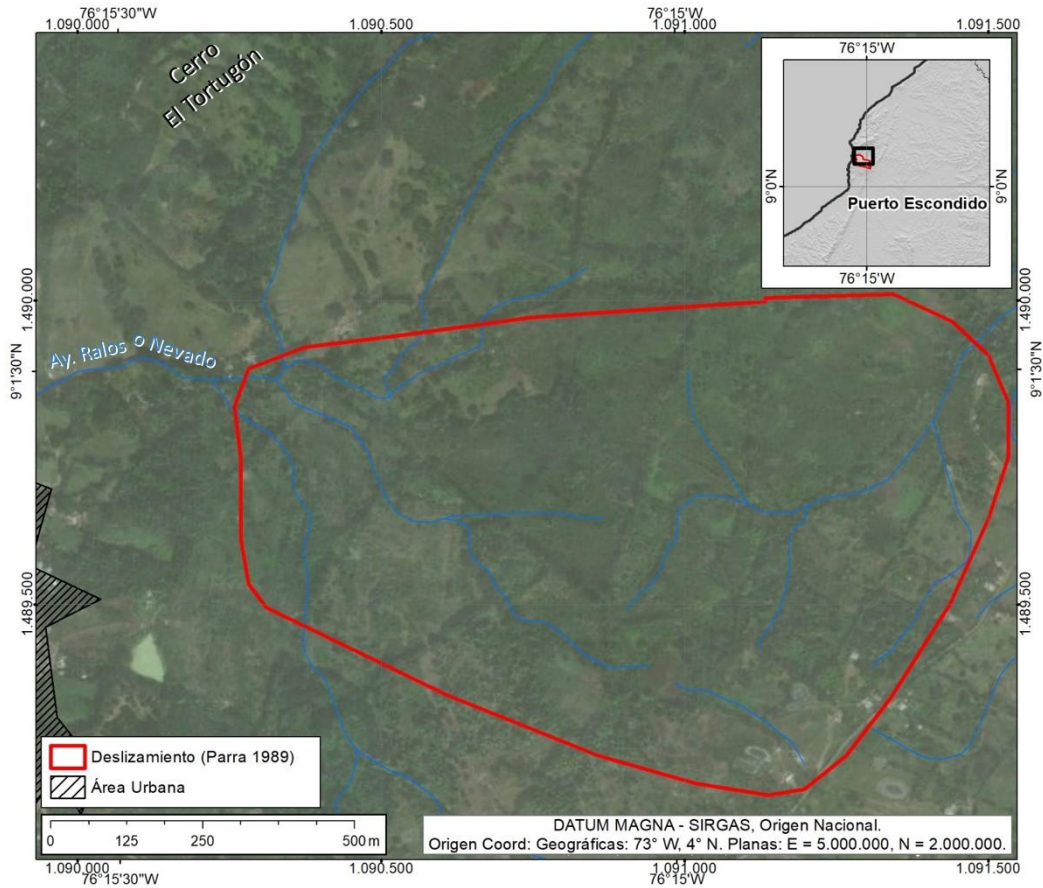


Figura 61. Polígono digitalizado del deslizamiento reportado por Parra (1989)

Fuente: adaptado de Parra (1989)

En la figura 62 se presenta el segundo polígono cartografiado en 2001, digitalizado sobre imagen de Google Earth de 2019. Este polígono presenta una morfología más semejante a una lengua que inicia relativamente angosta en cercanías al sector Dos Caminos, donde se tienen bocas inactivas del diapirismo de lodo, y cuya punta presenta una terminación más ancha y lobulada cerca del arroyo Ralos o Nevado, el mismo que limita con el cerro Tortugón en el polígono de Parra (1989). La dirección de movimiento varía entre 295° y 300°, es decir hacia el noroeste.

El área afectada corresponde a aproximadamente a 42 ha. Según la cartografía de Carvajal (2001), el proceso presentaba un par de coronas antiguas hacia el flanco izquierdo relativamente cercanas a la vía que conduce hacia el cerro Santa Cruz, las cuales podrían estar asociadas a las deformaciones y cicatrices que se observaron en 2023 hacia este mismo sector, que fue afectado por deslizamientos de tipo traslacional. Adicionalmente, Carvajal representó las grietas que se desarrollaron hacia la corona del movimiento, la zona de transición hacia su flanco izquierdo, así como los empozamientos de agua en el cuerpo y corona del movimiento en masa.

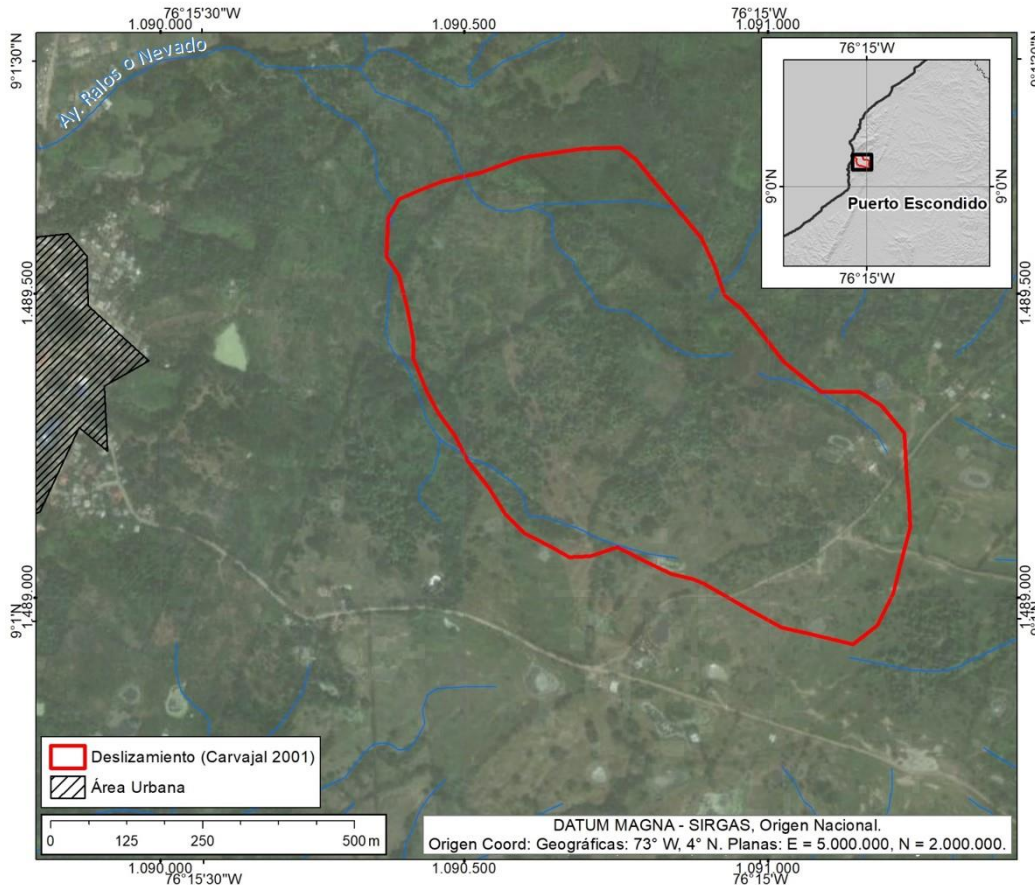


Figura 62. Polígono digitalizado del deslizamiento cartografiado por Carvajal (2001)

Fuente: adaptado de Carvajal (2001).

Ahora, en la figura 63 se señala el polígono actual del movimiento en masa, cartografiado a partir de las observaciones realizadas en campo hasta el 1 de junio de 2023 y sobre la ortofoto de CVS, con fecha del 03 de junio de 2023.

En este polígono se señalan las siguientes zonas: **(IA)** con evidencias de mecanismo de tipo propagación lateral (14 ha); **(IB)** con evidencias de ensanchamiento hacia el flanco derecho y corona (26,2 ha); **(II)** con mecanismo de tipo flujo de tierra (27,8 ha); **(III)** con mecanismo de tipo deslizamiento (23,7 ha) que evidencia ensanchamiento hacia el flanco izquierdo y **(IV)** (14,2 ha) donde no se identificaron ni rasgos ni evidencias recientes de inestabilidad, aunque se debe considerar como un área de seguimiento y monitoreo para prevenir daños en las viviendas de los barrios Simón Bolívar y Miramar. A la fecha de la visita las familias de estos barrios y del 11 de Enero se encontraban alojadas en un albergue temporal, pues la Alcaldía municipal había realizado una evacuación preventiva por una eventual afectación por el avance de la punta del flujo.

