



**ANALISIS FINAL SOBRE EL
MECANISMO DE RUPTURA
DEL DESLIZAMIENTO EL
CURIO, SALITRAL, SANTA
ANA, SAN JOSE.**



recepcion@geotectica.com



8343-4204



www.geotectica.com



350 mts Sur del BCR. San Rafael
de Heredia. Código Postal 40504

REALIZADO PARA:
MUNICIPALIDAD DE SANTA ANA
MAYO, 2021

Heredia, Jueves 13 de mayo, 2021

GT-INF-2020-388-B

Señores
Municipalidad de Santa Ana

Atención:
Licda. Emilia Jiménez Jiménez, MSc.
Proceso de Gestión de Riesgo de Desastres

Estimados señores:

Mediante la siguiente nota quiero hacer constar que el presente estudio denominado “**ANÁLISIS FINAL SOBRE EL MECANISMO DE RUPTURA DEL DESLIZAMIENTO EL CURIO, SALITRAL, SANTA ANA, SAN JOSE.**” es responsabilidad profesional y autoría en su totalidad de nuestra empresa, como parte de la asesoría que se mantiene entregado al proceso de Gestión del Riesgo de Desastres para la atención de ciertas emergencias.

El estudio posee el objetivo de analizar el mecanismo de ruptura de la ocurrencia del deslizamiento en calle el Curio, en Salitral, Santa Ana. El informe se encuentra basado en los procedimientos y metodologías técnicas y profesionalmente conocidas y recomendadas por el Colegio de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica (CFIA), así como el Colegio de Geólogos de Costa Rica (CGCR), en manuales y reglamentos publicados.

Sin más que agradecerle y quedando a su entera disposición, se despide cordialmente.

Carlos Alonso Vargas Campos
Geólogo Geotecnista / Hidrogeólogo
Consultor
CGCR N° 271
SETENA CI 81-2002

Contenido

I.	INTRODUCCIÓN	3
•	Objetivo General	3
•	Objetivos específicos	3
•	Metodología	3
•	Sitio de Estudio	8
II.	MARCO CONCEPTUAL	9
•	Geología	9
•	Inspección del sitio.....	10
•	Mecanismo de ruptura	13
•	Estudios de refracción sísmica en el deslizamiento	14
•	Estimación de volumen y desplazamientos.....	22
III.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	23
IV.	REFERENCIAS	24

ANALISIS FINAL SOBRE EL MECANISMO DE RUPTURA DEL DESLIZAMIENTO EL CURIO, SALITRAL, SANTA ANA, SAN JOSE.

I. INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos son desplazamientos o desprendimientos de un sector de una masa de suelo o subsuelo, dado que, aunque los más típicos son los deslizamientos de la capa superficial de suelo, también se dan los movimientos de masas de roca o los mixtos que poseen separación de un sector de suelo y roca. Los deslizamientos se producen cuando el material, unido, se mueve a lo largo de una superficie de debilidad, la cual se conoce como superficie de ruptura. Los deslizamientos son una de las amenazas naturales más importantes para el ser humano y la infraestructura construida por el hombre. Estos aumentan su peligrosidad, mientras más saturado se encuentre el material, que es cuando pueden convertirse en flujos de lodo, detritos o escombros, por movimiento viscoso. Esto suele ocurrir cuando el deslizamiento ocurre cerca de un cuerpo de agua como ríos, quebradas o lagos o en episodios de lluvias extremas, y se puede agravar cuando el deslizamiento es provocado por un componente sísmico adicional.

El análisis de susceptibilidad de una zona a la ocurrencia de deslizamientos debe combinar una serie de variables, sosteniendo que las lluvias y los sismos son los disparadores de la mayoría de los deslizamientos. No obstante, la peligrosidad depende mucho de las zonas con más riesgo por la exposición de las distintas infraestructuras construidas por el ser humano, para lo cual es necesario el manejo del concepto de riesgo aceptable y la implementación de mapas de zonificación y adecuadas regulaciones.

- **Objetivo General**

Analizar las características geológicas específicas de un deslizamiento para determinar el mecanismo de ruptura y el potencial de desplazamiento del movimiento en Calle El Curio, Salitral, Santa Ana.

- **Objetivos específicos**

Efectuar una descripción de la geología regional y local en los alrededores del área de estudio.

Ejecutar un recorrido por el deslizamiento para establecer el comportamiento previo, durante el suceso y la posibilidad de un futuro desprendimiento.

Realizar una estimación del volumen de material desprendido y desplazado y el área de afectación de la misma.

- **Metodología**

Las actividades realizadas para lograr el objetivo del estudio consisten en búsqueda de información existente, visita de campo, mapeo local, creación de un modelo conceptual del suceso y la realización de perfiles topográficos y geofísicos del deslizamiento. La metodología del estudio geofísico se detalla a continuación.

Prospección geofísica

La prospección por refracción sísmica permite interpretar la estratigrafía del subsuelo gracias al uso del principio físico del fenómeno de la refracción total de una onda sísmica que incide sobre una interfase localizada entre dos cuerpos con diferentes propiedades mecánicas,

(horizonte de refracción). La condición fundamental para llevar a cabo estudios de sismica por refracción es que la sucesión de los estratos a investigar se caracterice por velocidades sísmicas crecientes al aumentar la profundidad. De este modo se pueden evaluar hasta 4 ó 5 horizontes de refracción diferentes.

Los ensayos se basan en la medición de los tiempos de recorrido de las ondas elásticas para las cuales, suponiendo amplias superficies de separación con respecto a la longitud de onda o en todo caso con una débil curvatura, los frentes de onda se representan por medio de los relativos rayos sísmicos. El análisis se basa en el principio de Fermat y en la ley de Snell.

El principio de Fermat establece que el rayo sísmico recorre la distancia entre la fuente y el receptor siguiendo el trayecto para el cual el tiempo empleado de recorrido es mínimo. En este principio, dado un plano que separa dos medios con diferentes características mecánicas, el rayo sísmico es el que se extiende a lo largo de un plano perpendicular a la interfase que contiene tanto la fuente como el receptor.

La ley de Snell es una fórmula que describe los tipos de refracción de un rayo sísmico en la transición entre dos medios caracterizados por diferentes velocidades de propagación de las ondas o, equivalentemente, por diferentes índices de refracción. El ángulo formado entre la interfase y el rayo se denomina ángulo de incidencia θ_i , mientras que el formado entre el rayo refractado y la superficie normal se denomina ángulo de refracción θ_r . La fórmula matemática es:

$$v_2 \sin \theta_i = v_1 \sin \theta_r$$

Donde v_1 y v_2 son las velocidades de los dos medios separados por la interfase.

Cuando $v_1 > v_2$ se tiene que $\theta_i > \theta_r$ y por lo tanto la sismica por refracción nos es factible ya que el rayo refractado se inclinaría hacia abajo. Cuando $v_1 < v_2$ se tiene que $\theta_i < \theta_r$ y existe un ángulo crítico de incidencia por lo que $\theta_r = 90^\circ$ y el rayo refractado viaja paralelamente a la interfase. La expresión que define el ángulo crítico es:

$$\theta_i = \arcsin(v_1 / v_2)$$

La forma más sencilla de analizar los datos de refracción es construyendo un gráfico tiempo-distancia cuyo origen corresponda a la fuente de generación de las ondas elásticas. En el eje de las abscisas se representan las posiciones de los geófonos y en las ordenadas los tiempos de primera llegada. A los geófonos más cercanos a la fuente llegan primero los impulsos que han seguido el recorrido directo en un tiempo T dado por la relación.

