

Informe Técnico N° A6837

EVALUACIÓN GEOLÓGICA Y GEODINÁMICA DEL DESLIZAMIENTO ACTIVO DE SUPAYHUAYCO

Región Cusco
Provincia Quispicanchis
Distrito Lucre



BRIANT GARCÍA FERNÁNDEZ BACA
EDU TAIPE MAQUERHUA
LUIS ALBINEZ BACA
PERCY MEZA CABRERA

OCTUBRE
2018

 SECTOR ENERGÍA Y MINAS
INGEMMET
INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO

INDICE

1. INTRODUCCION	3
2. GENERALIDADES	4
2.1 Antecedentes y trabajos previos	4
2.2 Ubicación y accesibilidad	4
3. MARCO GEOLOGICO Y GEOMORFOLÓGICO	5
4. MOVIMIENTOS EN MASA	7
4.1 Descripción del fenómeno.....	7
4.2 Litología.....	8
4.3 Geodinámica local.....	9
4.4 Pendiente.....	9
4.5 Sistema de drenaje	13
5. ESTADO ACTUAL DEL DESLIZAMIENTO DE SUPAYHUAYCO	15
6. ANÁLISIS DE PELIGROSIDAD EN EL DESLIZAMIENTO DE SUPAYHUAYCO	20
6.1 Información base	20
6.2 Parámetros	21
6.3 Simulación de flujo.....	23
6.4 Resultados preliminares	24
7. ANÁLISIS E INTERPRETACIONES A PARTIR DE LA SIMULACIÓN	26
8. MONITOREO DEL DESLIZAMIENTO DE SUPAYHUAYCO	26
CONCLUSIONES	32
RECOMENDACIONES	33
REFERENCIAS	36

EVALUACIÓN GEOLOGICA Y GEODINÁMICA DEL DESLIZAMIENTO ACTIVO DE SUPAYHUAYCO

(Distrito Lucre, Provincia Quispicanchis, Región Cusco)

1. INTRODUCCION

El Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), como ente técnico-científico, incorpora dentro de los proyectos de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (DGAR), el apoyo y asistencia técnica a los gobiernos nacional, regionales y locales; su alcance consiste en contribuir con las entidades gubernamentales en el reconocimiento, caracterización y diagnóstico de los peligros geológicos en sus territorios, con la finalidad de proporcionar información técnica sobre la problemática, además proponer medidas a implementar en post de la prevención y mitigación ante la ocurrencia de desastres.

La municipalidad distrital de Lucre en la provincia Quispicanchi, Región Cusco, solicitó a nuestra institución mediante Oficios N°224-2018-A/MDL-Q y N°237-2018-A/MDL-Q, la participación del Ingemmet en la evaluación técnica en la formación de un movimiento en masa en la quebrada Supayhuayco, a unos 300m del distrito, el cual inició su formación el último 18 de mayo, formando un importante escarpe que inicialmente no pasaba de 1 m de altura. Asimismo, una inspección técnica-geológica en los alrededores del movimiento en masa (deslizamiento) para futuras medidas de prevención.

El INGEMMET, por intermedio de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico - DGAR, comisionó a los profesionales Briant García Fernández Baca y Edu Taipe Maquerhua, especialistas en gestión de riesgos geológicos, para realizar las evaluaciones ingeniero - geológicas en los sectores mencionados, estos se ejecutaron en dos etapas, el 18 de junio y el 23 de julio del 2018, previa coordinación con personal técnico de la municipalidad de Lucre con conocimiento del gobernador local.

Las tareas desarrolladas en dicha comisión consistieron en:

- Visita de campo a la quebrada Supayhuayco, distrito Lucre, provincia Quispicanchi.
- Inspección técnica geológica para caracterizar el deslizamiento y evaluar las posibles zonas que pueden ser afectadas.
- Toma de datos de campo (geometría y medidas de grietas y/o fracturas) y registro fotográfico
- Como parte de los trabajos especializados, se colocaron puntos de control con la finalidad de monitorear el movimiento del deslizamiento¹, con ello se podrá determinar la velocidad del deslizamiento y alertar a la población futuros colapsos.
- Sobrevuelo en dron para realizar cartografía o DEM de alta resolución, perfiles, etc.
- Reuniones sostenidas con especialistas y autoridades de la municipalidad de Lucre, como también con personal técnico de INDECI-Lucre, quienes expresaron la problemática de la zona.

¹ Placas de metal de 1x1 m ancladas al suelo.

2. GENERALIDADES

2.1 Antecedentes y trabajos previos

La microcuenca Lucre siempre ha sido escenario de diferentes eventos geodinámicos, por lo que debe ser considerado una zona geodinámicamente activa, se han presentado desde hace 50 años atrás. En el 2010 la quebrada presentó movimientos de masa, como flujos de detritos, que ocasionaron pérdidas y daños a la población.

El deslizamiento en la actualidad esta en proceso de reactivación, objeto de estudio

2.2 Ubicación y accesibilidad

El deslizamiento de Supayhuayco se ubica en el sector noroeste del distrito de Lucre, a 300 metros de la población del mismo nombre. El distrito de Lucre se ubica a 35km al sureste de la ciudad del Cusco, en la provincia de Quispicanchis, Región Cusco (Figura 1). Las coordenadas geográficas son: 13° 37' 41" Sur, 71° 44' 40" Oeste, y una cota de 3350 msnm.

La accesibilidad a la zona afectada se realiza a través de la vía Cusco - Puno. Para llegar a la zona, se debe tomar el desvío en la localidad de Huacarpay hasta llegar a Lucre, luego se debe ingresar a pie a la quebrada Supayhuayco y ascender hasta la zona en estudio. El tiempo de viaje aproximado desde Cusco es de 1 hora.

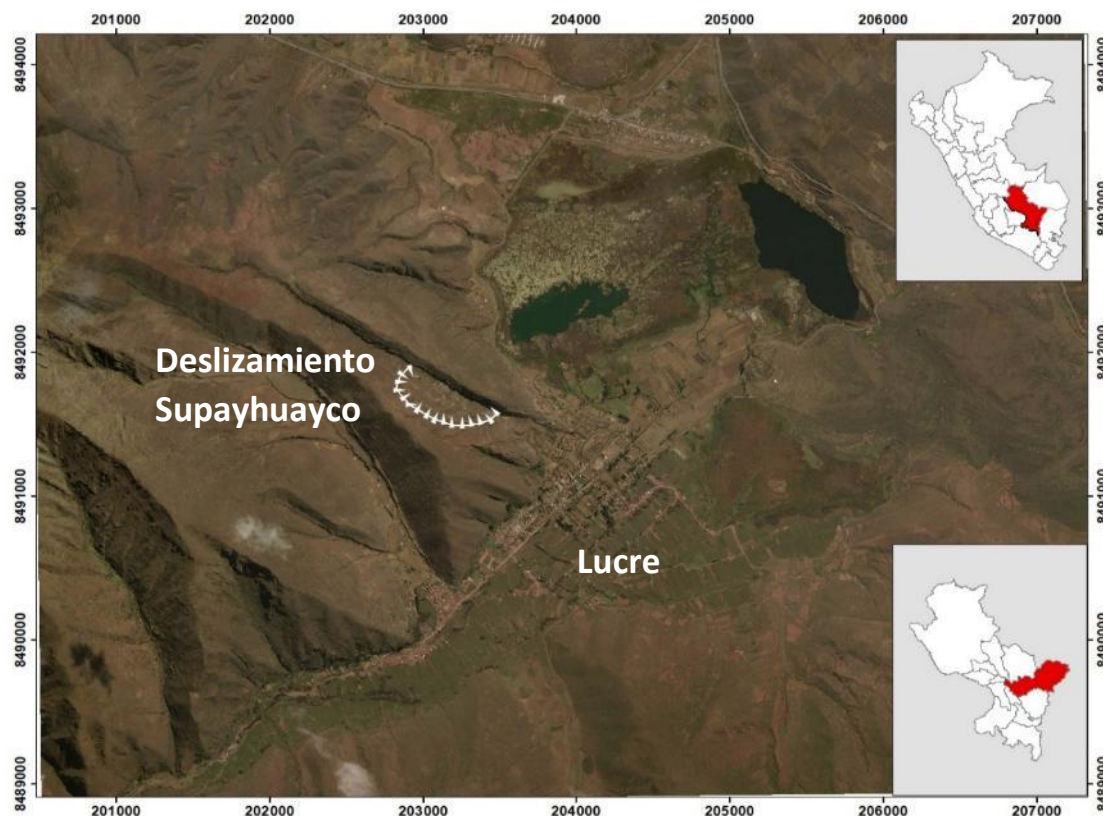


Figura 1. Imagen satelital (Google Earth). En línea blanca dentada, se ubica el deslizamiento de la quebrada Supayhuayco, distrito de Lucre, provincia de Quispicanchi, Cusco.

3. MARCO GEOLOGICO Y GEOMORFOLÓGICO

Según Carlotto *et al.* (1998) en el área de estudio afloran unidades geológicas que van desde el Cenozoico hasta el Cuaternario (Figura 2). La inclinación de las capas en la zona afectada muestra una orientación al noreste, lo que coincide con la formación de la corona principal.

Se tienen las siguientes unidades litoestratigráficas:

Grupo San Jerónimo (Peo-sj):

Potente serie roja de origen continental de más de 6000 m de espesor (Córdova, 1986). En la zona de estudio ocupan gran parte de la cuenca en cuanto a extensión y espesor. Forman parte de este Grupo las formaciones Kayra y Soncco (Carlotto *et al.*, 1997b, 1998-2002, 2005).

- **Formación Kayra:** Aflora hacia la zona oeste del área de estudio y por encima de la zona afectada por el deslizamiento. Está compuesta por areniscas feldespáticas, intercaladas con lutitas rojas (Carlotto *et al.*, 1998). Se presenta meteorizado y muy fracturado.
- **Formación Soncco:** Sobreyace concordantemente a la Formación Kayra, se divide en dos miembros, en el área solamente aflora el Miembro I.
 - **Miembro I.** Se encuentra en la parte central del área de estudio. Está compuesta por lutitas rojas, intercaladas con niveles de areniscas finas a medias y niveles de yeso, son de mala calidad. Sobre esta unidad se ha formado el deslizamiento.
 - **Miembro II.** Está compuesto por areniscas con intercalaciones de niveles de conglomerados y delgados niveles de lutitas.

Depósitos Cuaternarios

- **Depósitos lacustres (Q-la):** A los alrededores del humedal Lucre-Huacarpay se evidencian depósitos lacustres que muestran el claro retroceso de este humedal. Está compuesta por arcillas y niveles de turba.
- **Depósitos aluviales (Q-al):** Se encuentran principalmente dispuestos en conos de deyección en la desembocadura de las quebradas. Está conformado por bloques y gravas de areniscas, calizas, rocas volcánicas, etc. envueltos dentro de una matriz areno-arcillosa. Sobre estos depósitos se encuentra emplazado gran parte de la población de Lucre.
- **Depósitos coluviales (Q-co):** Son depósitos caracterizados por tener fragmentos heterométricos, subangulosos y matriz limoarenosa. Se encuentran en las faldas de cerros y representan en muchos casos movimientos en masa antiguos.

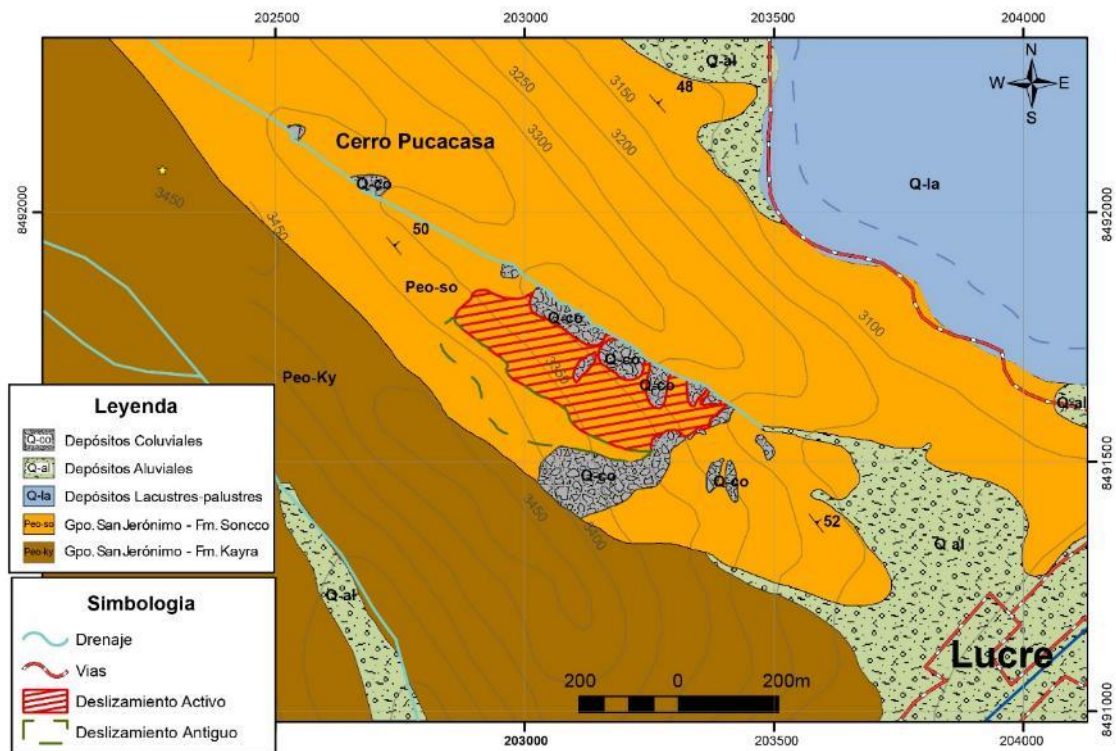


Figura 2. Mapa geológico de la zona de estudio. En polígono con líneas rojas, se marca el cuerpo del deslizamiento. La línea verde discontinua representa el escarpe de un movimiento en masa antiguo (Fuente: Carta geológica 28s - INGEMMET)



Figura 3. Vista al suroeste del deslizamiento en la quebrada Supayhuayco, distrito de Lucre.