En el proceso cartográfico del actual movimiento, se identificó la boca principal activa del diapirismo de lodo, los cuerpos de agua pre-existentes como aljibes y lagos artificiales de uso doméstico y para cultivo de peces, los empozamientos y/o encharcamientos que se generaron producto de las deformaciones por el movimiento en masa, así como rasgos geomorfológicos indicativos de inestabilidad como coronas de

movimientos recientes, cicatrices de movimientos antiguos, grietas transversales, longitudinales y escarpes secundarios.

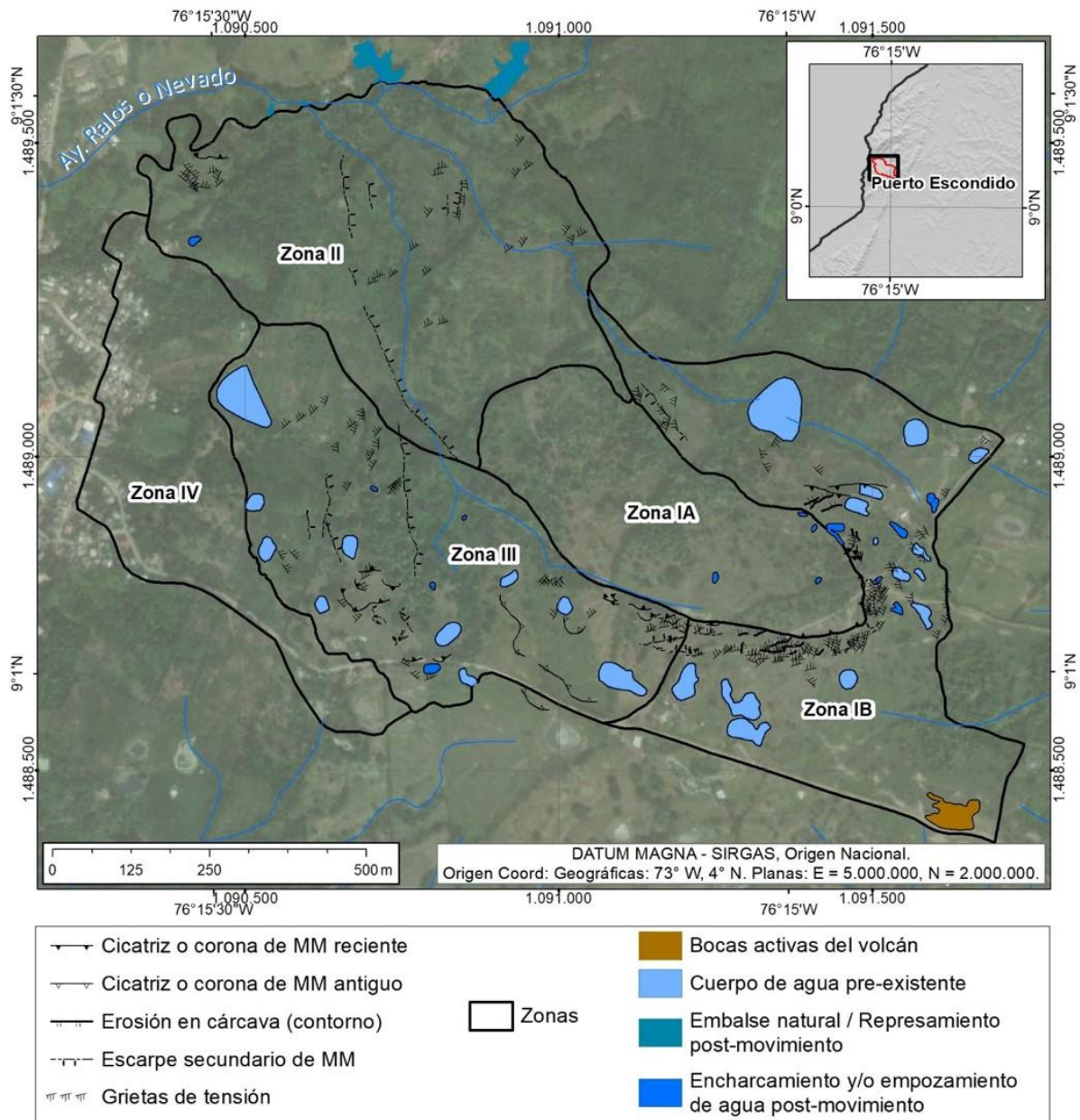


Figura 63. Zonas que representan las características del actual movimiento en masa del cerro Santa Cruz

Al comparar los tres movimientos (1989, 2001 y 2023) y considerando los testimonios de habitantes del sector, se concluye que, si bien el proceso ha tenido ciclos de relativa quietud a lo largo de los años, no existen datos suficientes que permitan asociar de manera directa que la actividad de diapirismo de lodo (emanación de gases y lodo) sea el factor detonante de los procesos de inestabilidad del terreno. No obstante, sí se considera un factor contribuyente debido al tipo y calidad de los materiales que emanan de las bocas activas del volcán de lodo.

Igualmente, se resalta que la actividad registrada en los años anteriores del movimiento en masa y sus efectos no alcanzó la magnitud de 2023. Esto puede explicarse a raíz del sismo de Mw 6,6 con epicentro en el mar Caribe, que muy seguramente incrementó los esfuerzos causantes de la inestabilidad. Además, en comparación con los eventos anteriores, el movimiento en masa del 2023 reporta una precipitación acumulada antecedente mucho mayor, por lo que se infiere que el material también se encontraba saturado.

Finalmente, aunque la morfología y dirección del movimiento han mantenido su tendencia original, los mecanismos de falla actuales y sus efectos revisten mayor complejidad, involucrando mayor alcance y velocidad de la progresión de la masa suelta, la retrogresión de la corona y el ensanchamiento de los flancos, con el agravante de que hoy día se tiene una mayor cantidad de elementos expuestos en los alrededores del área afectada.

9. Caracterización geoquímica de gases, aguas y lodos en el cerro Santa Cruz

En general, la composición química de gases de los volcanes de lodo del caribe colombiano (tabla 6) corresponde a metano (CH₄), el gas más abundante y predominante. Igualmente, se presentan trazas de etano, propano, butano y dióxido de carbono (C₂H₆, C₃H₈, C₄H₁₀ y CO₂) (Boadilla, 2008 y 2009 en Carvajal y Mendivelso, 2017). Estos resultados composicionales son similares a los de otros sectores del mundo, con predominio de metano (Higgins y Saunders, 1974 en Carvajal, 2001).

Tabla 6. Composición de los gases de volcanes de lodo en Colombia

Volcán de lodo	Aire %	Aire mg/L	CH₄ %	CH₄ mg/L	CO₂ %	CO₂ mg/L
Pueblo Nuevo	43,05	383,68	56,53	1796,10	0,42	3,62
El Totumo P	9,89	55,62	89,05	2596,64	1,06	10,57
Galerazamba	4,53	5,52	94,33	2596,64	1,14	10,74
La Lomita	94,25	831,57	5,61	167,64	0,14	<0,13
Membrillal	80,64	713,28	18,69	567,14	0,67	6,42
Flamenco	74,49	656,76	25,24	766,93	0,27	1,67
Santa Catalina	97,87	884,32	1,99	59,93	0,14	0,13
El Reposo	52,16	425,10	47,28	1363,16	0,56	4,79
Clemencia	3,64	<0,1	94,37	2552,92	1,99	19,46
Cañaveral	97,96	850,85	1,94	56,12	0,10	<0,13
Turbaco	92,48	808,50	7,11	210,81	0,31	2,16
El Rodeo	66,74	577,48	32,83	985,70	0,43	3,49
Yerbabuena	41,26	374,92	58,04	1883,80	0,70	7,34
Laguna Boca 1	88,14	580,5	11,55	262,8	0,31	1,19

Volcán de lodo	Aire %	Aire mg/L	CH₄ %	CH₄ mg/L	CO₂ %	CO₂ mg/L
Laguna Boca 2	49,94	326,7	49,13	1160,8	0,93	7,00
Bajo Las Palmas M-1	53,95	404,4	44,73	1190,0	1,32	12,25
Bajo Las Palmas M-2	29,45	175,6	68,61	1593,1	1,94	16,08

Fuente: tomado de Boadilla (2008; 2009) en Carvajal y Mendivelso (2017).