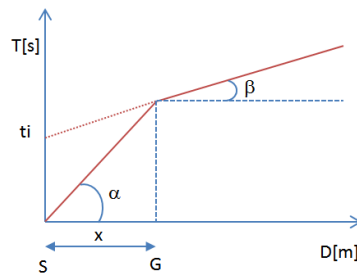
$$T = x_i / V_1$$

Donde x_i es la distancia entre el punto de disparo y el punto de detección.

La ecuación anterior representa una recta que pasa por el origen de los ejes tiempos-distancias y su coeficiente angular permite calcular la velocidad V_1 del primer medio como.

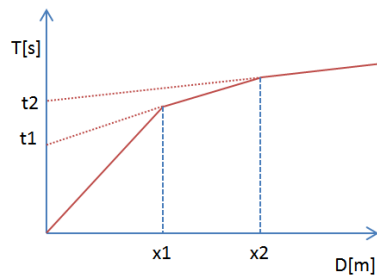
$$V_1 = 1 / \tan \alpha$$

Los tiempos de llegada de los rayos refractados en el diagrama tiempos-distancias se disponen según una recta que tendrá una inclinación menor a la de las ondas directas.



La curva tiempos-distancias tiende a un comportamiento regular según una polilínea cuyos vértices se denominan codos, los cuales representan, físicamente, la condición donde se da la llegada contemporánea de las ondas directas y la refractadas. Por lo tanto, para cada uno de los segmentos se determina el tiempo de retraso t_i que representa la diferencia entre el tiempo que el rayo sísmico emplea en recorrer un tramo a la velocidad propia del estrato en el cual se transmite y el tiempo que emplearía para viajar a lo largo del componente horizontal de ese tramo a la máxima velocidad alcanzada en toda la trayectoria de refracción.

Gráficamente el tiempo de retraso está dado por la intersección de la recta que comprende un segmento de la curva tiempo-distancia con el eje de los tiempos.

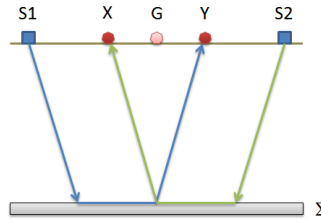


Entonces, conociendo los tiempos t_i es posible obtener los espesores de los refractores mediante la relación:

$$h_{(i-1)} = \frac{V_{(i-1)}V_i}{2\sqrt{V_i^2 - V_{(i-1)}^2}} \left(t_i - \frac{2h_1\sqrt{V_i^2 - V_1^2}}{V_1V_i} - \dots - \frac{2h_{(i-2)}\sqrt{V_i^2 - V_{(i-2)}^2}}{V_1V_{(i-2)}} \right)$$

En situaciones morfológicamente complejas, como método de elaboración se puede utilizar el Método de reciprocidad generalizada (Generalized Reciprocal Method) examinado por Palmer en 1980.

Este método se basa en la búsqueda de una distancia virtual XY entre geófonos tal que los rayos sísmicos que parten de puntos de disparo simétricos respecto al tendido, lleguen al geófono colocado en la posición X y al colocado en la posición Y, proviniendo desde un mismo punto del refractor.

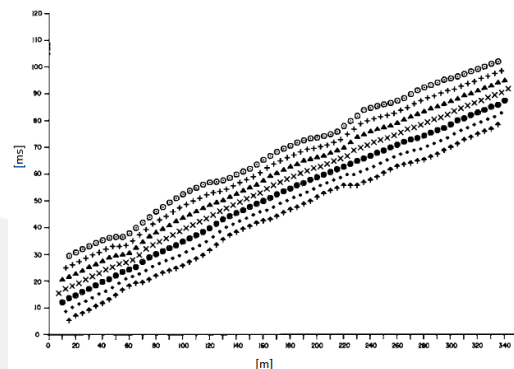


El primer paso operativo es construir un diagrama tiempos-distancias identificando en los sismogramas obtenidos con los datos de campo, las primeras llegadas de las ondas sísmicas.

Para determinar la distancia óptima XY es necesario considerar varios puntos de disparo, tanto de los extremos como del interior del tendido. Esto hace posible identificar con más precisión los tiempos relativos de un mismo refractor que sirven para caracterizar las dromocronas, las cuales son fundamentales para la interpretación. En las interpretaciones multi estratos, para generar las dromocronas se puede aprovechar las técnicas de phantoming y así superar la falta de datos de algunos refractores.

Partiendo de la construcción de las dromocronas es posible determinar la función velocidad según la ecuación:

$$T_v = \frac{T_{S_1Y} - T_{S_2X} + T_{S_1S_2}}{2}$$



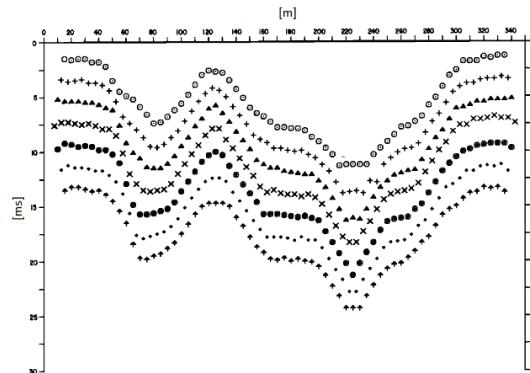
Donde TS1Y y TS2X son los tiempos de recorrido de los rayos sísmicos para llegar, respectivamente, de la fuente S1 a X y de la fuente S2 a Y, mientras que TS1S2 es el tiempo de recorrido entre dos puntos de disparo S1 y S2, externamente simétricos con respecto al tendido. Tv es el tiempo calculado en un geófono G puesto entre X y Y, no necesariamente coincidente con la posición de un geófono del tendido.

El cálculo de la función Tv se lleva a cabo para cada valor de XY comprendido entre cero y la mitad del tendido con variación igual a la distancia real entre los geófonos del tendido. La mejor recta de regresión de las funciones de velocidad obtenidas, permite determinar el XY óptimo y la velocidad del refractor que se obtiene del coeficiente angular.

Mediante la función tiempo-profundidad es posible encontrar la profundidad del refractor expresada en unidad de tiempo. Dicha función se expresa con:

$$T_G = \frac{T_{S_1Y} + T_{S_2X} - \left(T_{S_1S_2} + \frac{XY}{V_n} \right)}{2}$$

Donde V_n es la velocidad del refractor.



De la misma manera que con la función velocidad, se determinan varias funciones tiempo-profundidad para el conjunto de los valores XY en estudio. Entre las funciones encontradas, la que presente la mayor articulación compete al valor óptimo de XY .

Finalmente, es posible determinar el espesor del refractor en las correspondientes posiciones de los geófonos G mediante la relación:

$$h = T_G \sqrt{\frac{V_n XY}{2T_G}}$$

h representa la profundidad mínima desde el geófono G por lo tanto la morfología del refractor se define con la envolvente de las semicircunferencias de radio h .

Una de las principales ventajas del G.R.M. es que el factor de conversión de la profundidad es relativamente insensible a las pendientes hasta aproximadamente 20° .

- **Sitio de Estudio**

El sector de estudio corresponde con un deslizamiento ocurrido el jueves 5 de noviembre del presente en calle el Curio en Salitral de Santa Ana, San José. Cartográficamente, se localiza en la hoja Abra del Instituto Geográfico Nacional (IGN) a escala 1:50 000. El sitio de estudio se trata de un sector que presenta un deslizamiento y los alrededores del mismo.