El movimiento en masa identificado se encuentra en la margen derecha de la quebrada Supayhuayco, en el cerro denominado Pucacasa. La quebrada es afluente por la margen izquierda del valle de Lucre (Figura 3).

4. MOVIMIENTOS EN MASA

4.1 Descripción del fenómeno

El movimiento en masa en la quebrada Supayhuayco, inició su formación la segunda semana del mes de mayo. Según pobladores locales, el escarpe inicial tenía 1.20 m de altura, sin embargo, unos días después, exactamente el 18 de mayo ocurrió el movimiento más fuerte, alcanzando los 5 metros de alto.

Como se sabe la temporada de lluvias en la sierra sur inicia en el mes de diciembre y culmina en gran porcentaje en los meses de abril-mayo. El Senamhi registra en sus estaciones meteorológicas locales descensos en la cantidad de precipitaciones a finales del mes de marzo, sin embargo, los pobladores mencionan un re-incremento de estas precipitaciones a inicios del mes de abril.

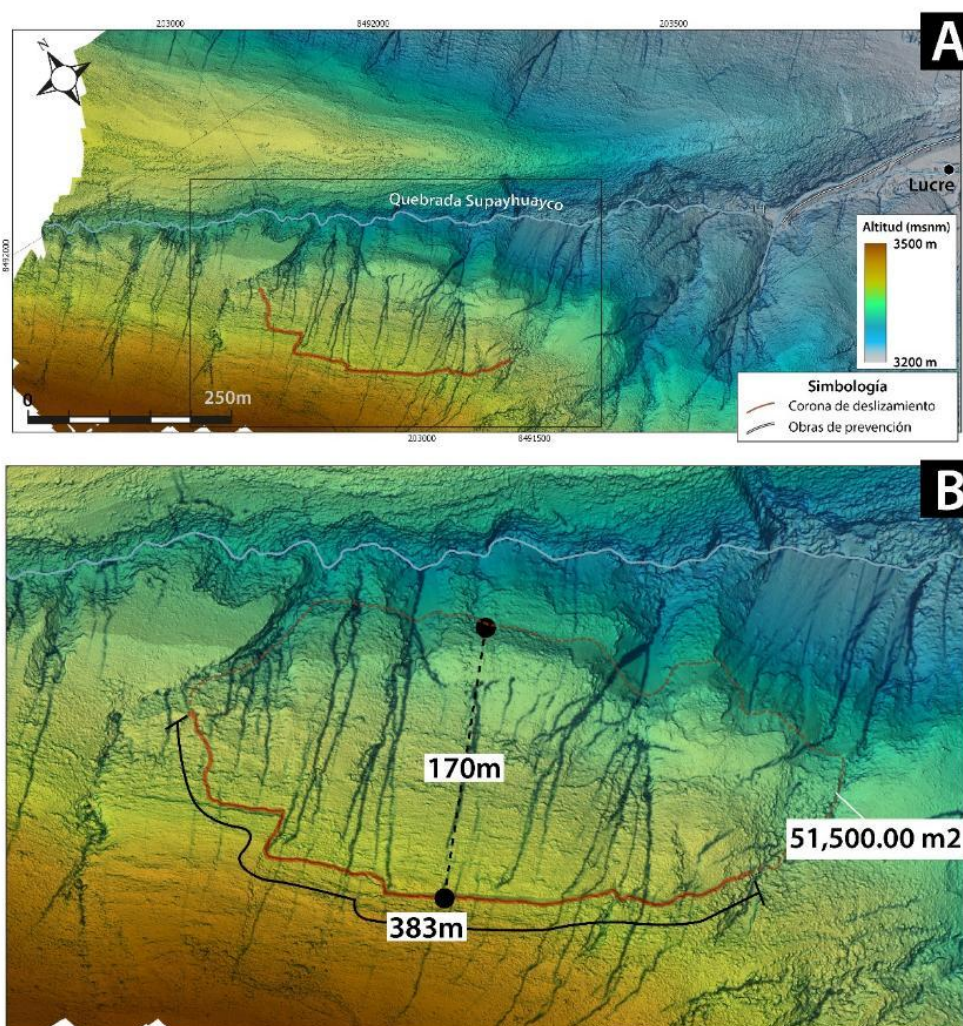


Figura 4. A) Modelo de elevación digital de la zona de estudio. La línea roja representa la corona del deslizamiento. La línea blanca enmarca las obras de prevención ante flujo de detritos. La gama de colores representa las altitudes con respecto al nivel del mar y el recuadro negro es la zona para el análisis de detalle. B) Detalle de la figura (A), donde se marca en línea negra la longitud de la corona de deslizamiento, en línea negra entrecortada se marca la distancia de la corona al pie del deslizamiento. En línea roja entrecortada se marca todo el cuerpo por deslizar, un área que llega a los 51,500 m².

El deslizamiento de la quebrada Supayhuayco presenta las siguientes características:

- a) Corona semicircular y alargada con longitud de 383 m.
- b) Altura del escarpe principal 7.6 m.,
- c) Distancia de la corona al pie del deslizamiento es de 170 m.
- d) Área del deslizamiento 52 900.00 m² (Figura 4a y 4b).

La inclinación de capas es a favor de la pendiente, por este factor geológico, la corona presenta cambios con ángulos rectos, cerca de 90° en algunos tramos.

El movimiento de este deslizamiento está relacionado con la inclinación de los estratos que presenta la roca, esto nos permite interpretar a este evento como deslizamiento traslacional (Figura 5).

Un deslizamiento traslacional se caracteriza por moverse en una superficie plana u ondulada (PMA). Estos aprovechan diaclasas, planos de estratificación, fallas o planos de contacto y suelen ser superficiales (Cruden y Varnes, 1996). Las velocidades de estos deslizamientos pueden ser rápidos a muy rápidos (PMA).

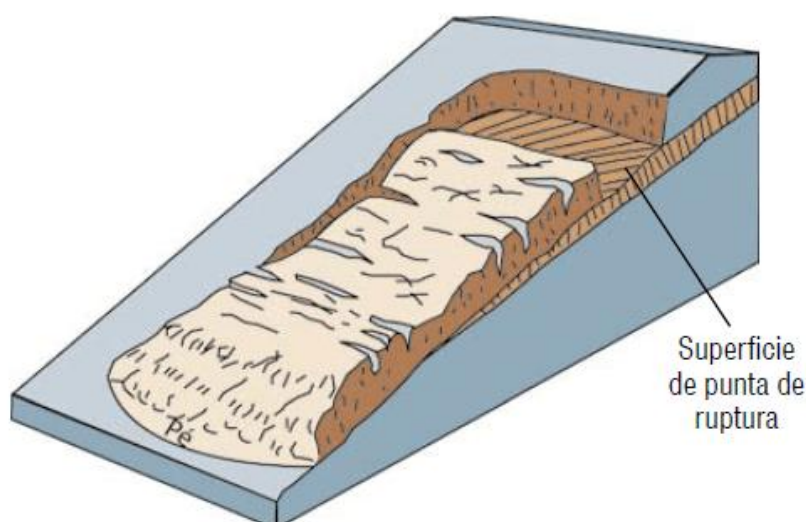


Figura 5. Block diagrama de un deslizamiento traslacional.

La visita a la zona de estudio nos permitió observar las condiciones geológicas del área y las características geométricas y geodinámicas del deslizamiento. Es así que se observaron y analizaron los siguientes factores: litología, geodinámica local, pendiente y sistema de drenajes.

4.2 Litología

En el área afloran secuencias siliciclásticas de la Formación Soncco, predominantemente una intercalación de areniscas de granos finos a medios con lutitas (Figura 6). En las capas sedimentarias se observan delgados niveles de limolitas con presencia de yesos.

Las secuencias sedimentarias están muy fracturadas (se generan fragmentos de roca con dimensiones comprendidas entre 20 a 50 cm.), por la intensa deformación de la unidad litoestratigráfica durante el cenozoico.

Las capas sedimentarias tienen un rumbo de N 135° y un buzamiento promedio de 50° al noreste. Es así que las direcciones de inclinación de las capas coinciden con la superficie del deslizamiento (Figura 6).

Sobreyaciendo a las secuencias sedimentarias cenozoicas y en discordancia erosiva, se presentan niveles rojizos y blanquecinos con potencias que llegan hasta los 2 m. Presentan clastos de tamaño heterogéneo y son subangulosos en su mayoría. Por las características mencionadas, estos depósitos corresponden a depósitos coluvio-aluviales, provenientes de la erosión de la quebrada.

A lo largo de la quebrada Supayhuayco se han reconocido otros depósitos coluviales, principalmente en su margen derecha, esto evidencia antiguos movimientos en masa.

De igual forma en la desembocadura de la quebrada se observa un importante cono de deyección de depósitos proluviales, lo que evidencia anteriores flujos de detritos provenientes de esta quebrada, como el ocurrido en el año 2010.

4.3 Geodinámica local

En la quebrada Supayhuayco se observan una importante cantidad de movimientos en masa (Figura 6). Sin embargo, el deslizamiento en estudio es el de mayor dimensión en el área.

A lo largo de la margen derecha de la quebrada se observó una importante cantidad de cárcavas, de distintas dimensiones; además se evidenció que el cuerpo del deslizamiento está disectado por cinco cárcavas con profundidades de hasta 3 metros (Figura 7). Por otro lado, según el análisis realizado con la información detallada del dron y su proceso con el software QGis, se observó cárcavas en formación, ligeras depresiones capaces de transportar agua superficial, siendo vulnerables a ser erosionadas e incisadas con el tiempo (Figura 7).

La erosión fluvial generó en el pie de los cerros de ambos lados de la quebrada, la desestabilización del talud, lo que provocó la caída a manera de deslizamientos y derrumbes a lo largo de toda la quebrada.

Por último, en la desembocadura de la quebrada se observó un cono aluvial, compuesto por bloques de hasta 1m de diámetro envueltos en matriz limo-arenosa.

4.4 Pendiente

Este factor en un movimiento en masa es muy importante, porque ayuda a acelerar o estabilizar un cuerpo inestable. En este caso, se presentan pendientes variadas a lo largo de toda la quebrada Supayhuayco, las laderas de los cerros muestran pendientes entre 30° a 45°, el pie del deslizamiento mayor a 10° (Figura 8). En todo el cuerpo del deslizamiento se observó pendientes variadas de hasta de 45°. En general el cerro Pucacasa, donde se encuentra el deslizamiento en estudio, presenta pendientes comprendidas entre 35° a 45°.

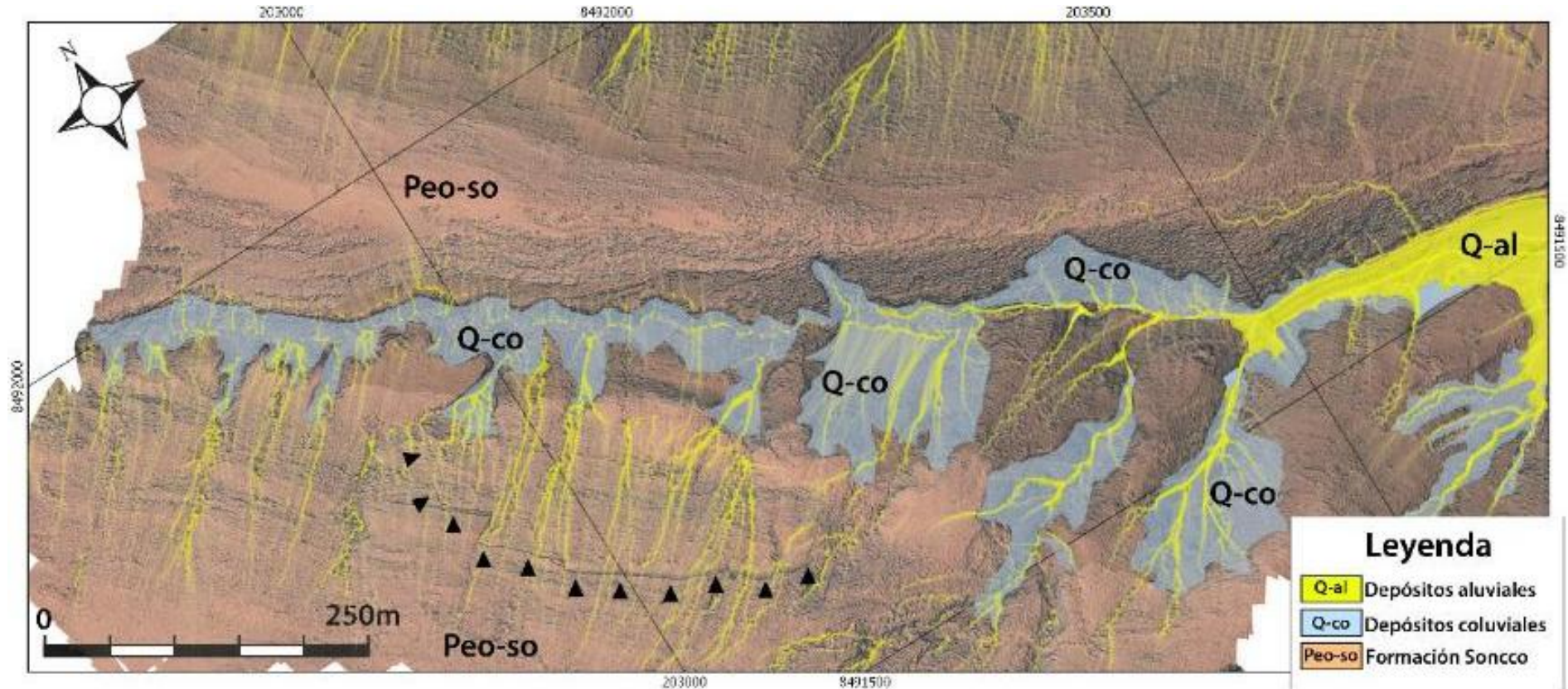


Figura 6. Mapa geológico local. En color marrón claro se representa a la Formación Soncco, en gris los depósitos coluviales y en color amarillo a los depósitos aluviales. Las flechas negras, marcan la corona del deslizamiento.