Con el fin de verificar la composición de los gases emanados en las grietas del movimiento en masa de Puerto Escondido, se muestrearon durante la visita técnica: los gases difusos en suelo, gases y fisicoquímica de aguas en manaderos de lodo, humedales y espejos de agua, específicamente en el área de la corona del deslizamiento activo en el sector Dos Caminos, y en la zona principal de emanaciones de lodo del volcán de Puerto Escondido.

9.1. Gases difusos en el suelo.

La caracterización de emanaciones de gases difusos se realizó con un flujómetro para medición de la desgasificación difusa del suelo. Se efectuó un muestreo con estaciones espaciadas entre 20-50m, definiendo trayectorias de tendencias principales con direcciones N30°-40°E, N50°-80°W y E-W, para cubrir de manera uniforme el área de la corona del deslizamiento activo, que presentaba emanaciones de gases y lodos (sector Dos Caminos) y la zona principal de emanaciones del volcán de lodo de Puerto Escondido (figura 64).

Se identificaron concentraciones de gases difusos en el suelo de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y sulfuro de hidrógeno (H₂S). Respecto a las concentraciones de gas metano, se identificó un área anómala de 0,15 ha, específicamente en el sector de Dos Caminos en las coordenadas 9° 1'3.61"N y 76°14'56.21"O y altitud de 112 m.s.n.m, durante las mediciones realizadas el 31 de mayo y 1 de junio (figura 65). La anomalía correspondió a concentraciones de este gas en más del 75 % (>700000 ppm) (tabla 7) y flujos de 46013 g/m²d (gramos/metro cuadrado por día) (figura 66).

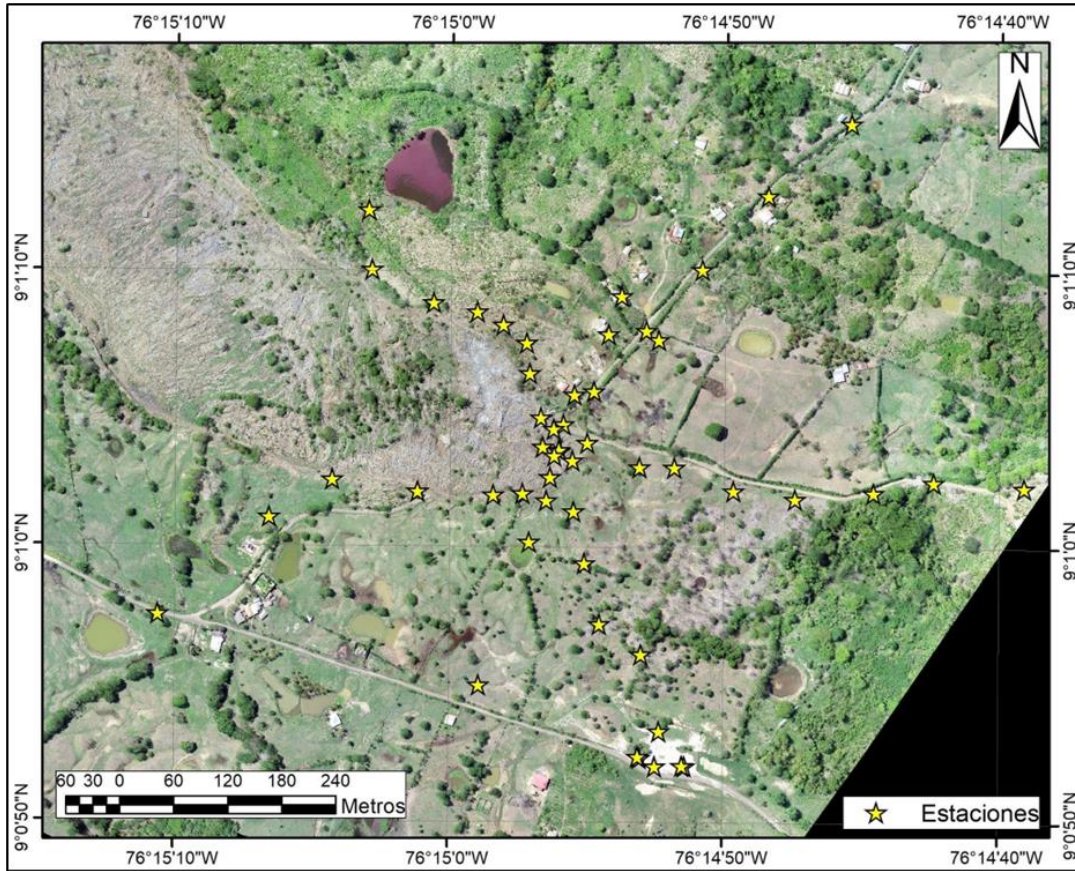


Figura 64. Estaciones de campo de medición de gases difusos en suelo
Fuente: modificado sobre ortofoto de la CVC, 30 de mayo 2023.



Figura 65. Área anómala con alta concentración de gas metano
a) vista panorámica de la zona con grietas distensivas de tendencia predominante N30°-50°E, en la corona del movimiento en masa activo; b) detalle de la zona anómala con emanación de lodo.

Tabla 7. Especificaciones técnicas del sensor multigas

Especificaciones técnicas de medida del equipo		Resultados gas metano (CH ₄)	
Instrumento S/N:	WS1910-AC2001	Sensor:	DIG
Tiempo:	01-06-2023 12:47:50	Tipo:	D2
Estación:	VDB07	Sensores tipo:	CH ₄
Punto:	727	Sensor_id:	WS1910:0
Longitud:	-76.248823	Ruta:	Activa
Latitud:	9.017587	Filtro:	Apagado
Error de posición (m):	3.0	Estado:	172/172
Elevación (m):	103,0	Escala_completa (ppm):	n.a.
Error elevación (m):	n.a.	Límite izquierdo (sec):	38

Especificaciones técnicas de medida del equipo		Resultados gas metano (CH ₄)	
Temperatura (°C)	27,80	Límite derecho (sec):	115
Presión (HPa):	998,91	Promedio (ppm):	597687,384620
Cámara de acumulación:	B	Desviación estándar:	180952,319177
Notas:	Temperatura 26,0	Valor mínimo (ppm):	1,0
Numero de sensor:	9	Valor máximo (ppm):	753365,375000
		Flujo (ppm/sec):	2.59E03
ACK (mol/m ² /d)/(ppm/s):	0,7	Flujo (moles/m ² /d):	1.74E03
		R ² :	0,375

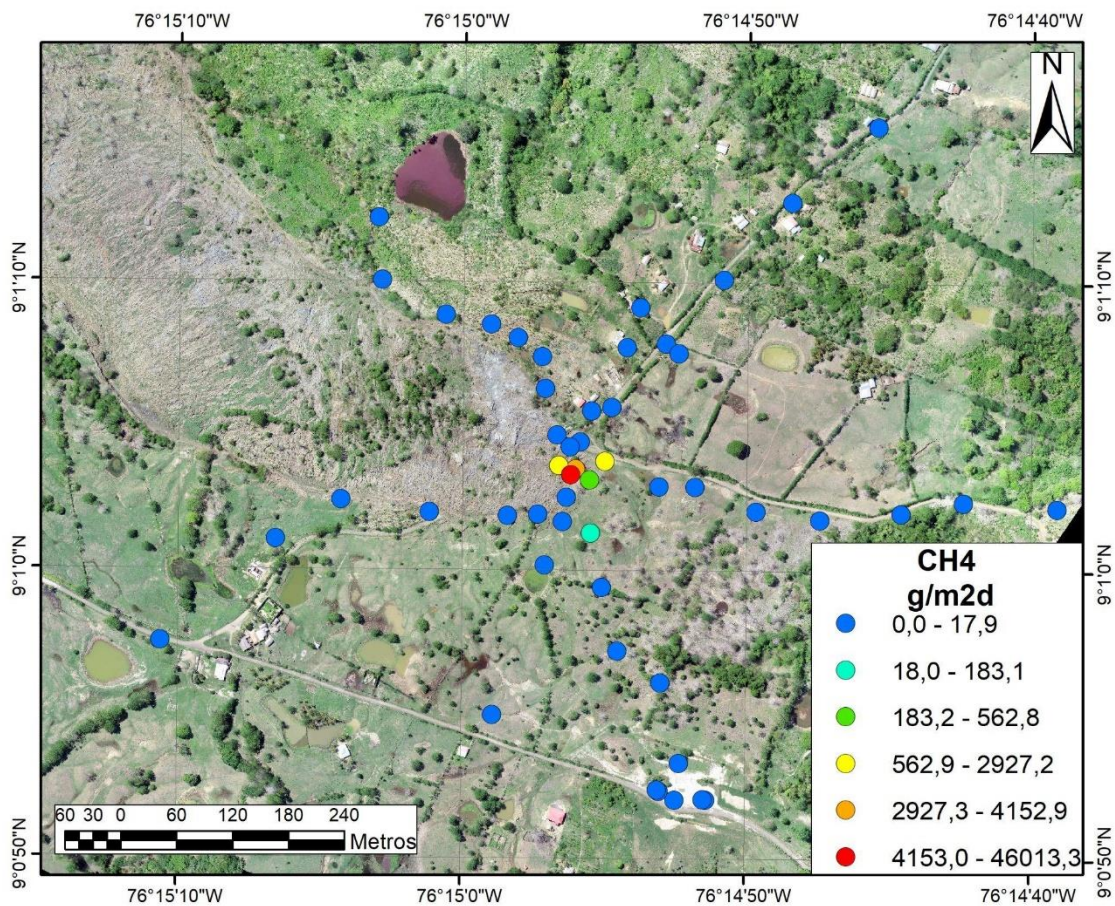


Figura 66. Concentración de gas metano en (g/m²d).