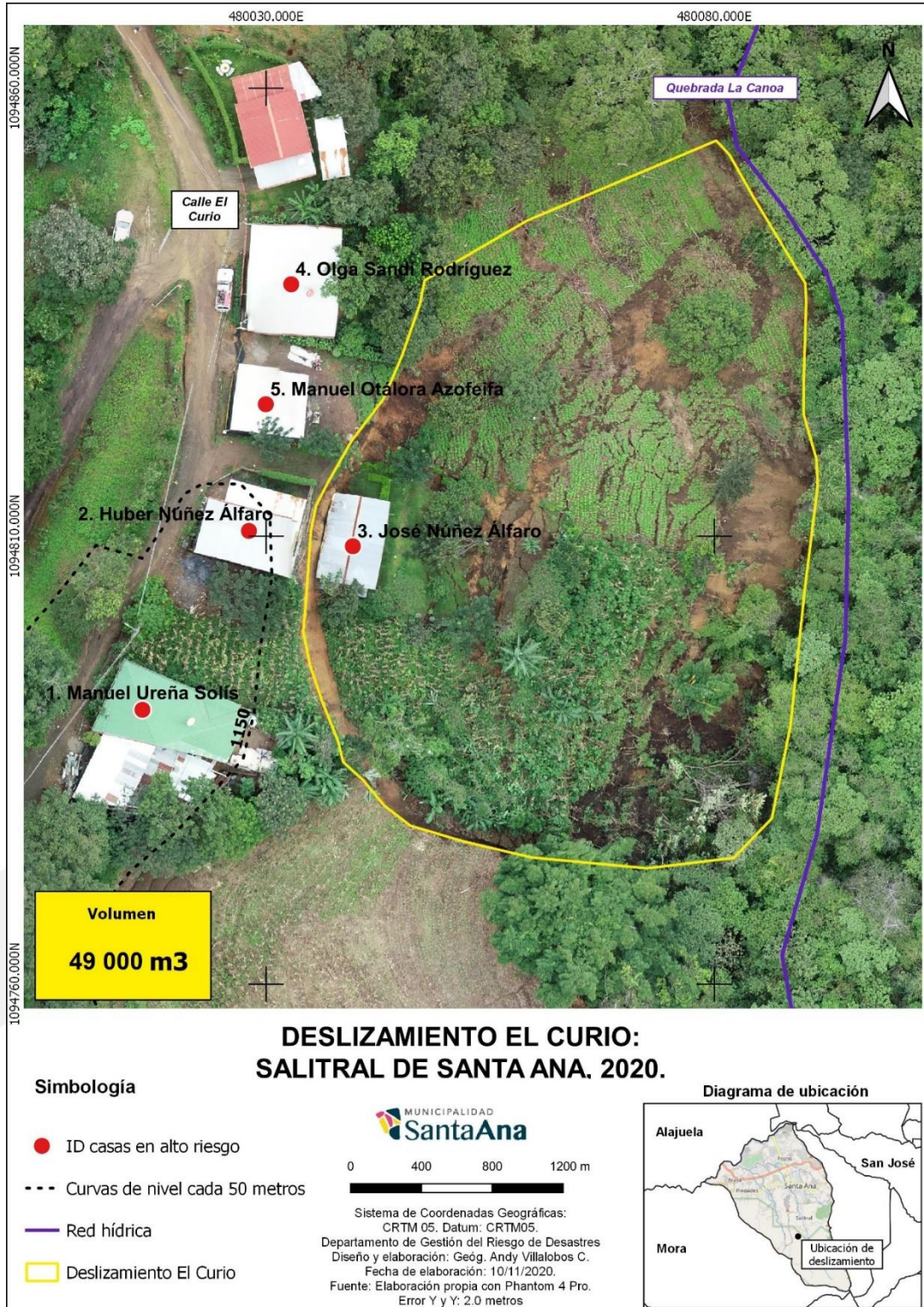


Figura N°1. Ubicación del sitio del proyecto. Fuente: Villalobos, 2020.

II. MARCO CONCEPTUAL

- **Geología**

La geología del área de estudio se encuentra constituida por materiales de los periodos Terciario y Cuaternario, predominando las rocas sedimentarias, de acuerdo con Denyer y Arias (1991), el sitio de estudio se localiza en un sector del Valle Central con una secuencia constitutiva que inicia en la parte inferior con la Formación Pacacua (Figura N° 2).

La formación Pacacua escrita como una secuencia de volcanoclastitas de granulometría diversa dispuestas como estratificaciones decimétricas hasta métricas de areniscas volcanoclasticas finas, gruesas y guijarrosas; además se asocian con esta formación tobas, tobitas y brechas finas y gruesas. Los colores predominantes de estas rocas son rojos y morados, aunque el verde es llamativo apareciendo aisladamente.

En la base del deslizamiento, en la margen izquierda del cauce de la Quebrada La Canoa, se localizan una arenisca gris oscuro densa ligeramente alterada y fracturada (Foto N°1), mientras que la cobertura sobre esta roca se trata de la misma arenisca muy fracturada y meteorizada hasta constituir un perfil del suelo compuesto por una capa de limo arcilloso plástico rojizo y el suelo orgánico.

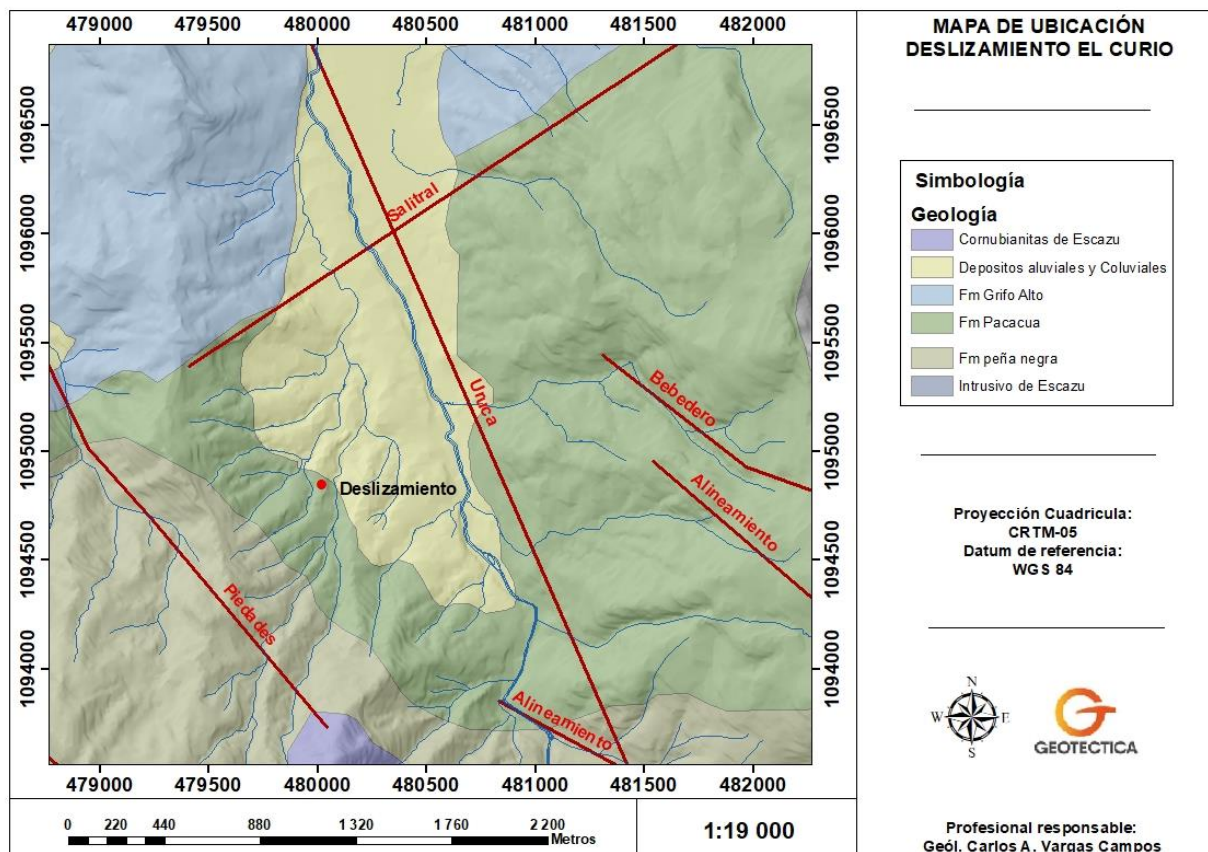


Figura N°2. Mapa geológico. Elaboración propia.