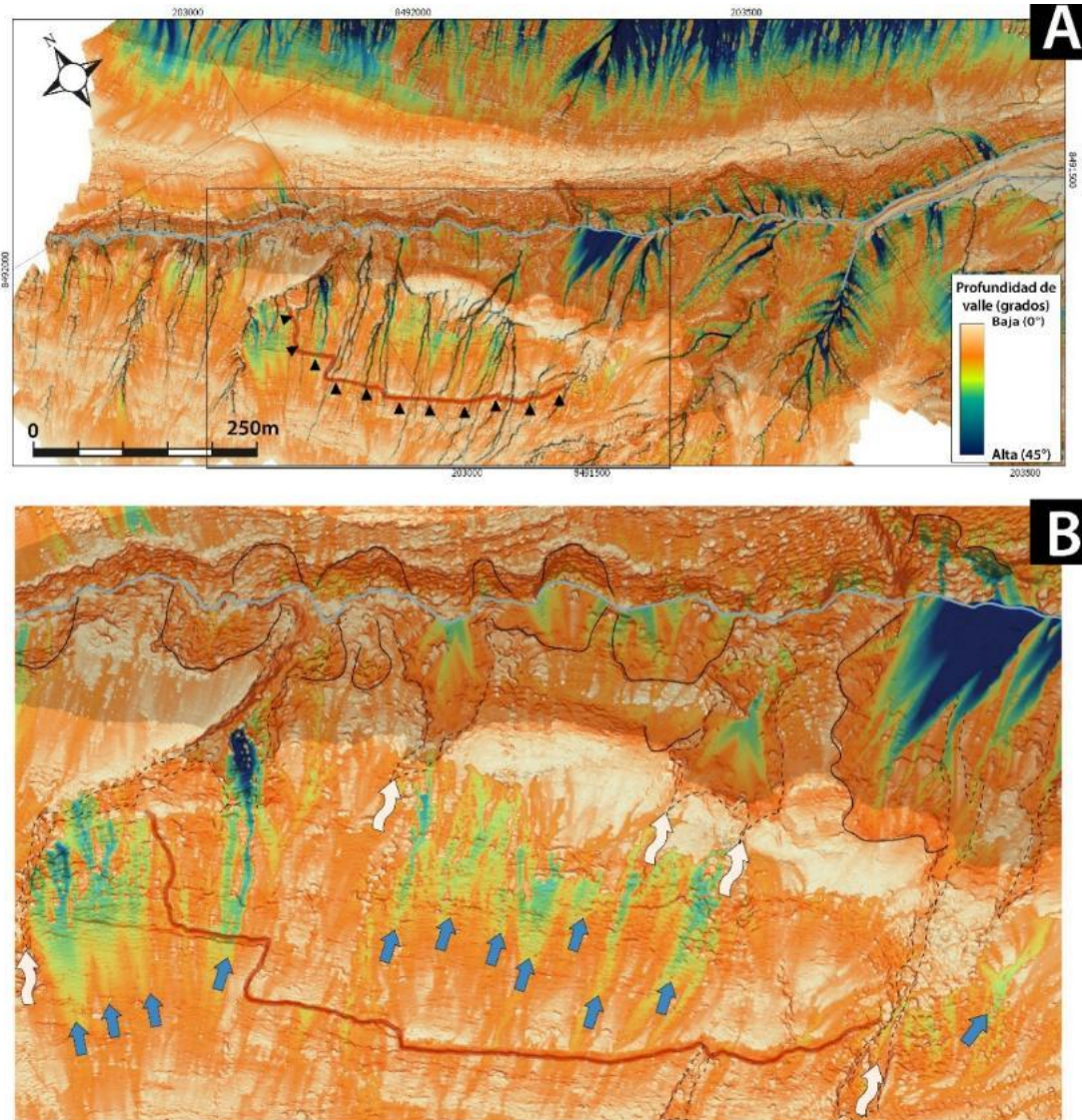


Figura 7. A) Mapa que representa las profundidades del terreno a lo largo de toda la quebrada Supayhuayco. En recuadro negro se marca el área de interés.

B) Se observa en líneas negras las escarpas de deslizamientos antiguos, en líneas negras entrecortadas las cárcavas, las cuales a la vez están señalizados con flechas de color blanco. Las flechas de color azul señalan algunas ligeras depresiones que con el tiempo formarán nuevas cárcavas.

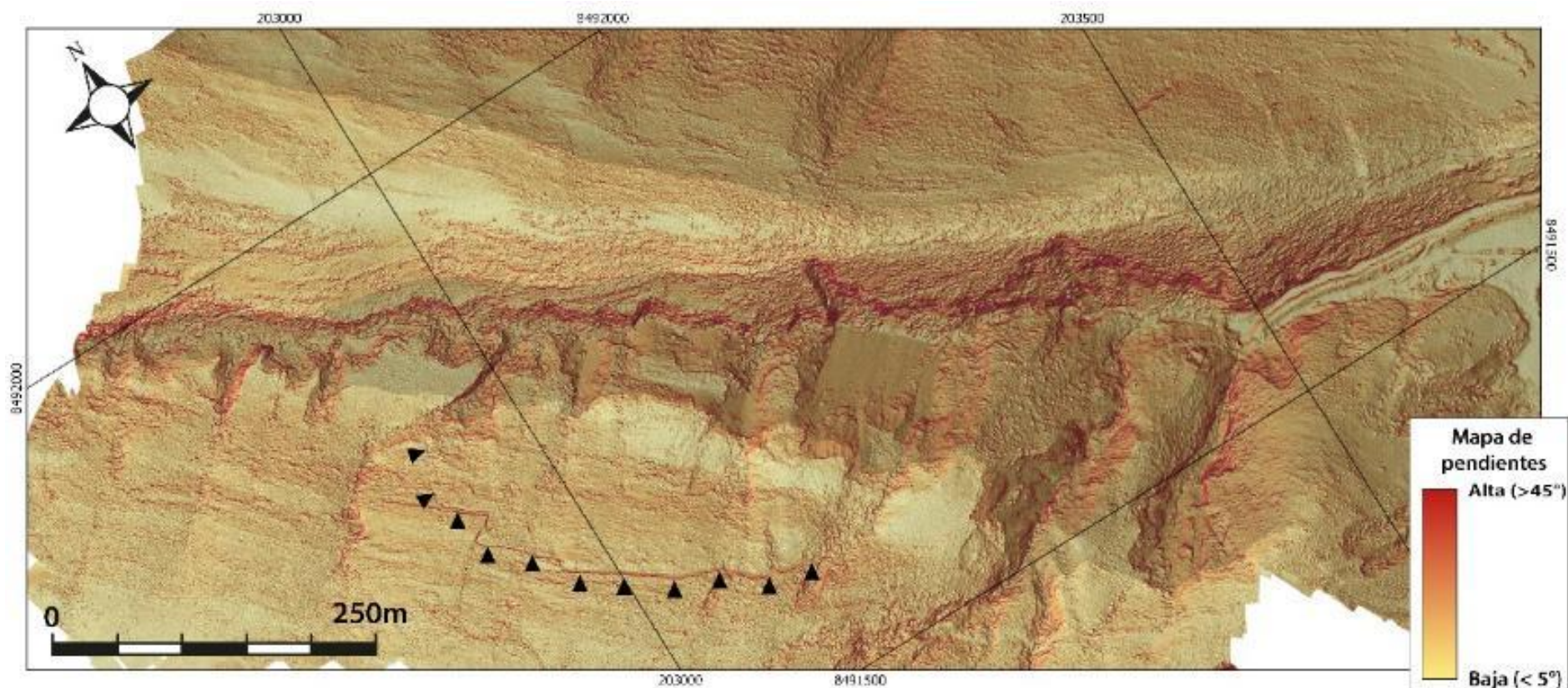


Figura 8. A) Mapa de pendientes de la quebrada Supayhuayco, generado con la información con drone. Resalta la gama de colores rojos representa la pendiente en grados. En flechas negras se marca la ubicación del deslizamiento de supayhuayco.

4.5 Sistema de drenaje

El agua es el factor más importante en el análisis de susceptibilidad por movimientos en masa y otros peligros asociados

Es por este motivo que se debe analizar las zonas de acumulación de aguas para realizar obras de prevención, principalmente la realización de sistemas de drenajes que eviten la filtración de agua en zonas vulnerables a caída, colapso o deslizamientos.

Como se conoce, Lucre se encuentra en una zona geográfica con una importante cantidad de precipitaciones pluviales anuales, especialmente en época de lluvias (noviembre a marzo), estas aguas superficiales al no ser debidamente canalizadas en suelos permeables y con basamentos rocosos fracturados y alterados, desencadenan la ocurrencia de movimientos en masa que ponen en peligro a los pobladores locales.

En la actualidad, cuando se hizo las campañas de campo (junio y julio), no se observaron cauces o drenajes transportando aguas superficiales, sin embargo, según los pobladores en época de precipitaciones en la quebrada Supayhuayco y laderas de cerros se observa circulación de aguas superficiales que en muchos casos saturan los suelos del área.

Análisis de captación de acumulación de aguas. Por ello, utilizando la información topográfica de detalle de drone, se realizó el análisis de captación de acumulación de agua.

Para esto se utilizó la herramienta “Catchment área (Flow tracing)” de QGis, el cual utiliza un DEM de 4 cm/px de resolución y 1cm de precisión. El proceso en QGis simula una acumulación de agua utilizando las coordenadas en el eje z de los píxeles o celdas del DEM, generando un mapa con los drenajes naturales y antrópicos existentes en el terreno.

En la zona del deslizamiento, por ejemplo (Figura 9), se observó algunos lugares capaces de acumular aguas superficiales en mayor proporción, en la corona y alrededores, así como dentro del deslizamiento, lo que sugiere que, en un incremento de precipitaciones pluviales, estas zonas captarán mayor cantidad de agua que producirá la saturación del suelo, facilitando de esta manera el colapso del deslizamiento.

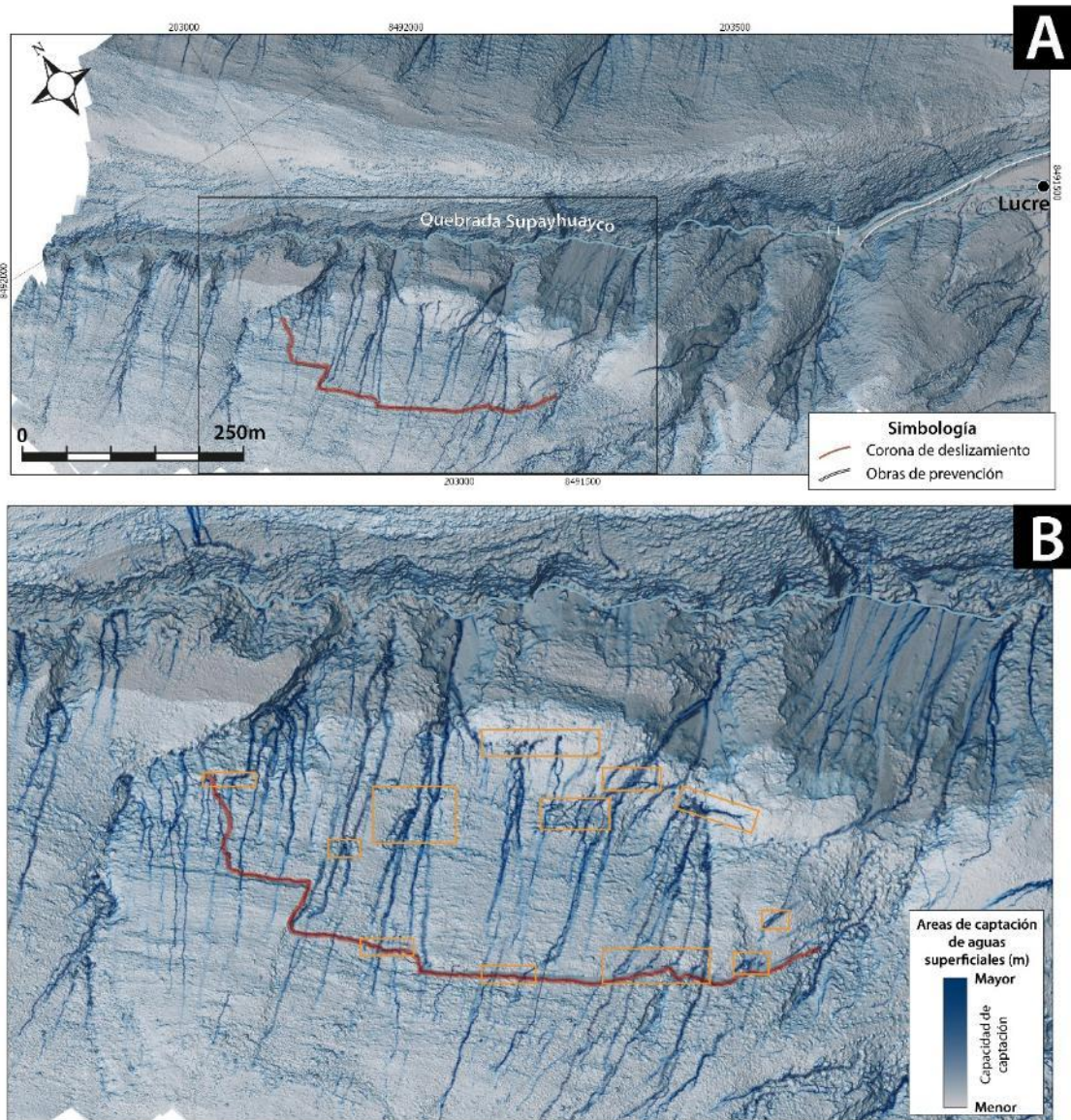


Figura 9. A) Mapa que muestra en colores azules las zonas o áreas de captación de aguas superficiales a lo largo de toda la quebrada Supayhuayco. En recuadro negro se marca el área de interés.

B) Se observa en recuadros naranjas, las zonas del cuerpo del deslizamiento con mayor capacidad para acumular aguas superficiales en épocas de lluvias.

5. ESTADO ACTUAL DEL DESLIZAMIENTO DE SUPAYHUAYCO

Actualmente el deslizamiento se encuentra activo, presenta grietas tensionales hasta 5 m por la parte posterior de la corona (Figura 10a). A 20 m aproximadamente de la corona se observan otros desniveles en el suelo (Figura 10b). Durante las visitas a campo se observaron derrumbes de tierra y rocas al pie del deslizamiento.