Los valores con concentraciones más altas, medidos durante el 31 de mayo y 1 junio, se representan con círculos de colores rojo y naranja e indican una zona anómala de salida de este gas. En otros sectores y en la zona principal de emanaciones de lodo del volcán Puerto Escondido, las concentraciones medidas se encuentran en niveles muy bajos (círculos de color azul). Fuente: modificada de la ortofoto de la CVC del 30 de mayo 2023.

En general, en el sector Dos Caminos y en el manadero principal de lodos del volcán de Puerto Escondido, se determinaron concentraciones menores del 1% en peso, de otros gases como dióxido de carbono (CO_2) (figura 67) y ácido sulfhídrico (H_2S). Las concentraciones de H_2S medidas son muy bajas ($0,085 \text{ g/m}^2\text{d}$) y se encuentran por debajo del límite de cuantificación del equipo.

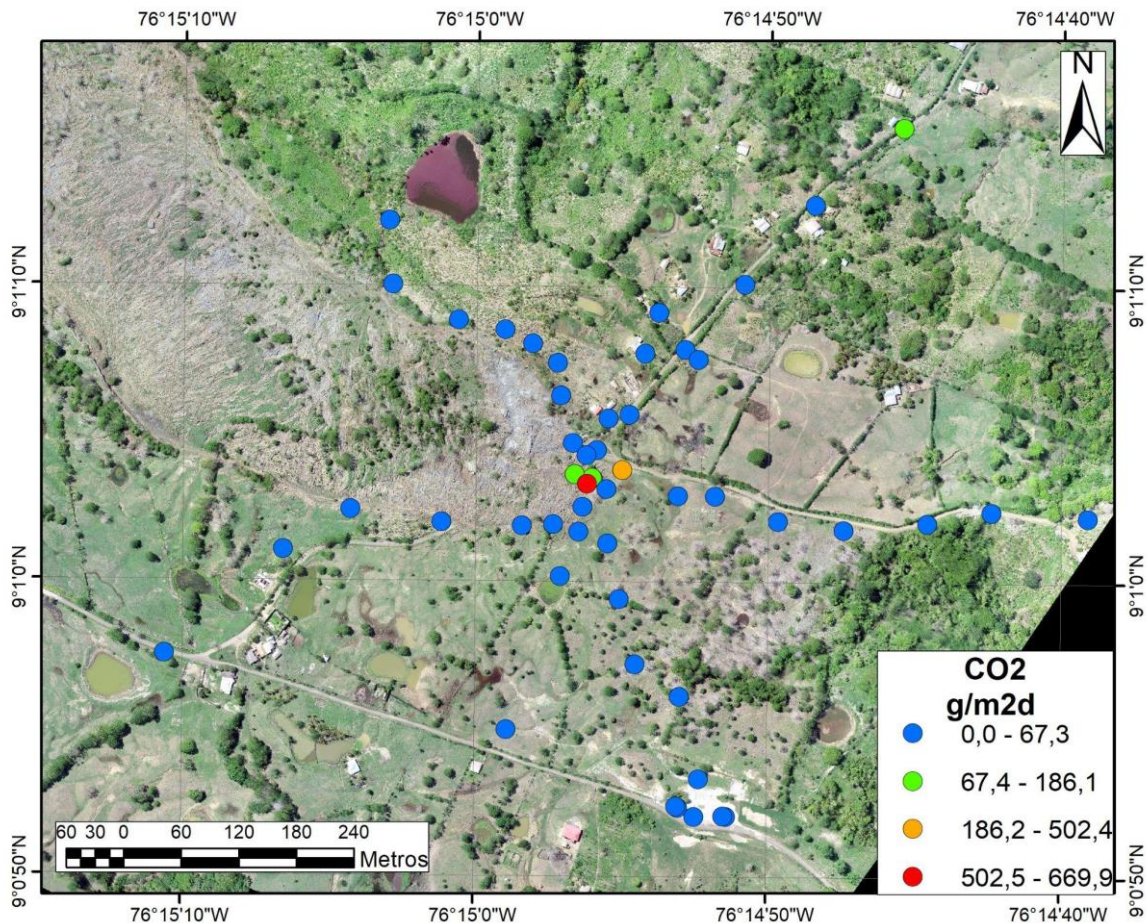


Figura 67. Concentración de dióxido de carbono en $\text{g/m}^2\text{d}$

Los valores representados por el círculo de color rojo, indican la zona anómala asociada a altas concentraciones de gas metano.

9.2. Físicoquímica de aguas

Durante la visita de inspección se recolectaron muestras de aguas en cuatro puntos, en humedales y manantiales con burbujeo. Se midieron parámetros físicoquímicos *in situ* mediante un equipo Multiparámetro Thermo Scientific A325: pH, conductividad eléctrica y temperatura, los valores de pH se encuentran en el rango de 6,7 a 9,5, valores que se encuentran en la clasificación de aguas neutras a ligeramente alcalinas, de manera general el rango normal de pH en agua superficial y/o subterránea está entre 6,5 a 8,5. Las temperaturas de las aguas muestran un valor cercano a la temperatura ambiente. Los resultados de las medidas *in situ* se presentan en la tabla 8.

Tabla 8. Características fisicoquímicas de muestras de agua colectadas el 30 de mayo del 2023

ID Muestra	Longitud	Latitud	Tipo de muestra	pH	Temperatura °C	Conductividad eléctrica $\mu\text{S}/\text{cm}$	Localización
JCH-PE-02	-76,249	9,016	Humedal con burbujeo	9,48	30,2	1191	Zona 2. Corona de deslizamiento activo. Área sin afectación por grietas
JCH-PE-013	-76,248	9,018	Separado de lodo	7,54	32,3	5424	Zona 2. Corona de deslizamiento activo. Manadero de lodo
JCH-PE-017	-76,249	9,018	Manantial con burbujeo	6,73	29,7	5705	Zona 1. Manadero principal de lodos, volcán de lodo Puerto Escondido.
JCH-PE-018	-76,247	9,0145	Manantial burbujeante	8,89	26,6	24080	Zona 1. Manadero principal de lodos, volcán de lodo Puerto Escondido.

Adicionalmente, se tomaron muestras para realizar una caracterización química relacionada con la composición de aniones: cloruros, sulfatos, nitratos, bromuros, fluoruros y cationes mayoritarios como calcio, sodio, potasio, magnesio, manganeso, hierro y litio. Las muestras fueron analizadas en los laboratorios del SGC mediante el uso del equipo de Cromatografía Iónica Metrohm y un equipo Espectrofotómetro de Absorción Atómica de llama Thermo Scientific. Los resultados de aniones muestran presencia de altos contenidos de cloruros en las muestras de la Zona 1 (manadero principal de lodos) alcanzando valores hasta de 8200 mg/L (tabla 9).