Fotografía N°1. Afloramiento de arenisca gris densa ligeramente alterada y fracturada. Fuente propia.

- **Inspección del sitio**

Se ha efectuado un recorrido dentro del deslizamiento y sus alrededores, el día sábado 7 de noviembre, dos días posteriores al suceso, para lograr determinar el motivo y el mecanismo de ruptura del movimiento. La presencia de varios sectores blocosos con evidente saturación y en condición de flujo manifiestas que la saturación provocada por las lluvias generadas por la tormenta ETA son las que han influenciado el deslizamiento.



Fotografía N°2. Flujos de detritos empujados hacia la quebrada. Fuente propia.

La presencia de pequeños sectores de flujo de la capa de roca triturada y brechificada (Foto N°3) en el frente del deslizamiento, demuestran que el sector intermedio de la columna estratigráfica presentaba una saturación importante por la presencia de un flujo de agua subsuperficial. Por otro lado, sectores con influjo (Foto N°4) a partir de los flujos de detrito del talud frontal del deslizamiento, indican que la saturación fue más que elevada y posterior al movimiento y se generó un drenaje y descompresión de la masa deslizada.



Fotografía N°3. Sector de flujo licuado de la capa de roca triturada. Fuente propia.



Fotografía N°4. Sector de influjo de los flujos de detritos. Fuente propia.

La presencia de los bloques de suelo orgánico superficial de gran tamaño con grietas abiertas y levantadas (Foto N°5) es un indicativo de que el mayor movimiento y la pérdida de cohesión se generó en la capa inferior. El tamaño de las grietas y su levantamiento demuestran un volteo con movimiento hacia la quebrada (foto N°6) de tal manera que es claro que el flujo de agua subsuperficial creó un lavado de partículas de la capa de roca brechificada y una presión de poro que finalizó por empujar la punta más descomprimida de la capa hacia la quebrada de tal manera que el vacío inició el plano de ruptura que alcanzó la superficie del terreno.



Fotografía N°5. Bloques de suelo orgánico superficial de gran tamaño. Fuente propia.



Fotografía N°6. Grietas abiertas y bloques de suelo volteados. Fuente propia.

A pesar de la existencia de un meandro de muy fuerte ángulo dentro de la quebrada exactamente en el sector donde se encuentra el vórtice de origen del deslizamiento, no se pudo comprobar que el socavamiento de la pared del talud tuviese alguna influencia en la ocurrencia del deslizamiento (Foto N°7). No obstante, este es un factor que debe ser tomado muy en cuenta, dado que la caída de material en este sector puede exponer a la quebrada a una obturación completa que inicie un represamiento que termine con la ruptura de una laguna y un flujo de lodos.

Por otro lado, la caída de árboles en el propio cauce de la quebrada Canoas (Foto N°8) es un elemento que debe ser corregido para evitar el represamiento y la posibilidad de ruptura de una laguna y un flujo de lodos.



Fotografía N°7. Meandro de la quebrada exactamente en el vórtice del deslizamiento. Fuente propia.



Fotografía N°8. Uno de los sectores donde cayeron árboles al cauce. Fuente propia.

- **Mecanismo de ruptura**

La saturación generada por las precipitaciones de la semana del 2 al 7 de noviembre por la influencia del Huracán ETA, generaron una condición de recarga directa y lateral de un flujo subsuperficial, dentro de la capa de arenisca brechificada muy fracturada (Figura N°3) que en tramos se puede describir como roca completamente triturada. Esta saturación de agua en movimiento generará un aumento de la presión de poro del material de esta capa provocando flujos de detritos conformados por muchos bloques de tamaño centimétricos que se dispersan haciendo un punto.

- **Estudios de refracción sísmica en el deslizamiento**

Para el deslizamiento de la calle Curio se realizan dos perfiles sísmicos de las líneas sísmicas A-A' con rumbo casi norte-sur y B-B' con rumbo noroeste-sureste, la orientación de los perfiles es observable en la figura 3, estos estudios se realizaron la fecha del 01/03/2021.

El método de refracción sísmica en forma resumida se realiza colocando distintos sensores sísmicos (geófonos) en el lugar deseado los cuales captan las señales sísmicas que se generan de forma artificial al golpear el suelo con un objeto (comúnmente un mazo), esto permite medir las velocidades de las ondas sísmicas con lo cual se interpretan distintas capas diferenciadas por esas velocidades, así se pueden interpretar espesores aparentes de los materiales geológicos.

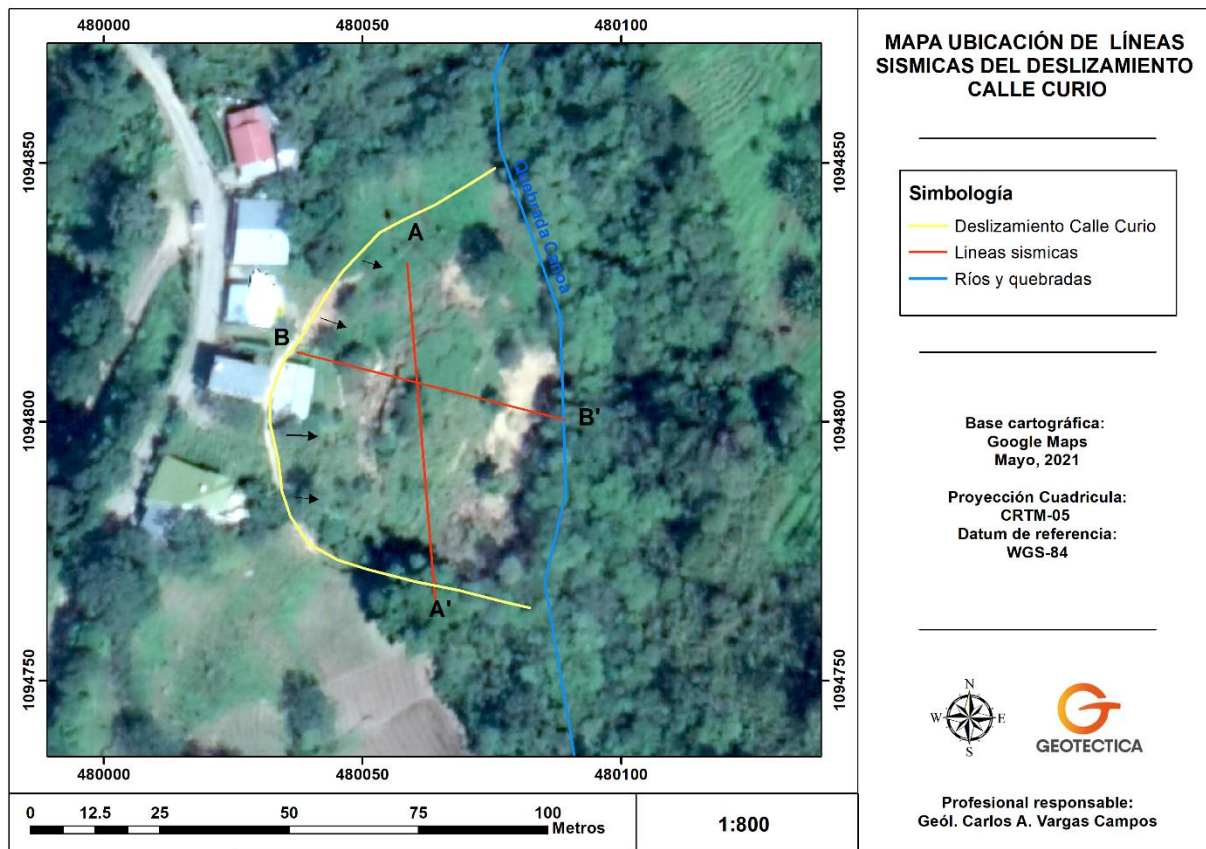


Figura N°3. Ubicación de las líneas sísmicas realizadas. Elaboración propia.