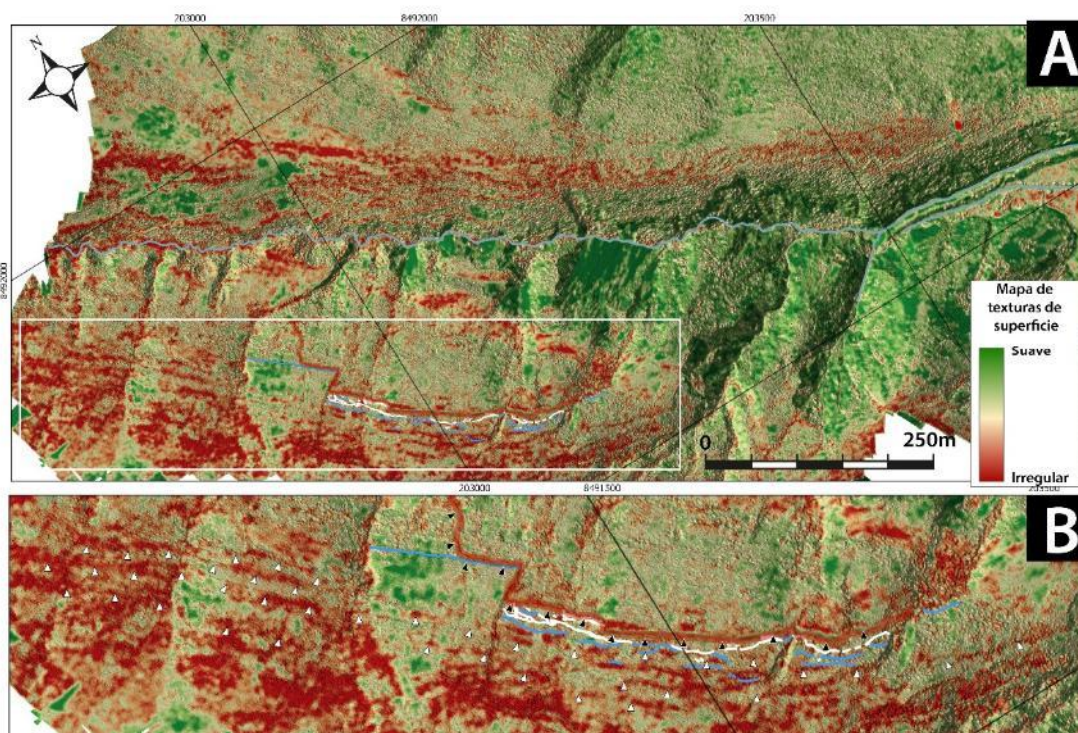


Figura 10. A) Mapa que representa en gama de colores las texturas del suelo a lo largo de la quebrada Supayhuayco. En recuadro blanco se marca el área de interés.

B) Se muestra en triángulos negros el escarpe del deslizamiento, en líneas blancas las grietas tensionales, en líneas celestes desniveles en el suelo y en flechas blancas los lineamientos que presenta el terreno; estos últimos están asociados a la litología, vegetación y desniveles.

El área del cuerpo por deslizar es de 51,500 m² y tiene un espesor variable entre 1 a 4m, entonces el volumen es de aproximadamente 128,750 m³. Sin embargo, el área que presenta importantes grietas tensionales es de 1550 m² y su volumen calculado es de 6200m³. Sumando las dos áreas y volúmenes (deslizamiento y grietas tensionales) tenemos 53,050m² y 134,950m³ respectivamente.

En un análisis de escarpas (Figura 11) creado por Aguirre *et al.* 2018; se observa escarpes de hasta 7m en el lado sureste del deslizamiento, escarpes de 4m de promedio e medio y entre 1 y 2 m de altura de escarpe al noroeste. En cuatro perfiles swath (aa', bb', cc' y dd'), podemos observar lo siguiente:

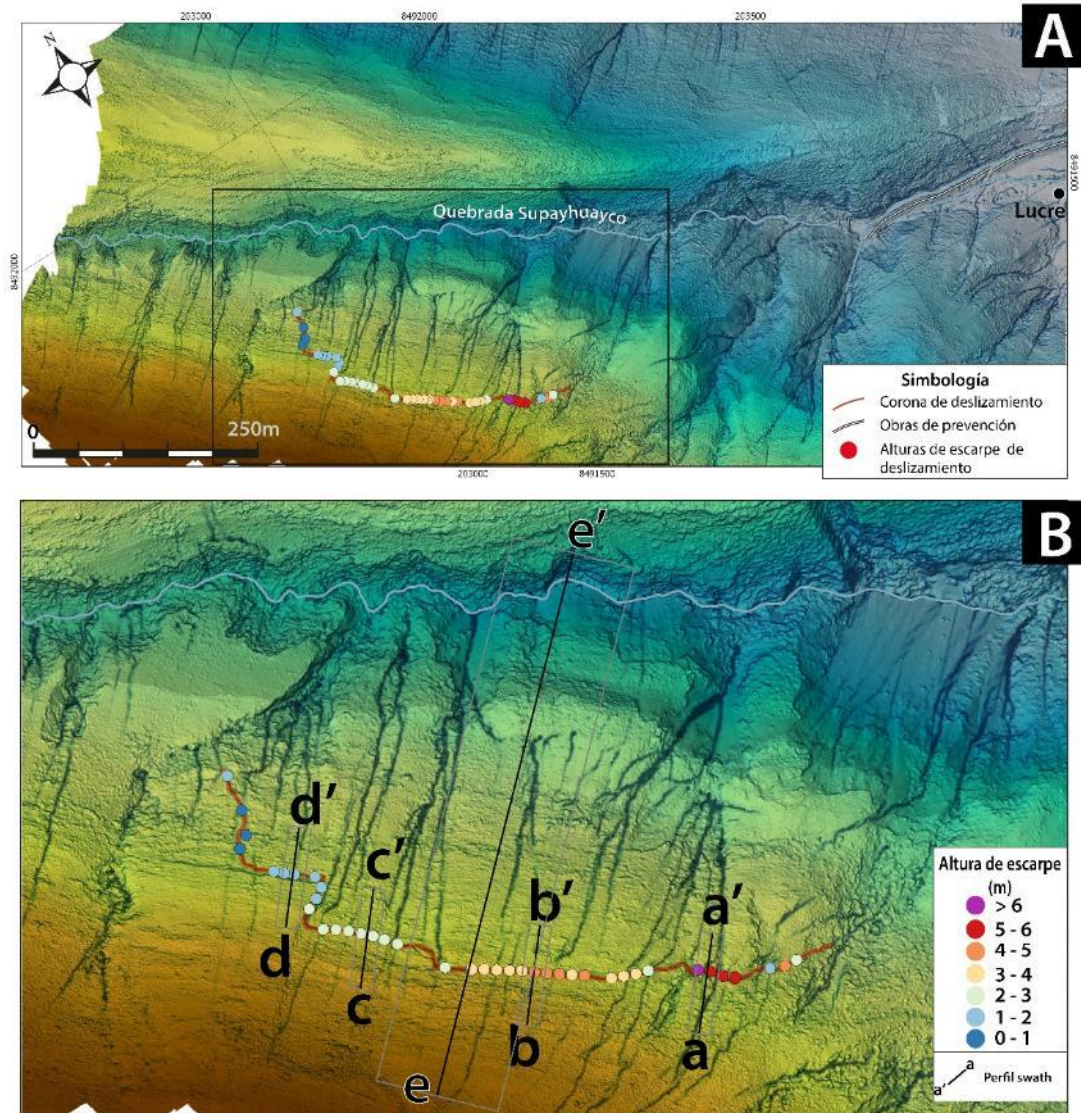


Figura 11. A) Mapa que representa en gama de colores las altitudes con respecto al nivel del mar. En línea roja con puntos de colores se marca la escarpa del deslizamiento, en líneas blancas se ubican las obras de prevención y en recuadro negro se enmarca la zona de interés. B) Área del deslizamiento, donde se grafica la ubicación de los perfiles swath (aa', bb', cc', dd' y ee'), los círculos de colores representan las alturas del escarpe del deslizamiento.

Perfil a-a'

En este perfil swath (Figura 12) se tienen escarpes de hasta 7 m de altura, grietas tensionales detrás de la corona. Por otro lado, por este lugar también presenta una zona capaz de acumular aguas superficiales dentro del cuerpo del deslizamiento.

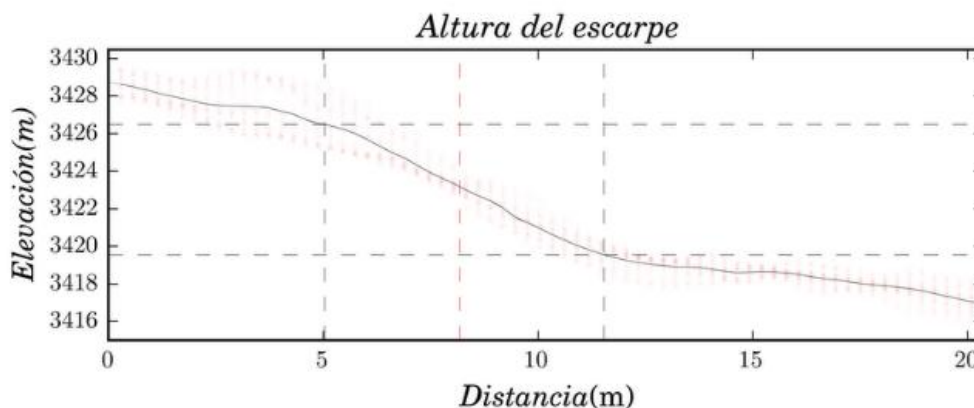


Figura 12. Perfil swath a(izq)-a'(der), ubicado al este del deslizamiento.

Perfil b-b'

En este perfil swath (Figura 13) se observa escarpes de hasta 4.1 m de altura y grietas tensionales detrás de la corona. Por otro lado, las grietas del escarpe presentan una zona capaz de acumular aguas superficiales.

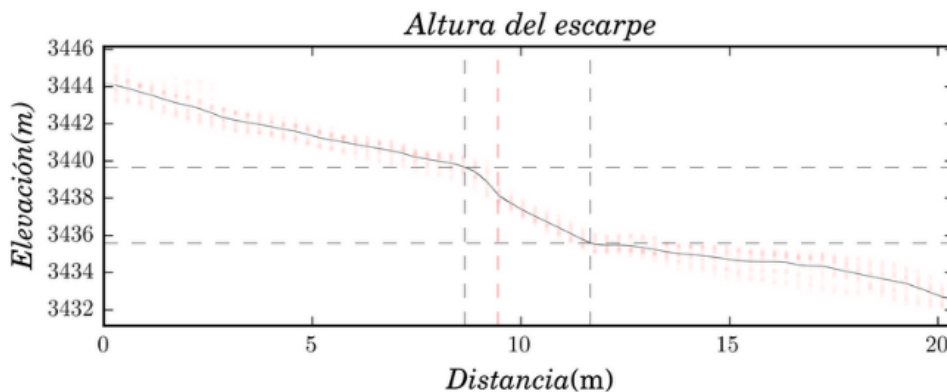


Figura 13. Perfil swath b(izq)-b'(der), ubicado al este del deslizamiento

Perfil c-c'

En este perfil swath (Figura 14) se observa escarpes de hasta 2.4 m de altura y grietas tensionales detrás de la corona. Por otro lado, por este lugar cruza un drenaje capaz de transportar aguas superficiales.

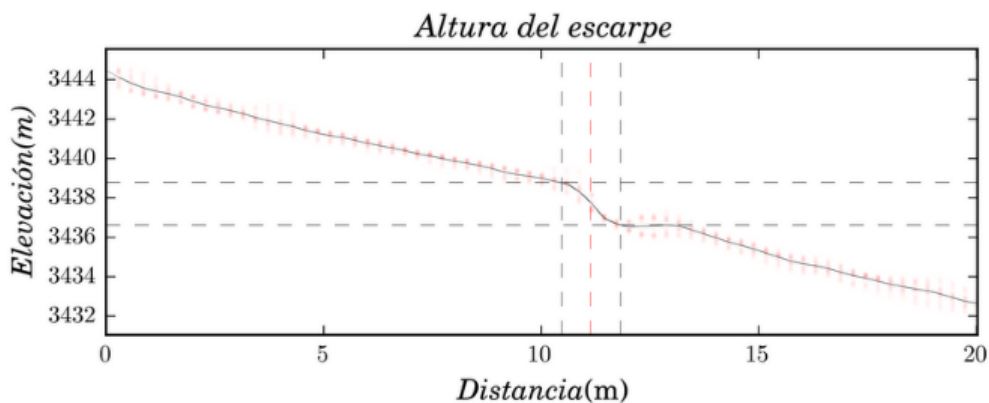


Figura 14. Perfil swath c(izq)-c'(der), ubicado al este del deslizamiento.

Perfil d-d'

En este perfil swath (Figura 15) se observan escarpes de hasta 1.8 m de altura y delgadas grietas tensionales detrás de la corona. Por otro lado, se observa un escarpe anterior (Figura 15).