Tabla 9. Concentraciones de aniones de muestras de agua colectadas el 30 de mayo del 2023 en mg/l

ID MUESTRA	Fluoruro	Cloruro	Bromuro	Nitrato	Sulfato
JCH-PE-02	<0,10	146,010	0,615	<0,10	287,385
JCH-PE-02 duplicado	<0,10	144,818	0,567	<0,10	283,705
JCH-PE-13	<0,10	518,644	3,112	<0,10	1876,765
JCH-PE-17	<0,10	577,875	2,891	<0,10	2175,53
JCH-PE-18	<0,10	8297,175	56,003	<0,10	221,409

Así mismo, las muestras de la zona 1 también contienen altas concentraciones de sodio (tabla 10), por lo tanto se puede establecer que estos fluidos líquidos son del tipo clorurados sódicos, lo cual establece su concordancia con los volcanes de lodo en el mundo (Chia-Chuan Liu, *et al*, 2012)

Tabla 10. Concentraciones de cationes de muestras de agua colectadas el 30 de mayo de 2023 en mg/l

ID MUESTRA	Sodio	Potasio	Calcio	Magnesio	Hierro	Manganeso	Zinc	Litio	Aluminio
JCH-PE-02	169,86	6,57	37,80	22,40	<0,50	<0,20	<0,10	<0,10	<5,00
JCH-PE-02 Duplicado	168,07	6,68	38,24	21,92	<0,50	<0,20	<0,10	<0,10	<5,00
JCH-PE-13	804,79	23,87	380,75	88,32	<0,50	1,22	<0,10	<0,10	<5,00
JCH-PE-17	861,94	13,42	301,01	94,61	2,64	1,35	<0,10	<0,10	<5,00
JCH-PE-18	6141,85	15,43	25,52	25,95	<0,50	<0,20	<0,10	<0,10	<5,00

9.3. Gases en manaderos de lodo, humedales y espejos de agua.

Las muestras para análisis composicional por cromatografía de gases se recolectaron utilizando una película de PVC transparente la cual confina los gases emanantes. Luego, por medio de tubos siliconados y trampa de agua, los gases son dirigidos a bolsas tipo Tedlar® con la ayuda de una bomba de muestreo Universal PCXR4 y cámara de muestreo a presión negativa Vac-U-Chamber (figura 68).

Se recolectaron cinco muestras en zonas donde se evidencia la salida de gases bien sea porque se percibe flujo o se observa burbujeo tanto en el lodo como en el agua.

Tabla 11. Muestras de gases colectadas el 31 de mayo del 2023

ID Muestra	Longitud	Latitud	Lugar de recolección	Localización
JCH-PE-02	-76,249	9,016	Humedal con burbujeo	Zona 2. Corona de deslizamiento activo. Área sin afectación por grietas
JCH-PE-05			Manadero de gases en la corona de deslizamiento activo con grietas distensivas	Zona 2. Corona de deslizamiento activo. Área con afectación por grietas distensivas.
JCH-PE-09			Manadero de lodo	Zona 2. Corona de deslizamiento activo. Área sin afectación por grietas.
JCH-PE-017	-76,249	9,018	Espejo de agua con burbujeo local en zona de grietas	Zona 2. Corona de deslizamiento activo. Área con afectación por grietas.
JCH-PE-018	-76,247	9,0145	Manantial burbujeante	Zona 1. Manadero principal de lodos, volcán de lodo Puerto Escondido.



Figura 68. Sistema para la recolección de gases

9.3.1. Análisis composicional

En los laboratorios del SGC se estabilizan las muestras a temperatura ambiente, se acoplan, se pasan por un filtro que retiene la humedad y material particulado. Luego se inyectan y analizan, utilizando el equipo Cromatógrafo de Gases Agilent 7890A configurado con dos métodos cromatográficos que permiten la separación y cuantificación de gases permanentes e hidrocarburos de bajo peso molecular.

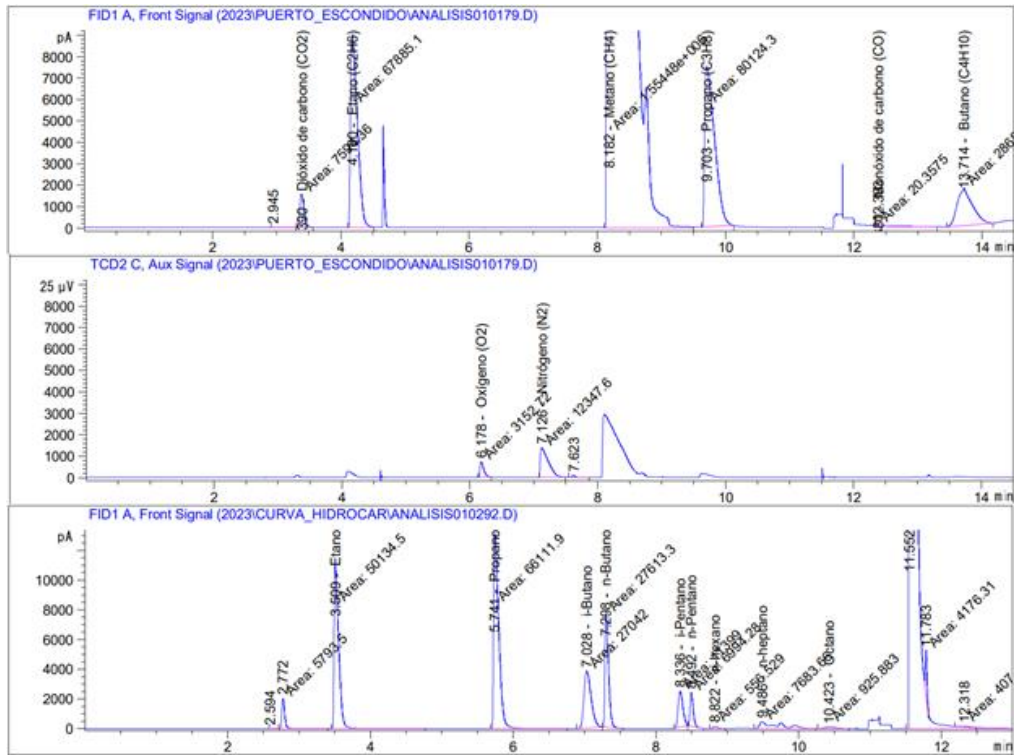


Figura 69. Cromatogramas de la muestra JCH-PE-05
La muestra fue colectada en la zona de anomalía con alta concentración de gas metano, en el sector Dos Caminos.

En la figura 69 se observan tres cromatogramas que representan la respuesta de los detectores en relación con el tiempo de separación. En la parte superior e inferior de la figura se observan los picos propios de: dióxido de carbono (CO_2), metano, monóxido de carbono (CO) y otros hidrocarburos. Los cuales se han manifestado en el detector de ionización de llama (FID); el dióxido de carbono y monóxido de carbono fueron convertidos en metano (CH_4) mediante un catalizador de níquel en presencia de hidrógeno (metanizador) para poder ser medidos en el detector FID. En la parte media se encuentra la respuesta obtenida por el detector de conductividad térmica (TCD) el cual es usado para determinar nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2).

Tabla 12. Resultados composicionales muestras recolectadas

Componente	Aire	JCH-PE-02	JCH-PE-05	JCH-PE-09	JCH-PE-17	JCH-PE-18
Oxígeno (O_2) (%)	21,6	8,8	3,8	9,4	5,8	15,2
Nitrógeno (N_2) (%)	77,4	32	13,7	33,8	20,6	54,6
Dióxido de Carbono (CO_2) (%)	0,1	0,7	0,3	0,4	1,6	0,4
Monóxido de carbono (CO) (ppm)	9	12	191	8,00	112	7,0
Metano (CH_4) (%)	0,0	53,6	75,4	52	67	29,4
Etano (C_2H_6) (%)	0,0	1,3	1,7	1,2	1,5	0,0
Propano (C_3H_8) (ppm)	0,0	11277	14932	10143	12625	40
i-Butano (C_4H_{10}) (ppm)	0,0	4172	4428	3199	4250	1
n-Butano (C_4H_{10}) (ppm)	0,0	3317	4521	3217	4371	0,0
i-Pentano (C_5H_{12}) (ppm)	0,0	1442	1864	1342	1686	0,0
n-Pentano (C_5H_{12}) (ppm)	0,0	768	1142	758	975	0,0
n-hexano (C_6H_{14}) (ppm)	0,0	54	87	53	71	0,0
n-heptano (C_7H_{16}) (ppm)	0,0	766	1255	765	878	6,0
Octano (C_8H_{18}) (ppm)	0,0	84	148	83	92	0,0
Otros (%)	0,9	2,0	2,2	1,2	1,0	0,4

9.3.2. Eliminación de la influencia de gases atmosféricos

El ingreso de gases atmosféricos al momento de la recolección de las muestras puede generar contaminación en las muestras gaseosas, aumentando la proporción de nitrógeno, dióxido de carbono y monóxido de carbono. Para eliminar estas interferencias se adoptan medidas como la realización de vacío en los conductos y la bolsa antes de la toma de la muestra, el ajuste de la lámina de PVC al suelo o la superficie donde se van a recolectar las muestras, aun así, en los resultados se encuentra cantidades apreciables de contaminantes como el oxígeno, por lo que se hace necesario realizar una corrección o ajuste.