El arreglo de los geófonos utilizados para la realización del perfil A-A' se describe en el cuadro 1 donde se detalla la distancia vertical y diferencia de altura (z) entre ellos. Por otro lado, los cuadros 2, 3 y 4 detallan los tiempos de arribo de las ondas sísmicas a los geófonos a causa de los impactos que originan las señales sísmicas requeridas para el ensayo.

Cuadro N°1. Distribución de los geófonos receptores del perfil A-A'. Elaboración propia.

	Posición X [m]	Posición Z [m]
1	0.0	-3.0
2	5.0	-2.0
3	10.0	-1.0
4	15.0	0.0
5	20.0	1.0

6	25.0	2.0
7	30.0	2.0
8	35.0	2.0
9	40.0	1.0
10	45.0	0.0
11	50.0	-1.0
12	55.0	-2.0

Datos de impactos

Impacto 1

Posición fuente X	-5 [m]
Posición fuente Z	0 [m]

Cuadro N°2. Datos de impacto 1 para el perfil A-A'. Elaboración propia.

Posición geófono [m]	Tiempo [ms]
0.0	21.3303
5.0	57.8965
10.0	95.9863
15.0	130.2671
20.0	149.3120
25.0	181.3075
30.0	205.6849
35.0	233.8714
40.0	250.6309
45.0	266.6286
50.0	273.4848
55.0	280.3410

Impacto 2

Posición fuente X	28 [m]
Posición fuente Z	0 [m]

Cuadro N°3. Datos de impacto 2 para el perfil A-A'. Elaboración propia.

Posición geófono [m]	Tiempo [ms]
0.0	121.8874
5.0	115.7930
10.0	95.9863
15.0	73.1324
20.0	38.0898
25.0	11.4269
30.0	10.6651
35.0	41.8988
40.0	69.3234
45.0	92.9391
50.0	116.5548
55.0	123.4110

Impacto 3

Posición fuente X 60 [m]
 Posición fuente Z 0 [m]

Cuadro N°4. Datos de impacto 3 para el perfil A-A'. Elaboración propia.

Posición geófono [m]	Tiempo [ms]
0.0	279.5792
5.0	272.7230
10.0	267.3904
15.0	255.2017
20.0	236.1568
25.0	217.8737
30.0	195.0198
35.0	175.2131
40.0	140.1705
45.0	115.0312
50.0	83.7976
55.0	38.0898

Por su parte, la figura 4 muestra el diagrama de dromocronas elaboradas para el perfil A-A' que es esencial para determinar los tiempos de llegada de las ondas sísmicas refractadas por el método de investigación empleado.

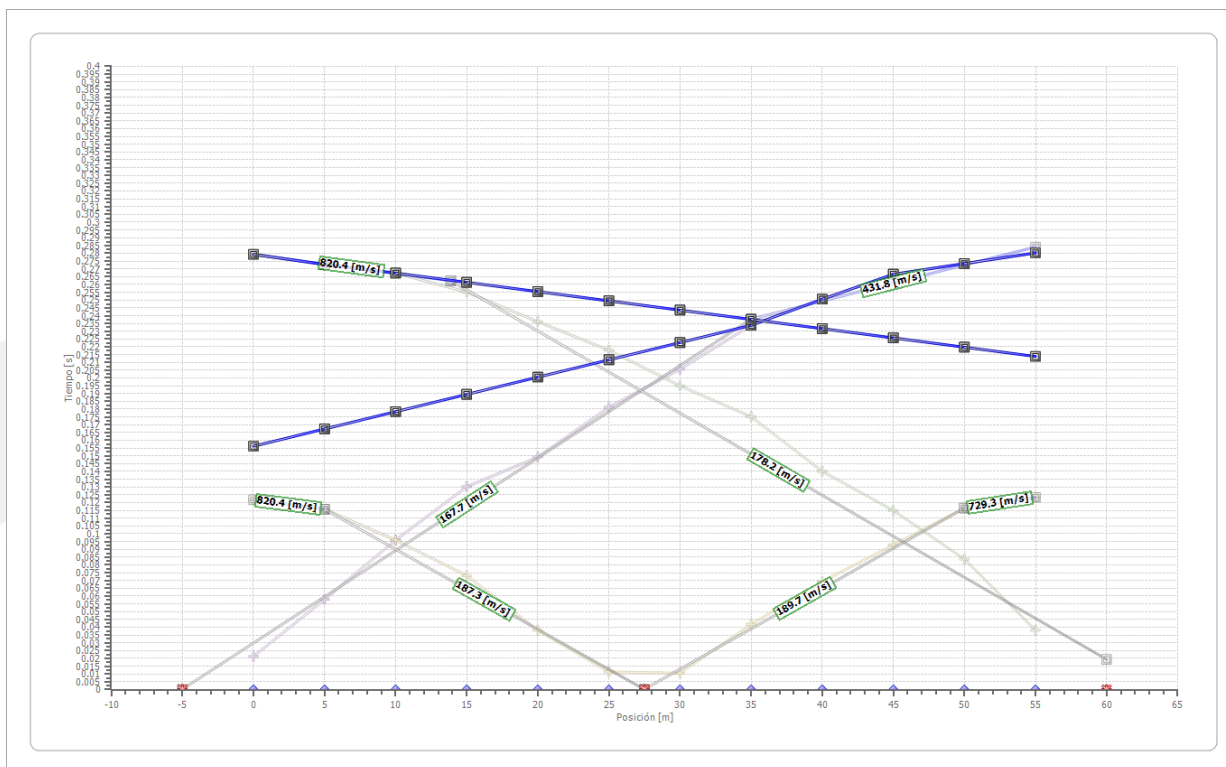


Figura N°4. Dromocronas elaboradas para el perfil B-B'. Fuente propia. Elaboración propia.

Finalmente con la información obtenida se realiza una interpretación de las distintas capas que componen el deslizamiento de calle Curio, en el cuadro 5 se presenten los espesores de la capas interpretadas que sirven de base para la confección del perfil interpretativo con el método G.R.M. de la figura 5, en este deslizamiento se identifican dos capas diferenciadas por las velocidades de onda.