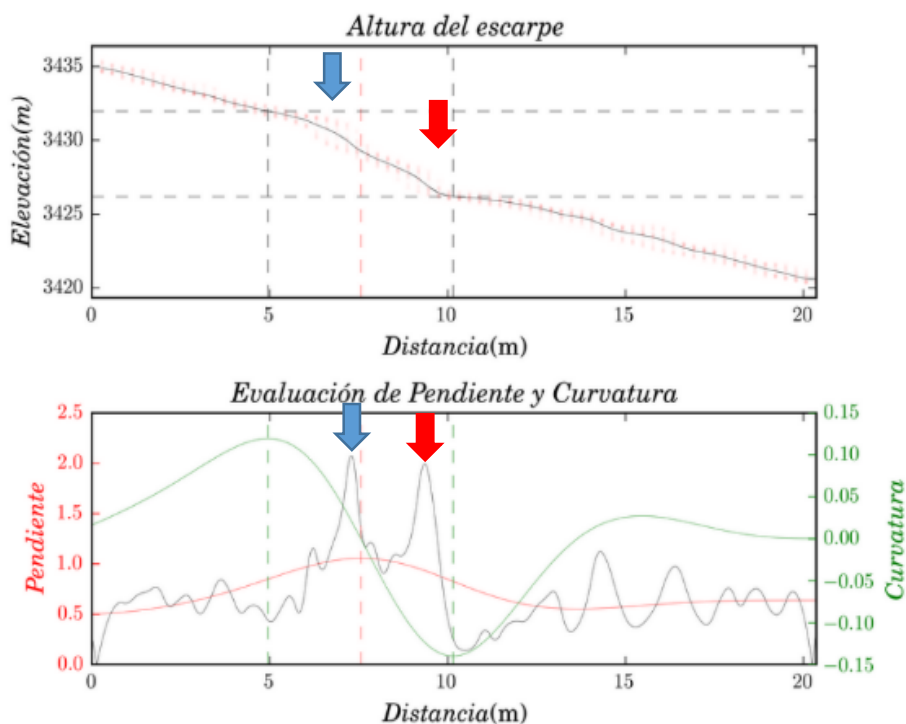


Figura 15. Perfil swath d(izq)-d'(der), ubicado al este del deslizamiento. La flecha azul marca un escarpe antiguo. La flecha roja marca la ubicación del escarpe reciente.

Perfil e-e'

En este perfil swath (Figura 16) se observan en recuadro azul la ubicación del escarpe principal, en recuadro verde se marca el pie del deslizamiento y en cuadros amarillos transparentes la zona con grietas tensionales respectivamente. En la figura de abajo se observa la variación de altura, estos marcan las grietas y/o cambios de pendiente bruscos

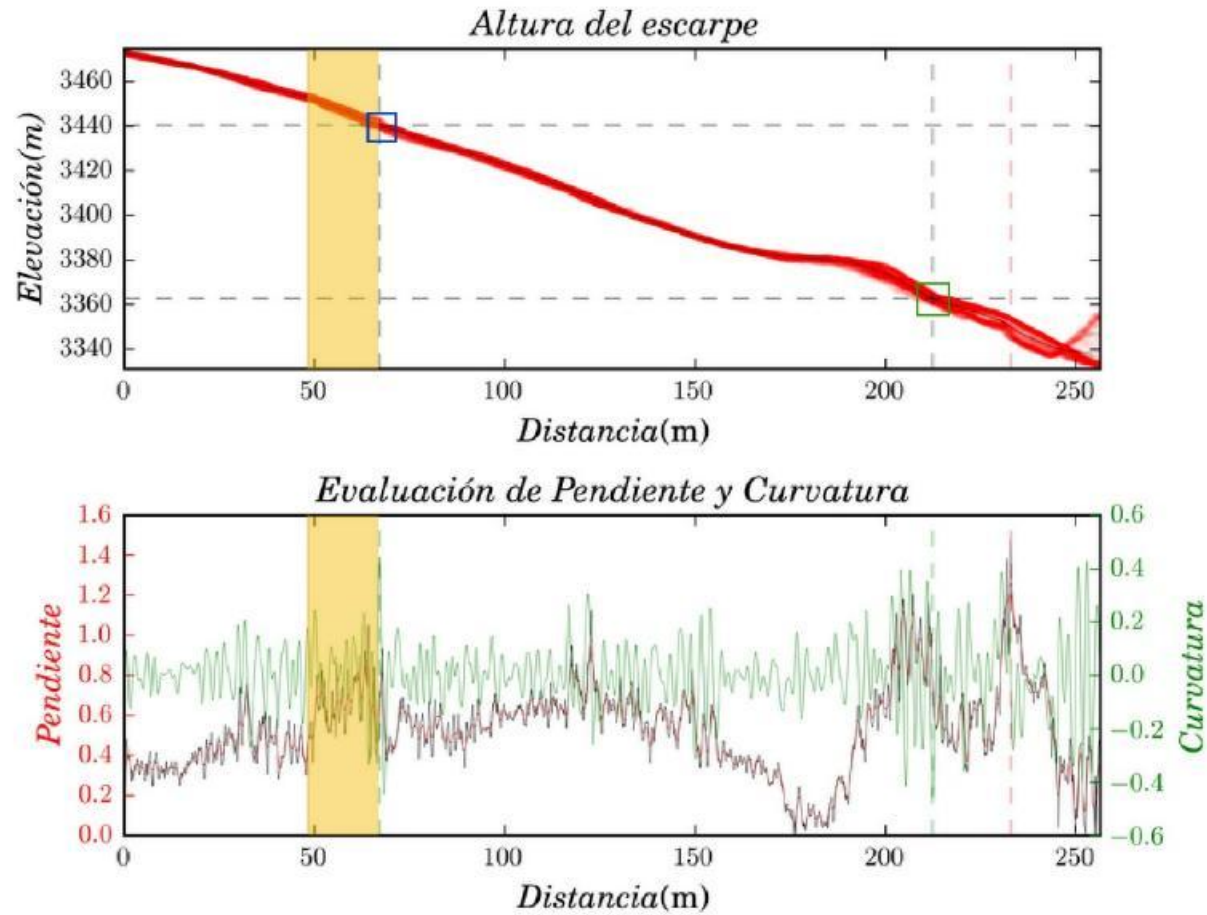


Figura 16. Perfil swath e(izq)-e'(der), ubicado al medio del deslizamiento. Las intersecciones de líneas entrecortadas marcan la corona y el pie del deslizamiento.

6. ANÁLISIS DE PELIGROSIDAD EN EL DESLIZAMIENTO DE SUPAYHUAYCO

En líneas arriba se ha descrito las condiciones geológicas, geodinámicas e hidrológicas en el deslizamiento y a lo largo de la quebrada Supayhuayco. Las características geométricas por sí, hacen de este movimiento en masa un fenómeno importante, por el peligro que representa.

Aunque, no se puede conocer el verdadero peligro hasta que un escenario real ocurra, existe la posibilidad de generar un escenario que modele un supuesto movimiento en masa compuesto (deslizamiento y flujo de detritos).

Es por ello, que se ha generado un modelo de flujo en la quebrada Supayhuayco, utilizando el software Laharflow. Este software originalmente fue creado por investigadores ingleses para simular flujos de detritos de origen volcánico, sin embargo, a nivel mundial se ha utilizado este software para modelar flujos de detritos en cualquier ambiente orogénico a causa de precipitaciones pluviales.

Para no subestimar el peligro, se debe considerar en crear el peor de los escenarios posibles, es decir, se debería tener en cuenta, las más altas precipitaciones pluviales registradas en el área, como las que se presentaron en el año 2010; en ese año las estaciones meteorológicas cercanas registraron hasta un máximo de 260 mm (Fuente: SENAMHI). Por otro lado, se tiene que realizar el modelado con el máximo material disponible y susceptible a caer, en este caso se tiene el volumen aproximado de 128,750 m³.

El software requiere de algunos coeficientes y parámetros, para crear un modelo más aproximado a la realidad. Se piden los siguientes datos:

6.1 Información base

Coordenadas (Ubicación geográfica)

Esta información se refiere a las coordenadas del centro del área del deslizamiento. En este caso se tiene:

- Latitud: -13.63
- Longitud: -71.74

Tamaño del dominio

Se ingresa esta información para visualizar los resultados. En este caso 2500 x 2500 m.

Resolución X & Y

Se ingresa esta información que representa la resolución topográfica (SRTM). En este caso se tiene como base del software el DEM de 30m. Sin embargo, las celdas o pixeles del gráfico pueden ser mayores a 1m.

Tiempo de simulación

Este dato representa el tiempo aproximado que podría durar el movimiento en masa desde el colapso del deslizamiento hasta que no exista movilidad y transporte de sedimentos ni flujos de agua. Considerando que el deslizamiento sea muy rápido en caer (~1 min) el transporte a lo largo de la quebrada (~2-3 min), relleno parcial del canal con dique (~5-10 min) hasta su rebalse y deposición en el cono aluvial (~4-6 min) se tiene un aproximado de 12 a 20 minutos de duración del fenómeno, sin contar la constante escorrentía superficial del agua.

6.2 Parámetros

Concentración de sólidos

Este coeficiente representa el porcentaje de material sólido de la masa, es decir el porcentaje de clastos con respecto a la matriz. Esto dependerá de la saturación del suelo, la litología, material de la base del canal, cantidad de precipitación, circulación de agua en el drenaje.

Se conoce que en el área predomina rocas sedimentarias (areniscas) y puede presentarse precipitaciones de hasta 250 mm. Se observa también, que el canal es seco en temporadas entre mayo y noviembre, pero si tiene circulación de agua constante entre noviembre y abril.

Con estos datos se puede inferir que, si el deslizamiento ocurriera en épocas de sequía, este únicamente colapsaría y/o avanzaría un pequeño tramo; sus causas serían relacionadas a ligeras lluvias o a un terremoto. Sin embargo, en época de lluvias, el deslizamiento se convertiría en un flujo de detritos, el cual además puede captar en su camino el caudal ligero del canal, siendo este componente líquido no tan importante. Para este coeficiente se tiene un valor máximo entre 0 y 0.6, donde 0 es un flujo muy líquido y 0.6 es un movimiento en masa prácticamente seco. Por lo mencionado en la zona de estudio consideramos un valor aproximado de 0.45 (45%).

Coeficiente de Chezy

Este coeficiente representa la geometría del canal y su rugosidad. Con este coeficiente se considera la pérdida de material mientras se realiza el transporte del material hasta la zona de acumulación. Con este conocimiento Bazin, replantea la fórmula de Chezy utilizando además la pendiente del canal de donde genera la siguiente tabla:

	γ
1. Paredes muy unidas (cemento liso, madera acepillada y fibrocemento)	0,06
2. Paredes unidas (plancha, piedra tallada, ladrillo, etc.)	0,16
3. Paredes de mampostería	0,46
4. Paredes de naturaleza mixta (tierra en sección regular o con revestimiento de piedra)	0,85
5. Canales de tierra en las condiciones normales	1,30
6. Canales de tierra ofreciendo gran resistencia al paso del agua (paredes con vegetación o rocas)	1,75

Tabla 1. Valores del coeficiente de Chezy a partir de la fórmula de Bazin

De acuerdo a lo visto en campo, el canal natural que transportaría el flujo presenta en un 50% de su recorrido, rocas de varias dimensiones y vegetación de arbustos y plantas pequeñas. En un 20% del recorrido, se tiene las condiciones de un canal de tierra normal; y en el 30% restante del tramo se observa se observa paredes de naturaleza mixta. Con esta información se obtuvo un valor promedio de 1.4.

Coeficiente de fricción granular (granular friction)

Este coeficiente representa la fricción entre granos del suelo a transportar. Para hallar este coeficiente se considera la tabla del ángulo de fricción interna (Braja, 2001) y se

obtiene su tangente (Tabla 2). En la zona existe diversos materiales y por ello el software necesita ingresar los coeficientes máximos y mínimos

ANGULO DE FRICCIÓN INTERNA "φ"

Tipo de suelo	φ ° (grados)
<i>Arena: granos redondeados</i>	
Suelta	27 - 30
Media	30 - 35
Densa	35 - 38
<i>Arena: granos angulares</i>	
Suelta	30 - 35
Media	35 - 40
Densa	40 - 45
<i>Grava con algo de arena</i>	34 - 48
<i>Arcillas consolidadas</i>	20 - 30
<i>Limos</i>	26 - 35

Braja M. Das, 2001

Tabla 2. Valores de ángulos de fricción para depósitos y rocas.

Utilizando la clasificación de Braja (Tabla 2), se obtuvieron los siguientes coeficientes:

- Fricción granular mínimo: 0.4
- Fricción granular máxima: 0.8

Coeficiente de fricción de suelo (friction switch)

Este coeficiente representa la resistencia que genera la superficie con el material transportado. Al ser un cauce de río con suelos gravosos en más del 60% del tramo y con una superficie de campos de cultivo en el resto del tramo se considera un valor de 0.5. Este valor fue calculado a partir del trabajo de Lucas et al., 2014.

En cambio, su tasa de fricción (**friction switch rate**) es representado por el valor de resistencia entre el fluido y los granos. En este caso utilizaremos el valor por default, 3, esto debido a falta de información geotécnica del lugar.

Taza de erosión (erosion rate)

Es el coeficiente en la parametrización de la erosión que cuantifica la velocidad a la que se agrega el volumen desde la superficie erosionada. Para ello se utiliza la ecuación $i=Ke(t-tc)$, donde i es la tasa de erosión, Ke es el coeficiente de erosionabilidad, t es el estrés cortante y tc es el estrés cortante crítico erosivo.

Considerando las condiciones litológicas locales, se utilizó coeficientes utilizados en otras zonas con condiciones geotécnicas parecidas (Chen & Zhang, 2015; Vasquez et al, 2016) de donde se obtuvo un valor aproximado de 0.006.

Profundidad de erosión (erosion depth)

Como se conoce, en el año 2010 se registraron flujos de detritos en las quebradas Lucre y Supayhuayco, por la longitud de la cuenca la quebrada de Lucre registro profundidades de erosión de hasta 3m, en cambio la quebrada de Supayhuayco llegó a un máximo de profundidad de erosión de 0.5m. Por ello, considerando un movimiento en masa compuesto en un escenario más catastrófico se considera el valor de 1m de erosión para un supuesto flujo de detritos o huayco.

Porosidad de la capa (Bed porosity)

Para este parámetro se considera la porosidad de la litología predominante y vulnerable a saturarse de agua. Con el cuadro de Newell (2016), (Tabla 3) se observa que las areniscas tienen un valor de porosidad máximo de 0.30.