La atmósfera terrestre está compuesta aproximadamente por el 78 % de nitrógeno, 21% de oxígeno y el restante 1% lo ocupan otros gases, principalmente dióxido de carbono y argón. Los gases provenientes de procesos geológicos como el que acompaña el diapirismo de lodo contiene cantidades de oxígeno prácticamente despreciables. Por lo tanto, es posible realizar una corrección de la contaminación influenciada por gases atmosféricos, hallando la relación que existe entre el oxígeno y los demás componentes al tomar muestras de gases ambientales cercanas al lugar donde se toman las muestras para análisis cromatográfico.

Tabla 13. Resultados composicionales ajustados mediante la eliminación de gases atmosféricos.

Componente	JCH-PE-02	JCH-PE-05	JCH-PE-09	JCH-PE-17	JCH-PE-18
Nitrógeno (N ₂) (%)	0,7	0,1	0,0	0,0	0,5
Dióxido de Carbono (CO ₂) (%)	1,1	0,4	0,7	2,2	1,2
Monóxido de carbono (CO) (ppm)	13,0	230,0	8,0	149,0	3,0
Metano (CH ₄) (%)	90,1	91,3	91,6	91,1	96,8
Etano (C ₂ H ₆) (%)	2,1	2,1	2,1	2,0	0,0
Propano (C ₃ H ₈) (ppm)	18948	18092	17867	17152	132
i-Butano (C ₄ H ₁₀) (ppm)	7011	5364	5635	5774	5,0
n-Butano (C ₄ H ₁₀) (ppm)	5574	5478	5667	5938	1,0
i-Pentano (C ₅ H ₁₂) (ppm)	2424	2258	2365	2290	0,0
n-Pentano (C ₅ H ₁₂) (ppm)	1290	1384	1334	1325	0,0
n-hexano (C ₅ H ₁₄) (ppm)	91,0	106,0	93,0	97,0	0,0
n-heptano (C ₇ H ₁₆) (ppm)	1287	1521	1347	1192	20,0
Octano (C ₈ H ₁₈) (ppm)	141	179	146	124	0,0
Otros (%)	3,4	2,6	2,1	1,4	1,4

Conclusiones

Con base en la visita técnica realizada entre el 31 de mayo y 01 de junio de 2023 al cerro Santa Cruz afectado por un movimiento en masa, en el municipio Puerto Escondido, Córdoba, se puede concluir lo siguiente:

El sismo generado el 24 de mayo del 2023 en la región fronteriza Colombia-Panamá en aguas del mar Caribe con magnitud 6.6, generó la reactivación de un movimiento en masa antiguo que había sido identificado y reportado en los años 1989 y 2001, localizados en el cerro Santa Cruz, hacia el flanco noroccidental de la estructura dómica del volcán de lodo de Puerto Escondido. Adicionalmente, como consecuencia de este sismo, se deduce que se pudo generar una posible desestabilización de la estructura interna del volcán de lodo, y con ello, se desencadenó el escape de un reservorio de gas, cuyas concentraciones de metano (CH_4), medidas el 1 de junio registraron valores máximos de más del 70%.

A partir del análisis de las series de precipitación históricas así como de los días previos al evento, se puede concluir que se presentó una alta precipitación en la zona a partir del 20 de mayo del presente año, presentando el máximo de precipitación diaria el día 24 de mayo con un valor de 56 mm. Sin embargo, en años anteriores como el 2022 o en el fenómeno la Niña 2010-2011 se presentaron precipitaciones mucho mayores, alcanzando valores de 82,9 mm en un solo día, sin tener reportes de la ocurrencia de movimientos en masa en el sector. Lo anterior permite concluir que la precipitación no fue el detonante del movimiento en masa. Sin embargo, debido a la concentración de lluvia los días previos al evento, se deduce que la acumulación de agua en el suelo y la posterior saturación de los materiales fueron los factores contribuyentes para la ocurrencia del movimiento en masa del cerro Santa Cruz.

Si bien, a nivel mundial se han documentado varios casos de erupciones de volcanes de lodo asociadas a la ocurrencia de sismos con magnitud mayor a 5, el comportamiento de la respuesta de este tipo de volcanes aún sigue siendo incierta. Como posible explicación se relaciona un aumento en la permeabilidad o movilidad de fluidos resultante de la movilización de partículas coloidales atrapadas (o burbujas), debido a los flujos variables en el tiempo producidos por el paso de las ondas sísmicas a través de la estructura interna del volcán (Maxwell y Manga, 2012). Sin embargo, en el caso del cerro Santa Cruz no hubo reportes de la comunidad ni evidencias en campo de la movilidad de lodo en la zona de las bocas activas del volcán, por lo cual, no es posible argumentar ni caracterizar la ocurrencia de un proceso eruptivo del volcán como consecuencia del sismo del 24 de mayo de 2023.

Debido a que no se conoce el estado de la estructura interna del volcán de lodo antes y después del sismo y tampoco se tienen datos de caracterización de eventos eruptivos antiguos y sus recurrencias, no es posible definir si el escape de gases desde el interior del volcán fue un factor contribuyente o detonante en la ocurrencia del movimiento en masa, o, si por el contrario, las grietas en la superficie del terreno a causa del movimiento favorecieron la salida del gas y la aparición de nuevas bocas en superficie.

El movimiento en masa reactivado, inició con el desarrollo de un mecanismo de tipo propagación lateral en la corona (zona I) que se vio favorecido por las características arcillosas y de alta plasticidad del suelo transportado de flujo del volcán de lodo, con presencia de numerosas grietas y escarpes por retrogresión en una zona de baja pendiente; luego avanzó en dirección noroeste favorecido por el incremento paulatino de la pendiente de la ladera y el estado saturado del suelo hasta convertirse en un flujo de tierra en la parte baja del proceso (zona II); finalmente, se infiere que los esfuerzos generados por el movimiento progresivo del material pudieron contribuir en la desestabilización de la ladera del flanco izquierdo (zona

III), en la cual se tenían suelos transportados de coluvión como evidencias de antiguos movimientos en masa, lo que permitió la ocurrencia de nuevos deslizamientos traslacionales retrogresivos que afectaron la vía que conduce al cerro Santa Cruz.

Los cuerpos de agua existentes en la ladera afectada en el cerro Santa Cruz, junto a los encharcamientos y/o empozamientos de agua ocasionados por el movimiento en masa, sumado al desarrollo de niveles freáticos altos por la presencia del volcán de lodo (Carvajal, 2001) en la zona, son elementos que contribuyen a mantener la saturación del suelo, lo que constituye un factor desequilibrante en la estabilidad del terreno.

Los principales efectos ocasionados por los tres mecanismos de falla del movimiento en masa del cerro Santa Cruz corresponden a grietas, hundimientos y pérdida de banca en diferentes tramos de la vía que comunica al cerro, daños y pérdida total en viviendas del área rural, pérdida de cultivos (principalmente plátano) y represamientos locales en el arroyo Ralos o Nevado que limita por el noroccidente con el cerro Tortugón.

Al comparar las áreas y rasgos asociados al movimiento en masa del cerro Santa Cruz para los períodos 1989, 2001 y 2023, se concluye que el sismo fue un factor determinante para que la reactivación del movimiento ocurrida en 2023 supere notablemente la magnitud del proceso y la severidad de afectaciones, a los eventos presentados en los años anteriores. Esto sumado al hecho de que actualmente en esta área se tiene mayor cantidad de elementos expuestos tanto personas como infraestructura y medios de vida.

Durante los días 31 de mayo y 1 junio de 2023 se realizaron mediciones de multigases difusos para el suelo en el cerro Santa Cruz, en las coordenadas $9^{\circ} 1'3.61''N$ y $76^{\circ}14'56.21''O$ y altitud de 112 m.s.n.m., en donde se evidenció alta concentración de metano (CH_4) con valores máximos registrados del 70% y concentraciones menores del 1% de otros gases como dióxido de carbono (CO_2).

Se extrajeron dos muestras de suelos afectados por el movimiento en masa, con el fin de determinar sus propiedades índices. A partir de los resultados, se concluye que los suelos involucrados en el proceso de inestabilidad corresponden a arcillas de alta plasticidad, de consistencia blanda a muy blanda y humedad media a alta. Los índices de expansión dados por los ensayos muestran que estos materiales no presentan condiciones críticas de expansividad. Estos suelos arcillosos son principalmente de composición silícea, por su alto contenido de cuarzo y micas. Se aclara que los ensayos presentados corresponden a caracterizaciones de muestras recuperadas en campo para hacer el análisis interpretativo y no corresponden a un análisis detallado, por lo cual, no pueden ser usados bajo ninguna circunstancia para otros fines.