**Cuadro N°5. Espesores de la capa superior según cada geófono para el perfil B-B'.
Elaboración propia.**

	Estrato n. 1	Estrato n. 2
G= 0.0 [m]	13.8	--
G= 5.0 [m]	14.3	--
G= 10.0 [m]	14.8	--
G= 15.0 [m]	15.3	--
G= 20.0 [m]	15.8	--
G= 25.0 [m]	16.3	--
G= 30.0 [m]	16.8	--
G= 35.0 [m]	17.3	--
G= 40.0 [m]	18.3	--
G= 45.0 [m]	19.3	--
G= 50.0 [m]	19.3	--
G= 55.0 [m]	19.4	--
Velocidad [m/sec]	180.7	566.2
Descripción		

En la figura 5, con las velocidad de onda que derivan profundidades de estratos por cada geófono, se interpretan dos capas, la primera de color morado posee una velocidad de onda de 180.7 m/s, la cual se relaciona con los materiales superiores que sufrieron deformación y trituración por el movimiento de los materiales, mientras que la capa gris se interpreta como el basamento del lugar, relacionado con una arenisca gris ligeramente fracturada cuyas mejores condiciones permiten que la velocidad de onda alcance valores de 566.20 m/s, la diferencia de velocidad refleja claramente las condiciones de ambos tipos de materiales.

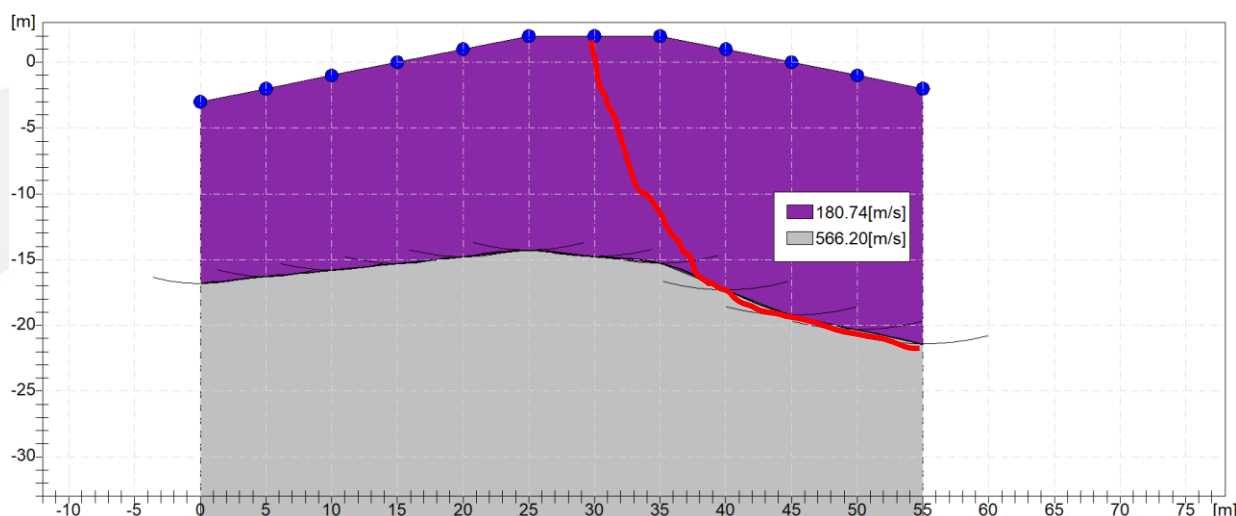


Figura N°5. Perfil A-A' para el deslizamiento calle Curio. La línea roja identifica una de las zonas de ruptura. Fuente: Elaboración propia.

Cuadro N°6. Otros parámetros geotécnicos determinados para las capas del perfil B-B'. Elaboración propia.

	Estrato n. 1	Estrato n. 2
Coeficiente Poisson	0.35	0.35
Densidad [kg/m ³]	1800.00	1800.00
Vp [m/s]	180.74	566.20
Vs [m/s]	86.82	271.99
G0 [MPa]	13.57	133.16
Ed [Mpa]	58.80	577.04
M0 [MPa]	45.23	443.88
Ey [Mpa]	36.64	359.54

G0: Módulo de deformación al corte;

Ed: Módulo edométrico;

M0: Módulo de compresibilidad volumétrica;

Ey: Módulo de Young;

El arreglo de los geófonos utilizados para la realización del perfil B-B' se describe en el cuadro 7 donde se detalla la distancia vertical y diferencia de altura (z) entre ellos. Por otro lado, los cuadros 8, 9 y 10 detallan los tiempos de arribo de las ondas sísmicas a los geófonos a causa de los impactos que origina la señal sísmica.

Cuadro N°7. Distribución de los geófonos receptores del perfil B-B'. Elaboración propia.

	Posición X [m]	Posición Z [m]
1	0.0	2.0
2	5.0	2.0
3	10.0	1.0
4	15.0	1.0
5	20.0	0.0
6	25.0	0.0
7	30.0	-1.0
8	35.0	-2.0
9	40.0	-2.0
10	45.0	-3.0
11	50.0	-4.0
12	55.0	-4.0

Datos de impactos

Impacto 1

Posición fuente X -5 [m]

Posición fuente Z 0 [m]

Cuadro N°8. Datos de impacto 1 para el perfil B-B'. Elaboración propia.

Posición geófono [m]	Tiempo [ms]
0.0	21.3303
5.0	37.3280

10.0	57.8965
15.0	79.9886
20.0	112.7458
25.0	135.5997
30.0	161.5008
35.0	185.8782
40.0	207.9703
45.0	234.6332
50.0	249.8691
55.0	253.6781

Impacto 2

Posición fuente X 28 [m]
Posición fuente Z 0 [m]

Cuadro N°9. Datos de impacto 2 para el perfil B-B'. Elaboración propia.

Posición geófono [m]	Tiempo [ms]
0.0	90.6537
5.0	79.2268
10.0	57.8965
15.0	37.3280
20.0	30.4718
25.0	11.4269
30.0	9.9033
35.0	23.6157
40.0	36.5662
45.0	56.3729
50.0	92.9391
55.0	124.9346

Impacto 3

Posición fuente X 60 [m]
Posición fuente Z 0 [m]

Cuadro N°10. Datos de impacto 3 para el perfil B-B'. Elaboración propia.

Posición geófono [m]	Tiempo [ms]
0.0	189.6872
5.0	188.1636
10.0	173.6895
15.0	155.4064
20.0	131.0289
25.0	108.9368
30.0	98.2717
35.0	78.4650
40.0	57.1347
45.0	41.8988
50.0	29.7100
55.0	16.7595

Por su parte, la figura 6 muestra el diagrama de dromocronas elaboradas para el perfil B-B' que son esenciales para determinar los tiempos de llegada de las ondas sísmicas refractadas por el método de investigación empleado.