	Total Porosity (dimensionless)	Effective Porosity (dimensionless)	Hydraulic Conductivity (m/s)
Unconsolidated Material			
Gravel	0.25 – 0.44	0.13 – 0.44	3×10^{-4} to 3×10^{-2}
Coarse sand	0.31 – 0.46	0.18 – 0.43	9×10^{-7} to 6×10^{-3}
Medium sand		0.16 – 0.46	9×10^{-7} to 5×10^{-4}
Fine sand	0.25 – 0.53	0.01 – 0.46	2×10^{-7} to 2×10^{-4}
Silt, loess	0.35 – 0.50	0.01 – 0.39	1×10^{-9} to 2×10^{-5}
Clay	0.40 – 0.70	0.01 – 0.18	1×10^{-11} to 4.7×10^{-9}
Sedimentary and Crystalline Rocks			
Karst and reef limestone	0.05 – 0.50	--	1×10^{-6} to 2×10^{-2}
Limestone, dolomite	0.00 – 0.20	0.01 – 0.24	1×10^{-9} to 6×10^{-6}
Sandstone	0.05 – 0.30	0.10 – 0.30	3×10^{-10} to 6×10^{-6}
Siltstone	--	0.21 – 0.41	1×10^{-11} to 1.4×10^{-8}
Basalt	0.05 – 0.50	--	2×10^{-11} to 2×10^{-2}
Fractured crystalline rock	0.00 – 0.10	--	8×10^{-9} to 3×10^{-4}
Weathered granite	0.34 – 0.57	--	3.3×10^{-6} to 5.2×10^{-5}
Unfractured crystalline rock	0.00 0.05	--	3×10^{-14} to 2×10^{-10}

Tabla 3. Tabla de porosidades para los distintos materiales.

Diámetro de sólidos (solid diameter)

En vestigios del cono aluvial en Lucre, provenientes de la Qda. Supayhuayco se observaron clastos con diámetros de hasta 0.8 m, sin embargo, para este caso utilizaremos el tamaño de clasto promedio.

6.3 Simulación de flujo

Para esta simulación se debe tener en cuenta la siguiente secuencia de eventos:

- Intensas precipitaciones
- Deslizamiento
- Represamiento de la quebrada
- Flujo de detritos
- Depositación de sedimentos

Información Base

- Coordenadas: -13.628192, -71.744291
- Tamaño del dominio: 2500x2500m
- Resolución: 30m
- Tiempo de simulación: 900s
- Concentración de sólidos: 0.45

Parámetros:

- Chezy coef.: 1.4
- Granular friction min: 0.36
- Granular friction max: 0.84
- Friction switch: 0.5
- Friction switch rate: 3
- Erosion rate: 0.006
- Erosion Depth: 1
- Bed Porosity: 0.3
- Solid diameter: 0.15

6.4 Resultados preliminares

Con esta data se procedió a la simulación en el software Laharflow, el cual nos generó los siguientes resultados.

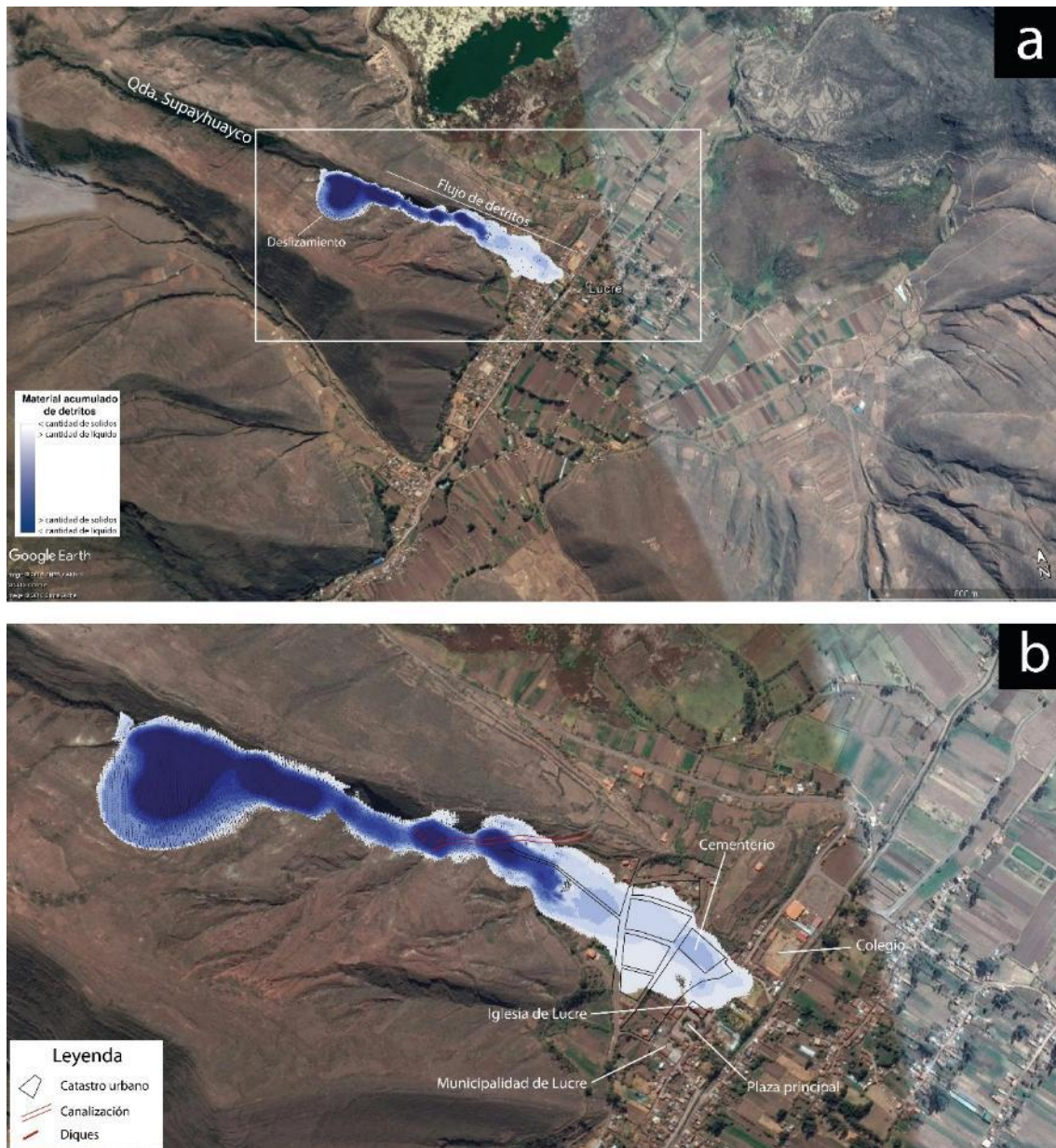


Figura 17. A) Imagen satelital Google Earth, se observa el movimiento en masa compuesto (deslizamiento y flujo de detritos) y la ubicación del distrito de Lucre. El flujo está graficado con resolución de 4cm/px. La escala de colores azules representa la distribución de material detrítico a lo largo de la Qda. Supayhuayco. En recuadro blanco se marca la zona de interés. B) Detalle de la figura A, donde se puede observar con mayor detalle el emplazamiento del movimiento en masa, invadiendo terrenos de cultivo, viviendas y lugares públicos.

- El movimiento en masa compuesto afecta un área de aproximadamente 136,375m² (~14 ha) (Figuras 17 A y B).
- Desde el punto de su partida hasta el final de su recorrido hay una distancia de ~1,125m (Figura 17 A).
- Se observa un ancho máximo de ~230m (Figura 17 A).

- Una acumulación de sólidos en mayor cantidad y potencia hasta 800m del deslizamiento (Figura 17 A).
- Invasión de campos de cultivos en un área de ~26,400m² (~26 ha) (Figuras 17 A y B).
- Afectación de centro urbano en un área de 41,367 (~41 ha) (Figuras 17 A y B).

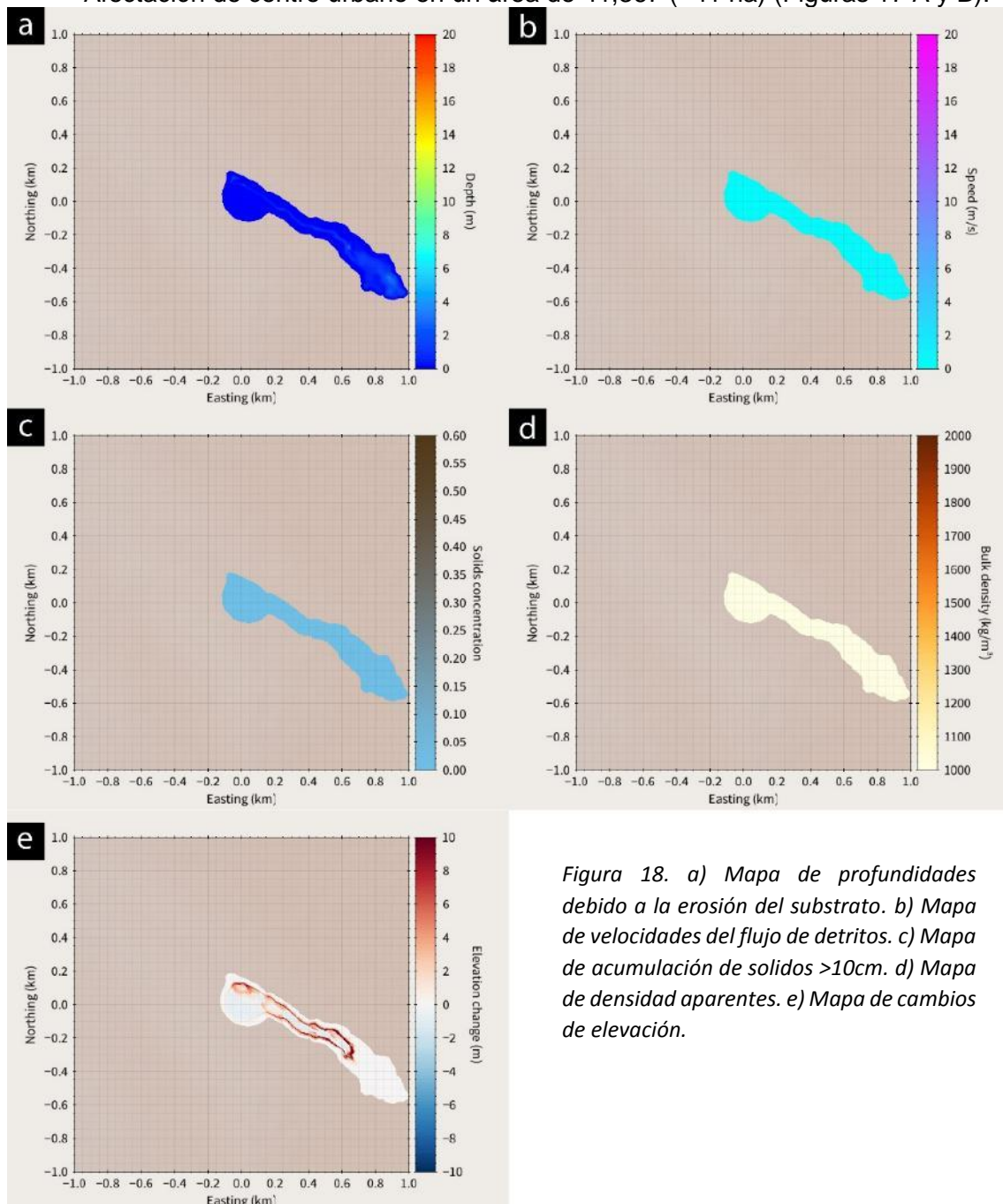


Figura 18. a) Mapa de profundidades debido a la erosión del sustrato. b) Mapa de velocidades del flujo de detritos. c) Mapa de acumulación de sólidos >10cm. d) Mapa de densidad aparentes. e) Mapa de cambios de elevación.

- Mayor profundidad de erosión en el canal y zona de acumulación, hasta ~3m. (Figura 18 a).
- Mayor velocidad del canal desde la altura del deslizamiento hasta aproximadamente las obras de prevención, llegando hasta ~5 m/s (Figura 18d).
- Concentración de sólidos a lo largo del canal hasta unos 20m al sureste de las obras de prevención. En este caso los sólidos con clasto promedio de 15 cm se acumulan en los campos de cultivo. (Figura 18c).
- La densidad aparente es prácticamente uniforme en el área afectada (1000 kg/m³) (Figura 18d).

- Cambios de elevaciones del terreno principalmente en los bordes del canal a lo largo de aproximadamente 650 m, llegando a acumular material erosionado hasta 8m encima del canal actual. De igual forma la incisión en la quebrada generaría hasta un aproximado de 1.5m en el piso del valle. (Figura 18e).

7. ANÁLISIS E INTERPRETACIONES A PARTIR DE LA SIMULACIÓN

Los resultados de los procesos de modelamiento y simulación de escenarios deben utilizarse con cautela y mucho cuidado, más aún si no se tienen los parámetros exactos, en este caso datos geotécnicos. Como se había mencionado previamente este modelo carece de mucha información necesaria como cantidad de precipitación acumulada, umbrales de precipitación, resolución topográfica de detalle, inclusión de obstáculos naturales y antrópicos (vegetación, grandes rocas, viviendas, muros, canales etc.). Considerando previamente esto, se debe señalar que la finalidad que tiene este modelo es la de representar gráficamente un escenario de movimiento en masa y su emplazamiento espacial en una zona poblada.

Haciendo un análisis de los resultados, se debe mencionar lo siguiente:

- El deslizamiento incrementaría su radio, debido al debilitamiento de paredes aún no agrietadas.
- El deslizamiento llegaría al piso de la quebrada en <9 segundos
- El tiempo que tomaría el deslizamiento hasta convertirse en un flujo es aproximadamente 20 segundos.
- El tiempo que toma el flujo en llegar al canal de 3m de profundidad es de ~6min.
- El software no reconoce las obras realizadas en el año 2011 para proteger a la población de Lucre, esto debido a su tamaño con respecto a la resolución topográfica (30m).
- Se estima que en la parte angosta del canal, quebradas aledañas e ingreso al canal y/o dique se quede sedimentado un aproximado de 30, 000 m3.
- Estimamos que con la capacidad de 7,000 m3 del canal, este pueda almacenar dicho volumen o parte del contenido en menos de 10 min. Dependiendo sí, días previos el canal no ha estado captando material de la quebrada.
- La capacidad del canal no abastecería el volumen total, esto conllevaría a su colapsó o retener parte del flujo y rebalsar posteriormente. Cabe señalar que el canal no es paralelo a la quebrada, es oblicuo, lo que generaría un avance del flujo por encima de la obra, aumentando su velocidad por cambio de pendiente.
- A partir de este último punto la quebrada empieza a ensancharse, presentando campos de cultivos a continuación, en una longitud de 300m. En esta zona el flujo depositaría los clastos de rocas más grandes y erosionaría el piso de la quebrada con mayor fuerza.
- Antes de ingresar al área urbana, el flujo descendería a manera de inundación de detritos, con clastos muy pequeños (< 5cm) acarreado vegetación probablemente.
- En el área urbana afectaría en gran medida a cinco manzanas de viviendas, el cementerio principal, la iglesia principal y probablemente la plaza de Lucre.
- La cantidad de viviendas afectadas podría ser de hasta 70.