Recomendaciones

Debido al estado activo del movimiento en masa, se recomienda a la Administración municipal y a la CVS actualizar permanentemente el polígono de la “zona de monitoreo y seguimiento permanente”, con ayuda de sobrevuelos de dron y trabajo de campo. Así mismo, es importante articular este trabajo de monitoreo y seguimiento con la comunidad, con el fin de analizar su comportamiento y actividad futura, y así advertir y/o alertar sobre cualquier cambio que se produzca y si es necesario tomar nuevas medidas preventivas buscando siempre salvaguardar la integridad de la población.

Teniendo en cuenta la magnitud y dirección del movimiento, es necesario mantener las medidas de evacuación preventiva de las familias que habitan los barrios Miramar, Simón Bolívar y 11 de Enero. En caso de que se observe un nuevo avance del proceso hacia la “zona IV de seguimiento y monitoreo”, es necesario que la administración municipal evalúe la posibilidad de realizar nuevas evacuaciones preventivas.

Con respecto a los sitios de represamiento local de la quebrada que pasa cerca del barrio 11 de Enero y Simón Bolívar y si eventualmente se formaran nuevos embalses naturales, se recomienda evacuar el agua mediante alternativas técnicas adecuadas, con el fin de retirar el exceso de volumen y peso que ocasiona sobre la masa de suelo y así evitar rompimiento repentino de la presa. Si a pesar de realizar el drenaje controlado de las aguas represadas, continúa aumentando el nivel y no se drena con eficacia, es necesario que la Administración municipal evacúe aquellas viviendas que se encuentren dentro del área de influencia del cauce de esta quebrada, debido a una eventual afectación por rompimiento de la presa natural.

Teniendo en cuenta que, se desconoce el volumen real de material desplazado, así como el comportamiento geotécnico de los materiales que conforman el subsuelo y la influencia directa o indirecta que pueda tener la estructura interna del volcán de lodo en el avance del movimiento en masa, es necesario, realizar estudios que contemplen la aplicación de métodos geofísicos y exploración directa del subsuelo, con el fin de caracterizar los materiales y las estructuras internas asociadas al volcán de lodo.

También se recomienda elaborar estudios de amenaza por movimientos en masa del área rural en escala 1:25.000 y estudios detallados de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa del área urbana y de expansión en escala 1:2.000. Esto con el fin de conocer con mayor detalle los procesos geológicos, geomorfológicos y geotécnicos que afectan al municipio y caracterizar los posibles daños y pérdidas que pueden ocurrir en el municipio a causa de fenómenos amenazantes como los movimientos en masa o el diapirismo de lodo. Los resultados de estos estudios deberán ser incorporados en la actualización del Plan Básico de Ordenamiento Territorial y en los procesos de la gestión del riesgo de desastres del municipio, tal como lo requiere la normatividad vigente (Ley 1523 de 2012, Decreto 1077 de 2015, entre otros).

Se reitera la recomendación dada en el PMU del jueves 1 de junio de 2023, donde se estableció marcar un área de restricción con un radio entre 100-200m a partir del sitio de la anomalía con coordenadas 9° 1'3.61"N y 76°14'56.21"O, como medida de precaución ante posibles explosiones, incendios o detonaciones debido a la atmósfera explosiva generada en este lugar.

Bibliografía

- ANH (Agencia Nacional de Hidrocarburos), B&G Unión Temporal. (2006). Contrato 093: Cartografía geológica en los cinturones plegados Sinú - San Jacinto. Compilación y análisis de la información existente. Bogotá D.C., 69 p.
- Carvajal Perico, J. H. (2001). Caracterización de los problemas de inestabilidad del terreno en el volcán de lodo de Puerto Escondido - Córdoba. Ingeominas (Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras). Cartagena de Indias, 22 p.
- Cediel, F., R. P. Shaw, and C. Cáceres. (2003). Tectonic assembly of the Northern Andean Block, in C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. Blickwede, eds., *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir 79*, p. 815–848.
- Chia-Chuan Liu *et al.* (2012). Geochemical characteristics of the mud volcano fluids in southwestern Taiwan and their possible linkage to elevated arsenic concentration in Chianan plain groundwater. *Environmental Earth Sciences* 66:1513–1523. DOI 10.1007/s12665-011-1391-3.
- Carvajal Perico, J. H., & Mendivelso, D. (Eds.). (2017). *Volcanismo de lodo del Caribe central colombiano*. Libros del Servicio Geológico Colombiano. Recuperado a partir de <https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/book/33>.
- CVS (Corporación Autónoma Regional de los valles del Sinú y del San Jorge). (2022). Identificación y zonificación de áreas con condición de riesgo natural en Planes de Ordenamiento Territorial de dos municipios priorizados del departamento de Córdoba. Informe. Montería (Córdoba).
- Catálogo de sismicidad. (2023). Servicio Geológico Colombiano. Información consultada en junio de 2023 del sitio web oficial: http://bdrsnc.sgc.gov.co/paginas1/catalogo/Consulta_Experta_Seiscomp/mapa_sismicidad_experta.php
- Dearman, W.R. (1974). Weathering classification in the characterisation of rock for engineering purposes in British practice. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 9, 33–42. <https://doi.org/10.1007/BF02635301>.
- Desinventar. (2023). Base de datos sobre desastres. Consulta realizada en junio de 2023 del sitio web oficial: <https://db.desinventar.org/>.
- Higgins, G. E. & Saunders J. (1974). Mud volcanoes-their nature and origin. *Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft in Basel*, 84, 101-152.
- Hungr, O., Evans, S. G., Bovis, M. J., & Hutchinson, J. N. (2001). A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*, 7(3), 221–238. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.7.3.221>.
- Hungr, O., Leroueil, S. & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* 11, 167–194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>.
- Ingeominas (Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras), Geotec Ltda. (1999). Geología de la plancha 50 Puerto Escondido - Escala 1:100.000. Mapa.
- Ingeominas (Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras), Geotec Ltda. (2003). Geología de los cinturones Sinú - San Jacinto. Planchas 50 Puerto Escondido, 51 Lorica, 59 Mulatos, 60 Canalete, 61 Montería, 69 Necoclí, 70 San Pedro de Urabá, 71 Planeta Rica, 79 Turbo, 80 Tierralta. Escala 1:100.000. Memoria explicativa. Bogotá D.C., 225 p.
- Ikonet. com. (2023). Visual Dictionary: The Visual References. Imagen recuperada el 10 de junio de 2023, del sitio web: <http://www.ikonet.com/en/visualdictionary/earth/geology/landslides.php>.
- Lozano E., Zamora N. (2014). Anexo K. Compilación de la cuenca de Sinú -San Jacinto. Informe. Servicio Geológico Colombiano. Dirección de Geociencias Básicas - Grupo de Trabajo Tectónica. Bogotá D. C.
- Maxwell R., Manga M. (2012). Frequency dependence of mud volcano response to earthquakes. *John Wiley & Sons, Inc., Geophysical Research Letters* 39(14):14303- DOI: 10.1029/2012GL052383

- Montero Olarte, J. (Ed.). (2017). Clasificación de movimiento en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia. Libros del Servicio Geológico Colombiano. Recuperado a partir de <https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/book/36>.
- Parra Palacio, Eduardo. (1989). Informe preliminar del deslizamiento de Puerto Escondido, departamento de Córdoba. Ingeominas (Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras). Medellín.
- PMA: GCA (2007). Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. Movimientos en Masa en la región andina: una guía para la evaluación de amenazas. Publicación Geológica Multinacional, 4(432), 1. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) del municipio de Puerto Escondido (Córdoba) 2016-2027. (2016). Alcaldía municipal de Puerto Escondido.
- Rodríguez Castiblanco, E. A., Sandoval Ramírez, J. H., Chaparro Cordón, J. L., Trejos González, G. A., Medina Bello, E., Ramírez Hernández, K. C., Castro Marín, E., Castro Guerra, J. A., & Ruiz Peña, G. L. (Eds.). (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000. Libros del Servicio Geológico Colombiano. Recuperado a partir de <https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/book/34>.
- SGC (Servicio Geológico Colombiano), Universidad Nacional Sede Medellín. (2015). Mapa de amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 de la plancha 50 Moñitos. Proyecto: Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa escala 1:100.000 de la plancha 50 Moñitos. Mapa. Medellín.
- SGC (Servicio Geológico Colombiano), Universidad Nacional Sede Medellín. (2016). Memoria explicativa de la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 de la plancha 50 Moñitos. Proyecto: Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa escala 1:100.000 de la plancha 50 Moñitos. Informe. Medellín.
- SGC (Servicio Geológico Colombiano), UN (Universidad Nacional de Colombia). (2016). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Libros del Servicio Geológico Colombiano. Recuperado a partir de <https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/book/32>.
- SGC (Servicio Geológico Colombiano), UN Medellín (Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín). (2016). Mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa de la plancha 50 Moñitos. Mapa. Medellín.
- SGC (Servicio Geológico Colombiano). (2023). Portal web de la Red Sismológica Nacional de Colombia. Consulta realizada en junio de 2023 en el sitio web oficial: <https://www.sgc.gov.co/detallesismo/SGC2023keosra/resumen>.
- Servihídrica SAS. (2021). Estudio geoeléctrico para identificación de acuíferos en el barrio Ciudad Futuro del municipio de Puerto Escondido departamento de Córdoba. Informe.
- Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA). (2023). Servicio Geológico Colombiano. Consulta realizada en junio de 2023 en el sitio web oficial: <https://simma.sgc.gov.co/#/public/basic/>.