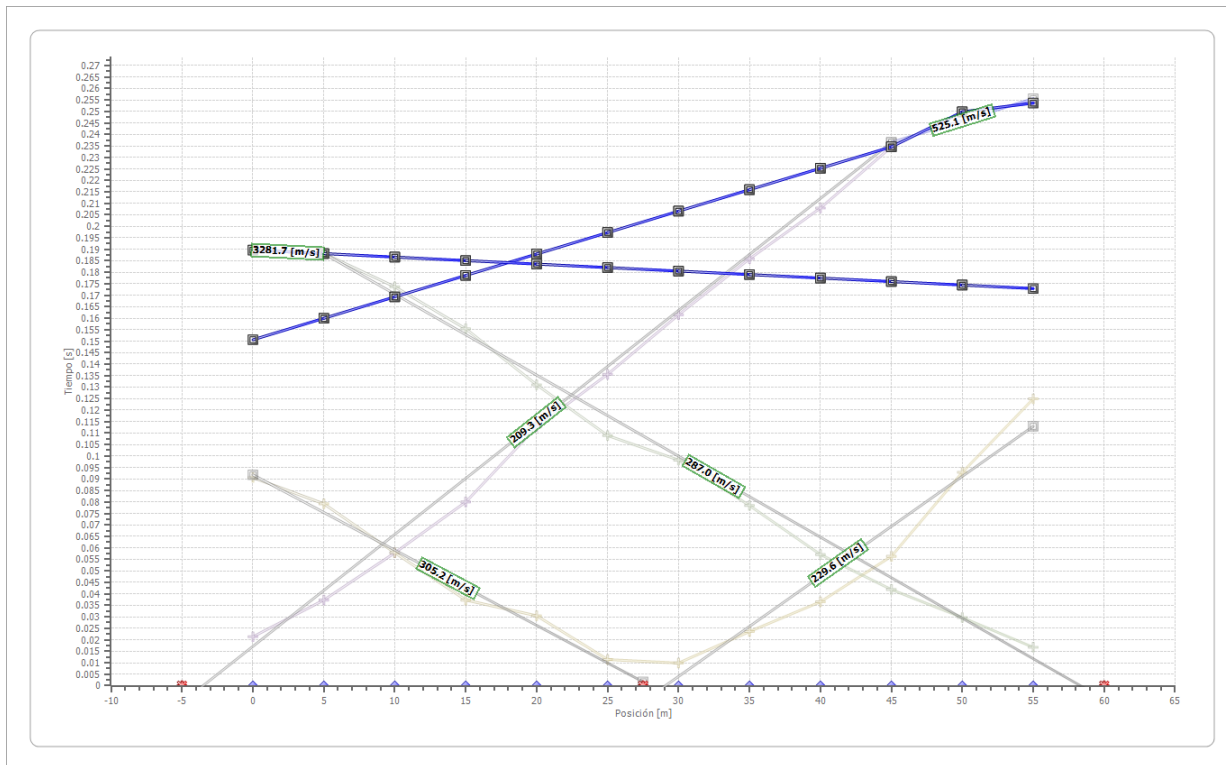


Figura N°6. Dromocronas elaboradas para el perfil B-B'. Fuente propia. Elaboración propia.

Finalmente con la información obtenida se realiza una interpretación de las distintas capas que componen el deslizamiento de calle Curio, en el cuadro 11 se presentan los espesores de las capas interpretadas que sirven de base para la confección del perfil interpretativo con el método G.R.M. de la figura 6, en este deslizamiento se identifican dos capas diferenciadas por las velocidades de onda.

Cuadro N°11. Espesores de la capa superior según cada geófono para el perfil B-B'. Elaboración propia.

	Estrato n. 1	Estrato n. 2
G= 0.0 [m]	15.1	--
G= 5.0 [m]	16.1	--
G= 10.0 [m]	17.2	--
G= 15.0 [m]	18.2	--
G= 20.0 [m]	19.3	--
G= 25.0 [m]	20.3	--
G= 30.0 [m]	21.4	--
G= 35.0 [m]	22.4	--
G= 40.0 [m]	23.5	--
G= 45.0 [m]	24.5	--
G= 50.0 [m]	26.4	--
G= 55.0 [m]	26.7	--
Velocidad [m/sec]	257.8	904.5
Descripción		

En la figura 6, con las velocidad de onda que derivan profundidades de estratos por cada geófono, se interpretan nuevamente dos capas, la primera de color morado posee una velocidad de onda de 257.77 m/s, la cual se relaciona con los materiales superiores que sufrieron deformación y trituración por el movimiento de los materiales, mientras que la capa gris se interpreta como el basamento del lugar relacionado con una arenisca gris ligeramente fracturada cuyas mejores condiciones permiten que la velocidad de onda alcance valores de 904.49 m/s, la diferencia de velocidad refleja claramente las condiciones de ambos tipos de materiales.

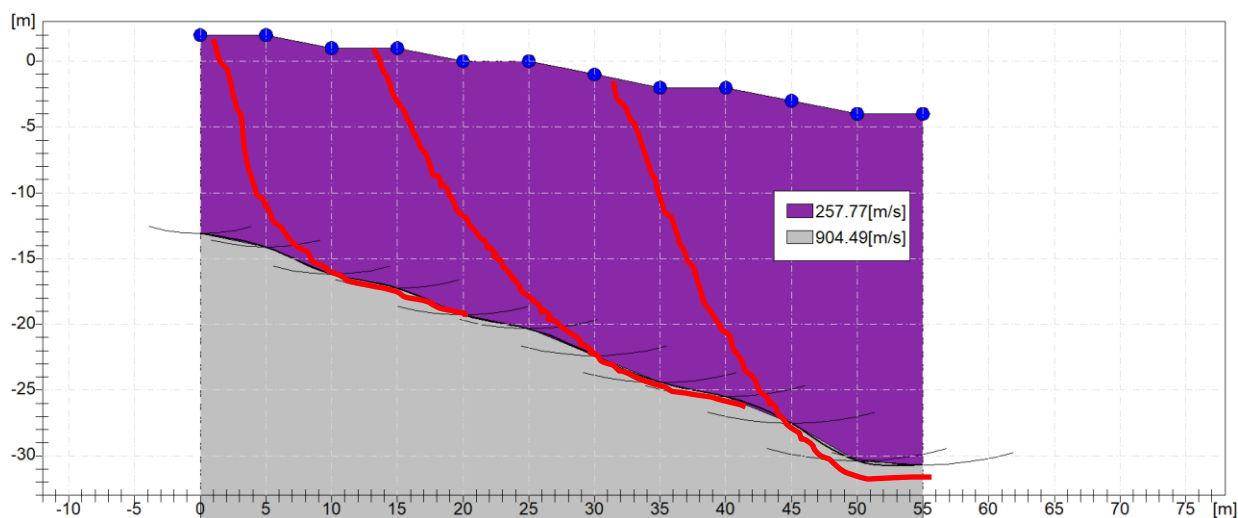


Figura N°7. Perfil B-B' para el deslizamiento calle Curio. Fuente propia.

Cuadro N°12. Otros parámetros geotécnicos determinados para las capas del perfil B-B'. La línea roja identifica una de las zonas de ruptura. Fuente: Elaboración propia.

	Estrato n. 1	Estrato n. 2
Coefficiente Poisson	0.35	0.35
Densidad [kg/m ³]	1800.00	1800.00
Vp [m/s]	257.77	904.49
Vs [m/s]	123.83	434.50
G0 [MPa]	27.60	339.82
Ed [Mpa]	119.60	1472.57
M0 [MPa]	92.00	1132.74
Ey [Mpa]	74.52	917.52

G0: Módulo de deformación al corte;
 Ed: Módulo edométrico;
 M0: Módulo de compresibilidad volumétrica;
 Ey: Módulo de Young;

Tras comparar los resultados de ambos perfiles sísmicos, se concluye en que el deslizamiento de calle El Curio posee dos capas bien definidas por diferencia de velocidades de las ondas sísmicas refractadas y espesores de capas medidas con el método.

El límite de ambas capas se da posiblemente por la superficie de ruptura del deslizamiento que aprovechó la diferencia entre las condiciones mecánicas de la arenisca ligeramente fracturada y las capas superiores que se identificaron en las visitas de campo como areniscas brechificadas muy fracturadas, limo arcilloso rojizo y la pasa de suelo orgánico superior derivadas de la meteorización de la roca madre.

El metodo requiere cambios marcados en las velocidades de onda para mostrar las diferentes capas, esto quiere decir que el comportamiento de todas las capas superiores no es tan deferente como para mostrar los limites entre los materiales, es por esto que se agrupan y se separan de la capa inferior considerada como basamento de la sección.

Aún así en la figura 8 se presenta un perfil geologico esquemático que complementa los estudios de refracción sísmica con las observaciones de campo.