8. MONITOREO DEL DESLIZAMIENTO DE SUPAYHUAYCO

A partir de la primera visita de campo el 18 de junio, en coordinaciones con el gobernador local de Lucre, se sugirió un monitoreo del deslizamiento y alrededores.

Por la colaboración de la municipalidad distrital, se pudo realizar las primeras medidas con GPSD de precisión milimétrica (Figura 19 y Tabla 4). De igual forma en la segunda visita, el 23 de julio (Figura 20 y Tabla 5), los puntos ubicados y marcados fueron reemplazados con placas de metal de 1x1 m. esto con la finalidad de registrar luego de más de un mes algún cambio en el movimiento del deslizamiento y alrededores. Esta instalación también sirvió como puntos de referencia para realizar vuelos con el dron Phantom 4 Pro, con el objetivo de obtener información topográfica precisa y un ortomosaico de detalle.

Junio-2018			
ID	Este	Sur	Elevación
Punto1	203208.0970	8491566.701	3363.9230
Punto2	203163.9770	8491638.383	3369.4570
Punto3	203113.2470	8491696.259	3365.3730
Punto4	203115.5390	8491611.906	3393.0680
Punto5	-----	-----	-----
Punto6	203029.9270	8491615.267	3428.5480
Punto7	203068.7170	8491590.360	3419.5480
Punto8	202959.4740	8491581.325	3459.9920
Punto9	202926.4080	8491699.971	3437.1160
Punto10	202879.8980	8491756.078	3432.3090
Punto11	203054.2370	8491757.160	3368.8500
Punto12	203015.7680	8491780.831	3370.0360
Punto13	202941.7440	8491835.739	3373.2790
Punto14	203182.1330	8491838.216	3372.9060

Tabla 4. Coordenadas x, y, z de los puntos de control ubicados en el deslizamiento de Supayhuayco.

Julio-2018			
ID	Este	Sur	Elevación
Punto1	203208.141	8491566.703	3363.954
Punto2	203164.049	8491638.358	3369.514
Punto3	203113.325	8491696.252	3365.442
Punto4	203115.594	8491611.938	3393.108
Punto5	203071.112	8491640.217	3401.184
Punto6	203029.994	8491615.274	3428.621
Punto7	203068.692	8491590.368	3419.853
Punto8	202959.510	8491581.325	3460.063
Punto9	202926.368	8491699.940	3437.259
Punto10	202879.837	8491756.144	3432.407
Punto11	203054.284	8491757.191	3368.919
Punto12	203015.795	8491780.894	3370.170
Punto13	202941.784	8491835.774	3373.359
Punto14	203182.154	8491838.197	3373.170

Tabla 05. Coordenadas x, y, z de los puntos de control ubicados en el deslizamiento de Supayhuayco.

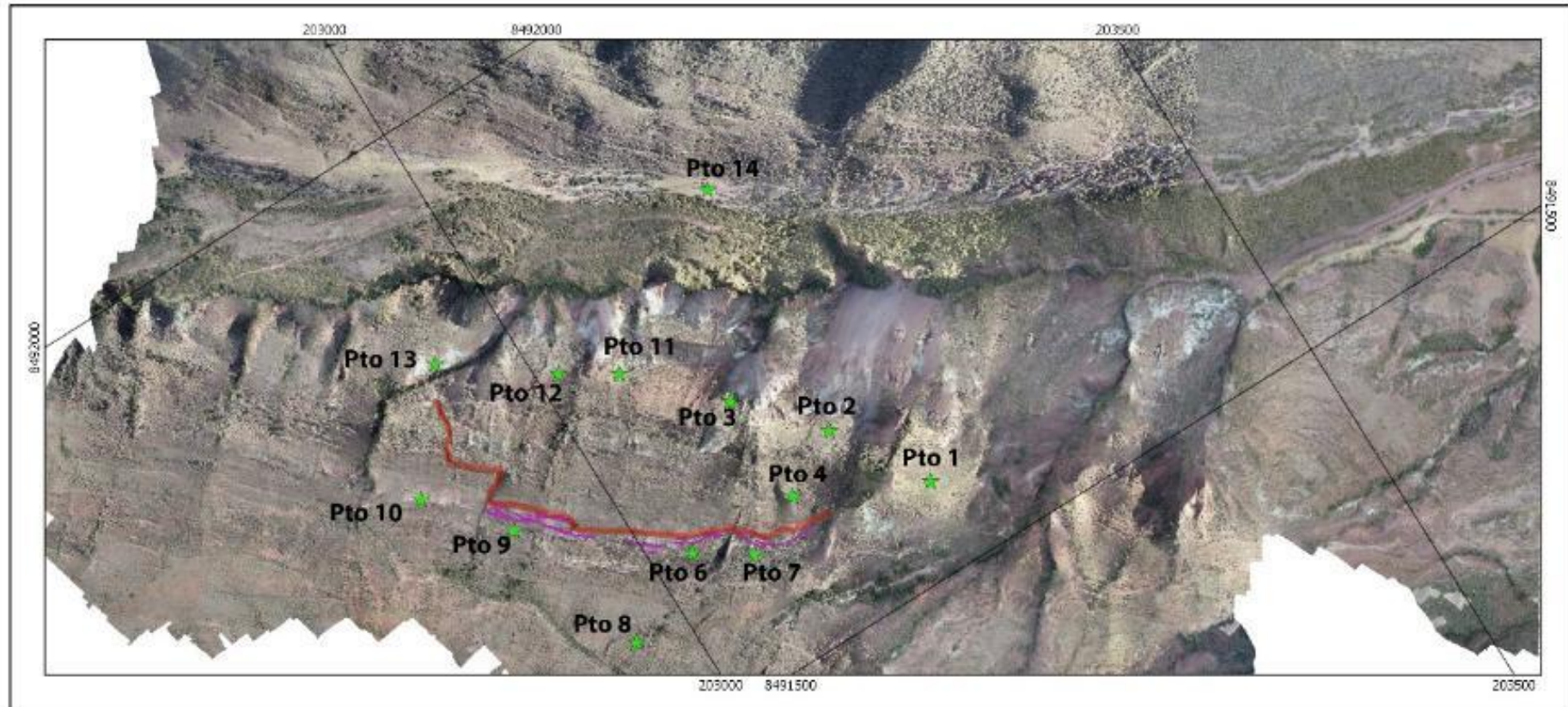


Figura 19. Ortomosaico generado por dron de la zona de estudio, con los puntos de control (estrellas verdes) medido con GPSD en el mes de junio del presente año. En línea roja se marca el escarpe del deslizamiento y en líneas fucsias se marca las grietas tensionales.

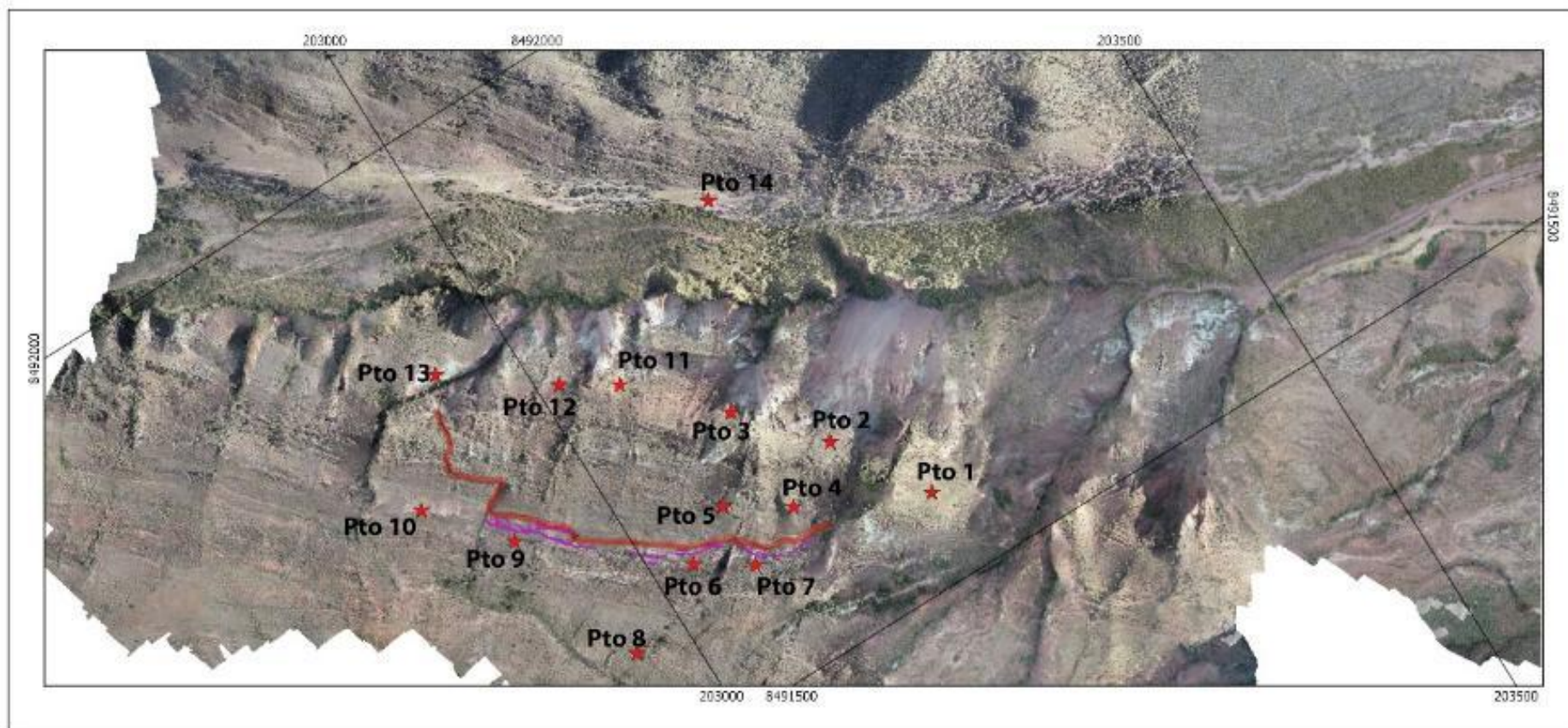


Figura 20. Ortomosaico generado por drone de la zona de estudio, con los puntos de control (estrellas rojas) medido con GPSD en el mes de julio del presente año. En línea roja se marca el escarpe del deslizamiento y en líneas fucsias se marca las grietas tensionales.

Comparación de medidas entre el 18/06 y el 23/07						
ID	Diferencia de altura	Diferencia en Y	Diferencia en X	Suma de errores	Ubicación	Movimiento
Punto1	0.0309999999999491	0.0020	0.04399999999944121	0.0770000003221867	Pie de deslizamiento	NO
Punto2	0.0570000000002437	0.0250	0.0719999999855645	0.1540000003583370	Pie de deslizamiento	NO
Punto3	0.0689999999999600	0.0070	0.0779999999795109	0.1540000011268600	Pie de deslizamiento	NO
Punto4	0.0399999999995089	0.0320	0.0549999999930151	0.1269999996497970	Cuerpo del deslizamiento	NO
Punto5	-----	-----	-----	-----	Cuerpo del deslizamiento	----
Punto6	0.0730000000003201	0.0070	0.0670000000100117	0.1469999974324310	Encima de la corona	NO
Punto7	0.3050000000002910	0.0080	0.0250	0.3379999994431270	Encima de la corona	SI
Punto8	0.0709999999999127	0.0000	0.0360	0.1070000000217990	Punto fijo detrás de la corona	NO
Punto9	0.1430000000000290	0.0310	0.0400	0.2140000013641840	Encima de la corona	NO
Punto10	0.09799999999995016	0.0660	0.0610	0.2249999996288350	Encima de la corona	SI
Punto11	0.0689999999999600	0.0310	0.0469999999913853	0.1469999994847060	Pie de deslizamiento	NO
Punto12	0.1340000000000150	0.0630	0.0269999999727588	0.2239999991234070	Pie de deslizamiento	SI
Punto13	0.0799999999999272	0.0350	0.0399999999790452	0.1549999982653390	Pie de deslizamiento	NO
Punto14	0.2640000000001240	0.0190	0.0210000000079162	0.3040000012597370	Punto fijo frente al deslizamiento	NO

Tabla 6. Tabla de resultados de diferencias en alturas y ejes x & y, donde además se muestra, suma de errores, ubicación del punto en el deslizamiento y si presenta un movimiento aparente. En colores grises se representan los valores despreciables, en azules los valores mínimos, en verdes los valores bajos, en naranjas los valores medios y en rojos los valores más importantes.

De ambas mediciones, en un tiempo de más de un mes entre una y otra se observan diferencias milimétricas a centimétricas (Tabla 5).

Es necesario mencionar que las precipitaciones pluviales continuaron durante este tiempo en la zona, incluso se observaron descensos de temperaturas muy importantes. También se debe tener en cuenta la ocurrencia de un sismo el 11/07/18 de 3.5 Mw con epicentro a una decena de kilómetros de distancia de Lucre (Fuente IGP).

De la Tabla 6 se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- Los puntos 9, 10 y 12 presentan movimientos ligeros, entre 20 y 30 cm.
- Los puntos 7 y 14 presentan valores altos de movimiento. Sin embargo, el punto 14 tuvo una dificultad de instalación del punto, por lo cual este presenta un error alto, dejando en claro que este punto es el que menos debe moverse, al no encontrarse en la zona del deslizamiento.
- El punto 7 se ubica exactamente en la zona donde el escarpe del deslizamiento es más alto (más de 7m).
- Los puntos 9 y 10 se encuentran detrás de la corona del deslizamiento, lo que podría interpretarse como una extensión en esta zona, donde existen grietas tensionales.
- El punto 12 presenta un movimiento medio. Este punto se encuentra cerca al pie del deslizamiento, en una zona donde no se veía ningún otro movimiento.