Índice de figuras

Figura 1. Localización del área visitada en el municipio de Puerto Escondido, Córdoba	9
Figura 2. Cartografía del deslizamiento elaborada en la visita de emergencia a Puerto Escondido en 1989	10
Figura 3. Imagen del mapa geológico de la plancha 50 Puerto Escondido	11
Figura 4. Cartografía geomorfológica local y del antiguo movimiento en masa	12
Figura 5. Categorías de amenaza por movimientos en masa a escala 1:100.000, Puerto Escondido	14
Figura 6. Susceptibilidad por movimientos en masa, escala 1:50.000, municipio de Puerto Escondido	15
Figura 7. Amenaza por movimientos en masa, escala 1:50.000, municipio de Puerto Escondido	15
Figura 8. Sismicidad histórica con epicentro en el Caribe colombiano	17
Figura 9. Esquema general del marco tectónico del noroeste de Suramérica	18
Figura 10. Sistema de cabalgamiento imbricado que caracteriza el estilo estructural del CPSN	19
Figura 11. Provincias del cinturón plegado del Sinú: costa adentro y costa afuera	20
Figura 12. Esquema estructural general de una zona costa adentro del CPSN	21
Figura 13. Esquema generalizado de un volcán de lodo, en superficie y profundidad	22
Figura 14. Modelo esquemático de emplazamiento de un volcán de lodo	22
Figura 15. Esquema generalizado del volcán de lodo de Puerto Escondido	23
Figura 16. Muestreo de gases en los focos de emisión principal	24
Figura 17. Zona de emisión de lodos en el sector Dos Caminos - cerro Santa Cruz	25
Figura 18. Columna estratigráfica generalizada para el cinturón plegado del Sinú	26
Figura 19. Esquema de la geología regional del cerro Santa Cruz en el municipio de Puerto Escondido	27
Figura 20. Suelo transportado de flujo del volcán de lodo (Stfvl)	30
Figura 21. Afloramiento de la unidad de suelo transportado de flujo del volcán de lodo (Stfvl)	31
Figura 22. Proporción de clastos dentro del almacén del suelo	32
Figura 23. Afloramiento de la unidad Suelo residual de arcillolitas de la Formación Morrocoy (Srafm)	33
Figura 24. Suelo transportado de coluvión (Stco)	34
Figura 25. Contexto geomorfológico regional del área de Puerto Escondido, sector cerro Santa Cruz	36
Figura 26. Estaciones de precipitación operadas por el Ideam, cercanas al municipio de Puerto Escondido	37
Figura 27. Serie de precipitación diaria –Estación CRISTO REY-AUT [12045020]	37
Figura 28. Precipitación total mensual-estación CRISTO REY - AUT [12045020]	39
Figura 29. Matriz de calor para la precipitación mensual - estación CRISTO REY - AUT [12045020]	40
Figura 30. Precipitación máxima en 24 horas- estación CRISTO REY - AUT [12045020]	40
Figura 31. Número de días con lluvia- estación CRISTO REY - AUT [12045020]	41
Figura 32. Comparativo de la precipitación media anual	42
Figura 33. Comparativo de la precipitación acumulada hasta el mes de mayo	43
Figura 34. Comparativo de la precipitación diaria desde el 01 de febrero hasta el 25 de mayo	44
Figura 35. Comparativo de la precipitación acumulada desde el 1 de febrero hasta el 25 de mayo	45
Figura 36. Precipitación diaria acumulada para 7, 14 y 21 días previos al evento	46
Figura 37. Precipitación diaria desde el 26 de mayo hasta el 12 de junio de 2023	47
Figura 38. Precipitación diaria acumulada desde el 26 de mayo hasta el 12 de junio de 2023	47
Figura 39. Precipitación diaria acumulada para 21 días en los diferentes eventos reportados	48
Figura 40. Precipitación diaria acumulada para 14 días en los diferentes eventos reportados	48
Figura 41. Precipitación diaria acumulada para siete días en los diferentes eventos reportados	49
Figura 42. Mapa de réplicas registradas asociadas al sismo principal	50
Figura 43. Panorámica del movimiento en masa complejo del cerro Santa Cruz	52
Figura 44. Esquema de los tipos de propagación lateral	53
Figura 45. Propagación lateral vista en diferentes sectores de la zona de inicio del movimiento	54
Figura 46. Familias de grietas identificadas en la zona de inicio	55
Figura 47. Rasgos de deformación asociados a propagación lateral en la parte alta del movimiento	56
Figura 48. Afectación en la vía del cerro Santa Cruz por la propagación lateral	56
Figura 49. Afectación a viviendas por el proceso de propagación lateral	57
Figura 50. Daños ambientales por la propagación lateral	58

Figura 51. Esquema de un flujo de tierra	59
Figura 52. Mediciones empíricas de desplazamiento realizadas por la comunidad del cerro Santa Cruz	59
Figura 53. Avance del flujo de tierra en la punta del movimiento	60
Figura 54. Represamiento causado por el flujo de tierra	61
Figura 55. Vivienda localizada cerca del flujo de tierra	61
Figura 56. Daños ambientales causados por el flujo de tierra	62
Figura 57. Esquema de deslizamientos de tipo traslacional y rotacional	63
Figura 58. Deslizamiento en la ladera del flanco izquierdo del movimiento en masa principal	64
Figura 59. Evidencias de deformaciones causadas por antiguos deslizamientos rotacionales	65
Figura 60. Afectación de la vía al cerro Santa Cruz por deslizamiento	66
Figura 61. Polígono digitalizado del deslizamiento reportado por Parra (1989)	67
Figura 62. Polígono digitalizado del deslizamiento cartografiado por Carvajal (2001)	68
Figura 63. Zonas que representan las características del actual movimiento en masa del cerro Santa Cruz	69
Figura 64. Estaciones de campo de medición de gases difusos en suelo	72
Figura 65. Área anómala con alta concentración de gas metano	73
Figura 66. Concentración de gas metano en (g/m ² d).	74
Figura 67. Concentración de dióxido de carbono en g/m ² d	75
Figura 68. Sistema para la recolección de gases	78
Figura 69. Cromatogramas de la muestra JCH-PE-05	78

Índice de tablas

Tabla 1. Registro de eventos naturales de origen geológico afectaron al municipio de Puerto Escondido	18
Tabla 2. Análisis de homogeneidad y consistencia para la estación CRISTO REY - AUT [12045020]	38
Tabla 3. Precipitación media anual y número de días con lluvia	42
Tabla 4. Precipitación acumulada y número de días con lluvia hasta el mes de mayo	43
Tabla 5. Aceleraciones registradas en el sismo del 24 de mayo de 2023 – mar Caribe	50
Tabla 6. Composición de los gases de volcanes de lodo en Colombia	70
Tabla 7. Especificaciones técnicas del sensor multigas	73
Tabla 8. Características fisicoquímicas de muestras de agua colectadas el 30 de mayo del 2023	76
Tabla 9. Concentraciones de aniones de muestras de agua colectadas el 30 de mayo del 2023 en mg/l	76
Tabla 10. Concentraciones de cationes de muestras de agua colectadas el 30 de mayo de 2023 en mg/l	77
Tabla 11. Muestras de gases colectadas el 31 de mayo del 2023	77
Tabla 12. Resultados composicionales muestras recolectadas	79
Tabla 13. Resultados composicionales ajustados mediante la eliminación de gases atmosféricos.	80