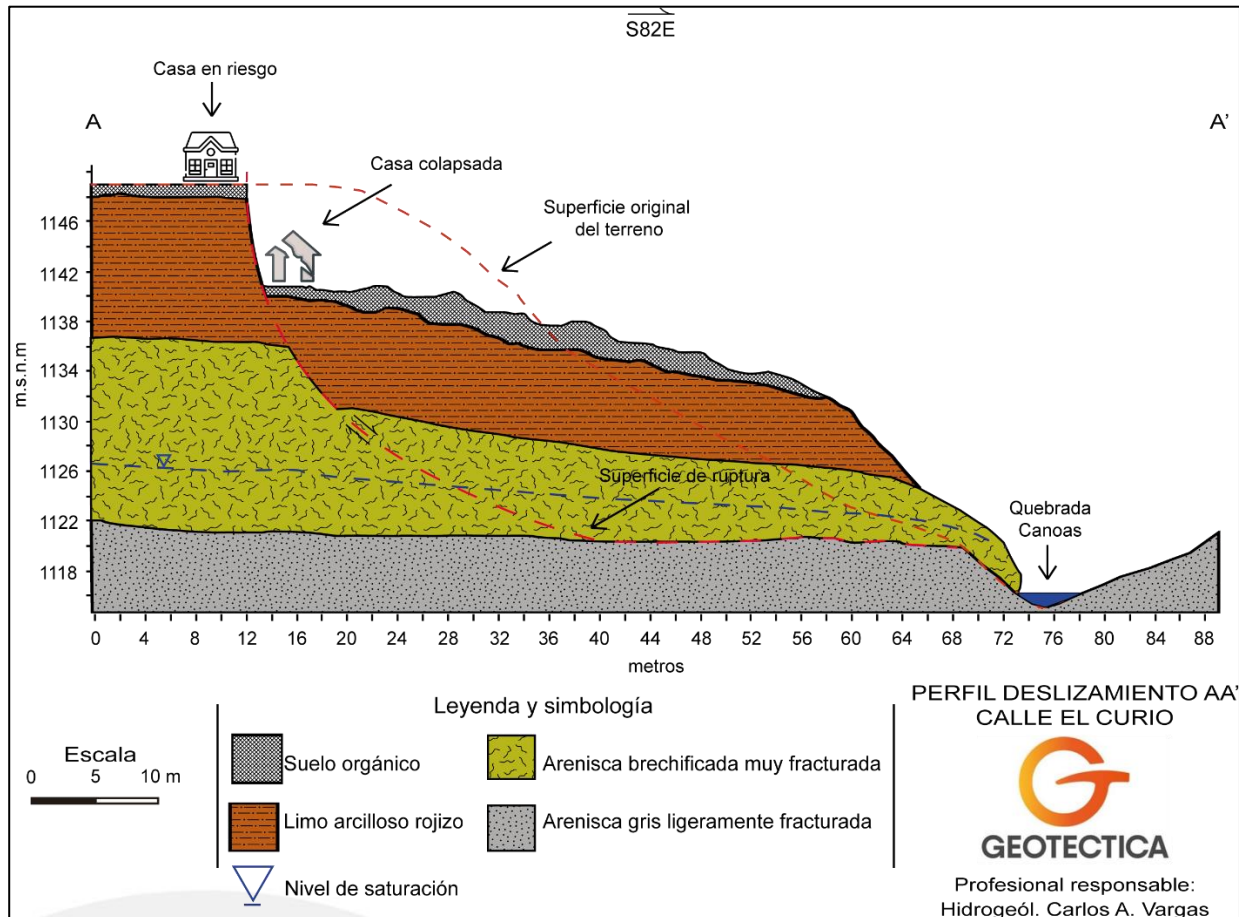


Figura N°8. Perfil geológico esquemático explicativo del origen de deslizamiento. Elaboración propia.

Se trata de un deslizamiento rotacional típico en forma de herradura con un basculamiento por subsidencia, originado en la existencia de un flujo de agua subsuperficial creado por recarga directa de las precipitaciones originadas por el Huracán ETA y empujes laterales por el flujo de agua dentro de una capa de roca brechificada y triturada que formó flujos de lodo en el frente del talud en la margen izquierda de la quebrada Canoas.

- **Estimación de volumen y desplazamientos**

Se ha efectuado una estimación del volumen del deslizamiento por medio del método de medio elipsoide con una longitud de 85 m, un ancho de 63 m y una altura de 35 m, se obtiene volumen aproximado de 49 000 m³. Aun así, se considera que el deslizamiento se encuentra drenando el agua, por lo que los desplazamientos del mismo no se darán excepto que, se disparen las lluvias y el flujo de agua subsuperficial aumento su caudal.

III. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- El sector de estudio se trata de un deslizamiento de localizado en la zona conocida como calle el Curio en Salitral de Santa Ana en la margen izquierda de la quebrada Canoas.
- La geología regional indica la existencia en los alrededores del sitio de la formación Pacacua, la cual permanentemente se encuentra asociada a la ocurrencia de deslizamientos.
- Localmente, aparece una arenisca gris fracturada en la margen izquierda de la quebrada Canoas, en la base del talud deslizado. Este basamento rocoso de arenisca está cubierto por una secuencia de arenisca brechificada muy fracturada, un limo arcilloso rojizo anaranjaduzco y un suelo orgánico.
- El análisis de geofísica confirma la presencia de la zona de ruptura debajo del deslizamiento, la cual se puede inestabilizar por la activación del flujo de agua subsuperficial, que, aunque en este momento se encuentre inactivo en otro episodio de fuertes lluvias que sobre pase los 120 mm de agua acumulada continua, podría generar un nuevo empuje hacia la quebrada Canoas.
- Se trata de un deslizamiento rotacional típico en forma de herradura con un basculamiento profundo, originado en la existencia de un flujo de agua subsuperficial creado por recarga directa de las precipitaciones originadas por el Huracán ETA y empujes laterales por el flujo de agua dentro de una capa de roca brechificada y triturada que formó flujos de lodo en el frente del talud en la margen izquierda de la quebrada Canoas; lo que generó flujos de detritos que descomprimieron toda la masa y finalizaron con la superficie de ruptura y el colapso de una edificación y otras tres en riesgo.
- Se ha efectuado una estimación del volumen del deslizamiento por medio del método de medio elipsoide con una longitud de 85 m, un ancho de 63 m y una altura de 35 m, para obtener un aproximado de 49 000 m³. Sin embargo, no se logra descartar una posible progresión de la corona del deslizamiento hacia la calle.

Recomendaciones

- Se debe hacer una limpieza de los árboles y material vegetal que ha caído al cauce de la quebrada Canoas para evitar un posible represamiento, en futuras condiciones de arrastre de sedimentos u otra clase de material en el cauce.
- Se debe mantener vigilancia en periodos de lluvia por desprendimientos que se generen en el frente del deslizamiento que puedan obturar el cauce la quebrada Canoas.
- Las casas 1 y 4, pueden ser habitadas siempre que se genere un sistema de alerta que promueva el desalojo de la vivienda cada vez que la estación meteorológica del cerro Chitaria, marque un acumulado continuo mayor a 120 mm. Se debe declarar inhabitable las casas localizadas al borde de la corona del deslizamiento (casas 2 y 5) y la casa N°3 debe ser demolida.
- Se debe ampliar la investigación de fenómenos similares que puedan afectar otros tramos de la calle El Curio y otros sectores susceptibles a la ocurrencia de deslizamientos.

IV. REFERENCIAS

DENYER, P. & ARIAS, O., 1991: Estratigrafía de la Región Central de Costa Rica.- Rev. Geol. Amér. Central, 12: 1-59.