La instalación de puntos y su reemplazo con placas de metal pudieron generar hasta 2cm de error, lo cual debe usarse en futuras mediciones.

CONCLUSIONES

1. A lo largo de la quebrada Supayhuayco se observa movimientos en masa antiguos.
2. Los antecedentes indican que en esta quebrada se generaron flujos de detritos.
3. Las precipitaciones del año 2010 generaron el último flujo, a partir del cual se realizaron obras de canalización y diques disipadores de energía en la quebrada.
4. Las características geomorfológicas y geometría del deslizamiento, tipifican como de tipo translacional.
5. El deslizamiento tiene una longitud de 383m y un ancho de 170m.
6. Los perfiles swath indican escarpes de más de 7m y promedio de 3m de altura.
7. La geología local muestra rocas detríticas y porosas con capas delgadas de yesos.
8. Las porosidades moderadamente altas de las rocas, permiten su saturación en épocas de lluvias.
9. Las delgadas capas de yeso, al contener agua se comportan como superficies resbaladizas, acelerando el deslizamiento y actuando como superficies de movimiento.
10. El deslizamiento de Supayhuayco, muestra evidencias y actividad constante, lo que hace de este movimiento en masa, un peligro para las viviendas ubicadas aguas debajo de la quebrada.
11. Los procesamientos con sistemas de información geográfica (SIG) muestran rasgos o evidencias de lineamientos paralelos al escarpe principal.
12. Los SIG muestran además rasgos de formaciones de cárcavas en el cuerpo del deslizamiento y alrededores.
13. El clima actual en la zona, y las precipitaciones intermitentes en temporadas de sequías representan un peligro constante. Por otro lado, el colapso del deslizamiento podría originarse también por un sismo como el del 11 de julio.
14. La inclinación o buzamiento de las capas se muestran a favor de la pendiente y de forma paralela al movimiento en masa.
15. Actualmente la quebrada Supayhuayco no muestra evidencia de circulación de agua.
16. La topografía indica drenajes suficientemente capaces de transportar aguas superficiales que incluso podrían saturar el suelo del deslizamiento.
17. Los modelos y simulaciones nos dan una idea sobre un supuesto movimiento en masa compuesto.
18. Estos modelos nos muestran una posible afectación a cerca de 70 viviendas.
19. Las obras realizadas no parecen tener la capacidad de mitigar un eventual flujo de detritos con el volumen de masa descrito.
20. El monitoreo inicial muestra movimientos en la masa del deslizamiento en al menos cuatro puntos.

RECOMENDACIONES

A corto plazo.

1. Como recomendaciones a corto plazo, se requiere un estudio geológico a detalle.
2. Se necesitan estudios complementarios, tales como geofísica y estudios de suelos (geotecnia).
3. Se necesita contar con un especialista o especialistas que evalúen la zona constantemente por el tiempo que sea necesario.
4. Se sugiere re-procesar la información con los resultados geotécnicos para generar un escenario más próximo a la realidad.

A mediano plazo (próximos meses).

5. A mediano plazo (próximos meses) se requiere la implementación de drenajes y otras obras de prevención y/o mitigación del peligro por caída o colapso del deslizamiento.
6. A mediano plazo se debe reforestar toda la margen derecha de la quebrada Supayhuayco, usando plantas y árboles nativos (Figura 21).
7. Se sugiere realizar limpieza de canales, diques y canales, saturados en algunos casos por anteriores flujos de detritos (Figura 21).
8. Se recomienda realizar obras de balconería en el deslizamiento y alrededores (Figura 21).
9. Se recomienda implementar una zanja de coronación, para captación de aguas superficiales. Este debe ser construido a una decena de metros sobre la zona de grietas tensionales (Figura 21).
10. Se recomienda la implementación de un dissipador de energía en la desembocadura de la quebrada, con una longitud aproximada de 150m, (Figuras 21 y 22).
11. Prohibir la construcción de viviendas en la desembocadura de la quebrada Supayhuayco.
12. Evaluar la posibilidad de implementar un plan de alerta temprana.
13. Monitorear constantemente el deslizamiento y zonas aledañas, utilizando tecnología (GPSD, drones, Insar terrestre, etc.).

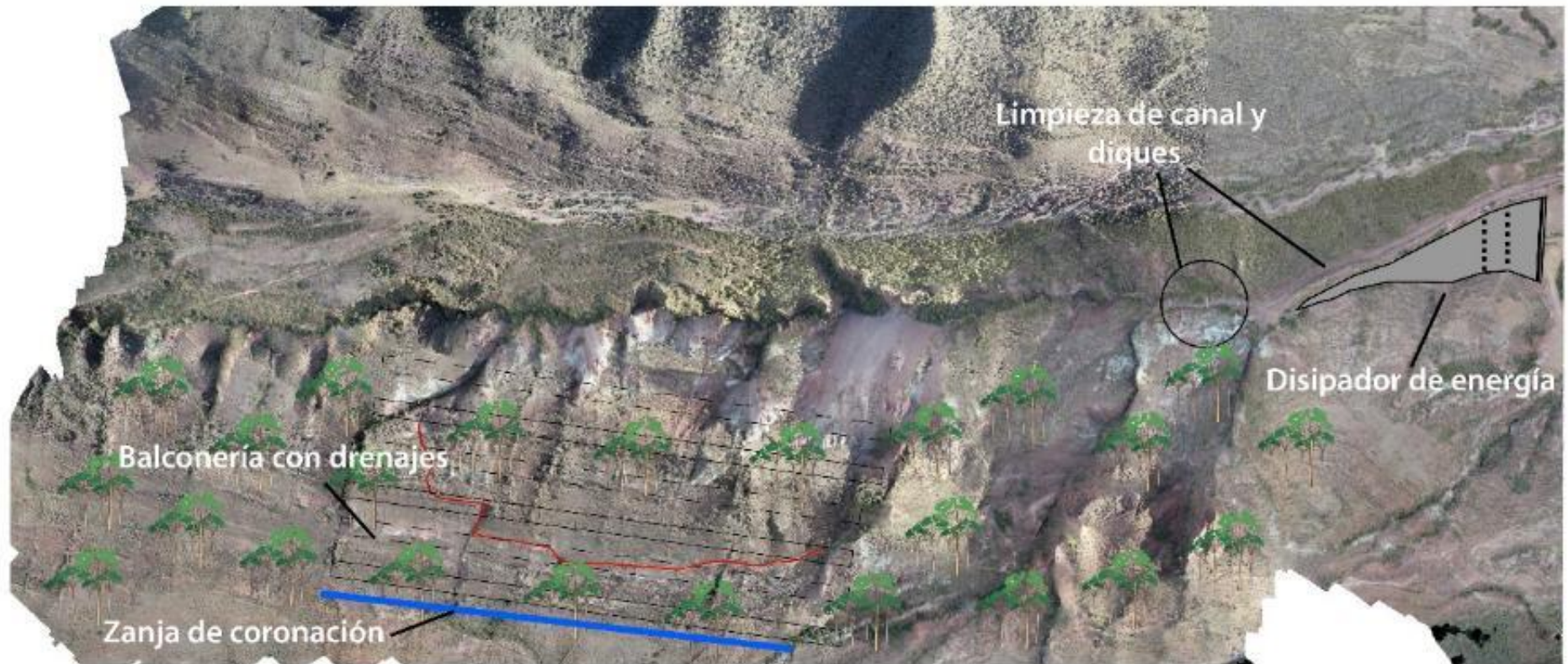


Figura 21. Obras de prevención a lo largo de la quebrada Supayhuayco.

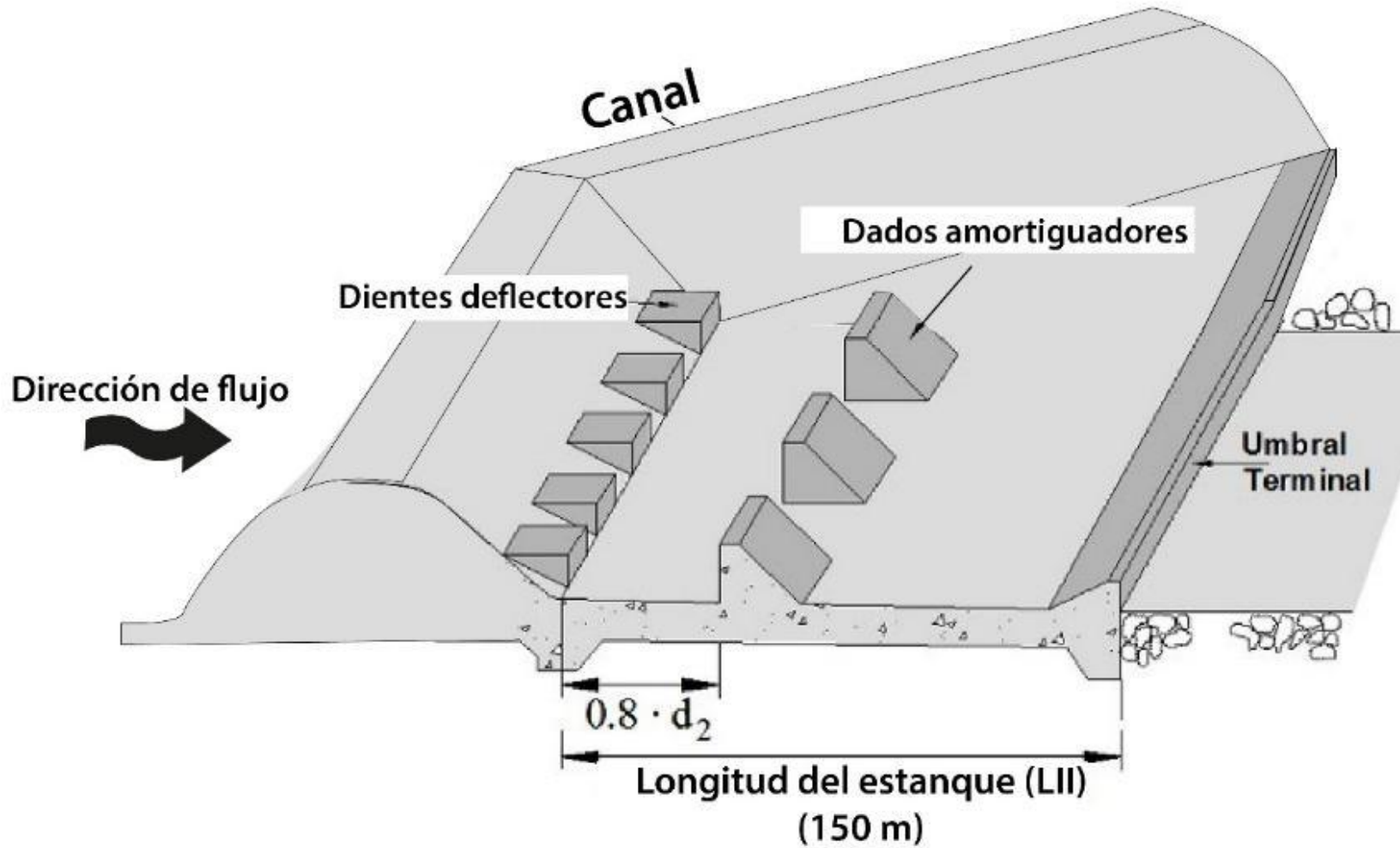


Figura 22. Ejemplo de dissipador de energía hidráulico, que debería implementarse en la desembocadura de la quebrada.

REFERENCIAS

Aguirre, E., Benavente, C., García, B., Rosell, L. (2018). Hacia un mejor entendimiento morfológico de las fallas geológicas activas: cálculo de la altura del escarpe de falla mediante imágenes de alta resolución y uso de perfiles swath. Sociedad Geológica del Perú 2018.

Braja, M. 2001. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica 2015. Cengage Learning Editores, S.A.

Carlotto, V.; Jaillard, E.; Carlier, G.; Cárdenas, J.; Cerpa, L., (2005) - Las cuencas terciarias sinorogénicas en el Altiplano y en la Cordillera Occidental del sur del Perú. En: Arce, J., ed. Alberto Giesecke Matto. Lima: Sociedad Geológica del Perú, Volumen Especial 6, p. 103-126.

Carlotto, V. (2002) - Évolution andine et raccourcissement au niveau de Cusco (13-16°S), Pérou: enregistrement sédimentaire, chronologie, controles paléogéographiques, évolution cinématique. Thèse Docteur, Université de Grenoble I, 203 p., Geologie Alpine, Mémoire H.S., 39.

Carlotto, V. (1998) - Évolution andine et raccourcissement au niveau de Cusco (13-16°S), Pérou: enregistrement sédimentaire, chronologie, contrôles paléogéographiques, évolution cinématique. Thèse Docteur, Université de Grenoble I, 159 p.

Carlotto, V.; Jaillard, E.; Carlier, G. & Mascle, G. (1997b) - Las cuencas sin-orogénicas (Eoceno-Mioceno) de la terminación NO del Altiplano (Cusco). En: Congreso Peruano de Geología, 9, Lima, 1997. Resúmenes extendidos. Lima: Sociedad Geológica del Perú, p. 267-271.

Chen & Zhang, 2015. EDDA 1.0: integrated simulation of debris flow erosion, deposition and property changes. Geosci. Model Dev., 8, 829–844.

Córdova E (1986) Les couches rouges continentales de la région of Cusco. 3rd cycle Dr. Thesis, University of Pau, France

Cruden, D., Varnes, D. (1996), Landslide Types and Processes, Special Report , Transportation Research Board, National Academy of Sciences, 247:36-75

Lucas, V. (2014). Frictional velocity-weakening in landslides on Earth and on other planetary bodies. Nature Communications volume5, Article number: 3417 (2014)

Newell, T. (2016). https://www.enviro.wiki/index.php?title=File:Newell-Article_1-Table1r.jpg

PMA, 2007. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas

Vázquez, R., Capra, L., Coviello V. (2016). Controlling erosion/deposition phenomena related to lahars at Volcán de Colima, Mexico Nat. Hazards Earth Syst. Sci.,16(8), pp.1881-1895

ANEXOS



Foto 1. Instalación de puntos de control para monitoreo del deslizamiento con GPSD.



Foto 2. Instalación de puntos de control para monitoreo del deslizamiento con GPSD.