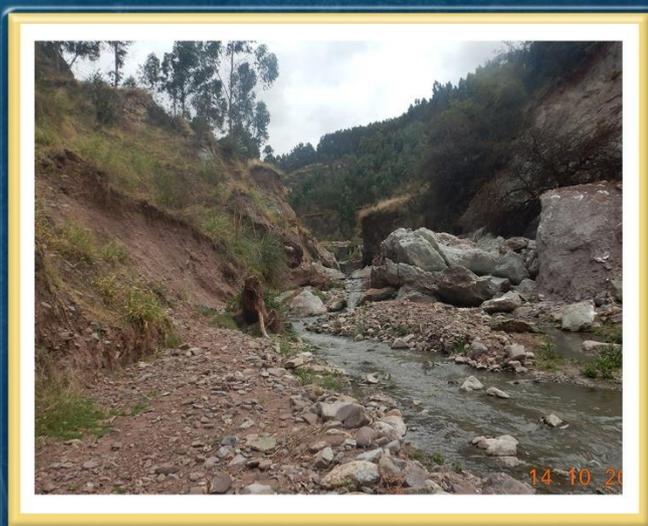


DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

**Informe Técnico N° A7145**

# EVALUACIÓN DE PELIGROS GEOLÓGICOS EN LA QUEBRADA SAPHY

Región Cusco  
Provincia Cusco  
Distrito Cusco



ABRIL  
2021

## **EVALUACIÓN DE PELIGROS GEOLÓGICOS EN LA QUEBRADA SAPHY**

*(Distrito de Cusco, provincia Cusco, región Cusco)*

Elaborado por la Dirección de  
Geología Ambiental y Riesgo  
Geológico del Ingemmet

*Equipo de investigación:*

*Guisela Choquenaira Garate*

*David Prudencio Mendoza*

### **Referencia bibliográfica**

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2021). Evaluación de peligros geológicos en la quebrada Saphy. Distrito de Cusco, provincia de Cusco y departamento Cusco. Lima: Ingemmet, Informe Técnico A7145, 45 p.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	5
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	7
<b>1.1. Objetivos del estudio</b> .....	7
<b>1.2. Antecedentes y trabajos anteriores</b> .....	7
<b>1.3. Aspectos generales</b> .....	9
1.3.1. Ubicación .....	9
1.3.2. Accesibilidad.....	10
1.3.3. Clima.....	10
<b>2. ASPECTOS GEOLÓGICOS</b> .....	10
<b>2.1. Unidades litoestratigráficas</b> .....	10
2.1.1. Formación Maras (Ki-ma).....	12
2.1.2. Formación Puquin (Ks-pu) .....	12
2.1.3. Formación Kayra (Peo-k) .....	13
2.1.4. Formación San Sebastián (Q-sa).....	13
2.1.5. Depósito Fluvial (Q-fl) .....	13
2.1.6. Depósito Aluvial (Q-al).....	13
2.1.7. Depósito Coluvio-deluvial (Q-cd).....	13
2.1.8. Plutón Diorita .....	13
<b>3. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS</b> .....	14
<b>3.1. Pendientes del terreno</b> .....	14
<b>3.2. Unidades geomorfológicas</b> .....	16
3.2.1. Geoformas de carácter tectónico degradacional y erosional.....	17
3.2.2. Geoformas de carácter depositacional y agradacional.....	18
<b>4. PELIGROS GEOLÓGICOS</b> .....	19
<b>4.1. Peligros geológicos por movimientos en masa</b> .....	19
<b>4.2. Deslizamientos</b> .....	21
4.2.1. Características visuales del evento 1 .....	21
4.2.2. Características visuales del evento 2 .....	23
<b>4.3. Erosión de ladera</b> .....	25
<b>4.4. Erosión fluvial</b> .....	28
<b>4.5. Factores condicionantes</b> .....	29
<b>4.6. Factores detonantes o desencadenantes</b> .....	30
<b>5. CONCLUSIONES</b> .....	31
<b>6. RECOMENDACIONES</b> .....	33

<b>7. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	34
<b>ANEXO 1: GLOSARIO</b> .....	35
<b>ANEXO 2: MEDIDAS DE PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN</b> .....	38

## RESUMEN

El presente informe técnico es el resultado de la evaluación de peligros geológicos por movimientos en masa, realizado en la quebrada Saphy, perteneciente a la jurisdicción de la Municipalidad Distrital de Cusco, provincia de Cusco, departamento Cusco. Con este trabajo, el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico – Ingemmet, cumple con una de sus funciones que consiste en brindar asistencia técnica de calidad e información actualizada, confiable, oportuna y accesible en geología, en los tres niveles de gobierno (distrital, regional y nacional).

Las unidades litoestratigráficas que afloran en la zona evaluada corresponden a rocas de origen sedimentario de las formaciones San Sebastián (gravas arcillosas, con clastos de areniscas, calizas y limolitas, intercalados con bancos de arenas), Puquin (lutitas negras y rojas, intercaladas con láminas de yeso y areniscas) y Kayra (areniscas intercaladas con lutitas rojas y conglomerados). Además, se tiene al intrusivo Diorítico, medianamente fracturada y moderadamente meteorizada. Estas unidades se encuentran coberturadas por depósitos coluvio-deluviales, compuesto por bloques, gravas, inmersos en matriz arena – limosa, sobre la cual se han producido reactivaciones por deslizamientos y derrumbes.

Las geoformas identificadas corresponden a las de origen tectónico-degradacional (montañas modeladas en rocas sedimentarias y lomadas modeladas en rocas intrusivas) y geoformas de carácter depositacional y agradacional principalmente originada por la ocurrencia de movimientos antiguos, que configuran geoformas de piedemonte (vertiente con depósitos de deslizamiento y coluvio – deluvial).

Los principales factores condicionantes atribuidos a la reactivación de deslizamientos y derrumbes en la quebrada Saphy son la alternancia de rocas de diferente competencia, los cual permiten mayor infiltración y retención de agua de lluvia en el terreno; presencia de substrato rocoso muy fracturado debido a la presencia de la falla Cusco. De igual modo, los suelos inconsolidados (depósitos de deslizamientos y coluvio - deluviales), dispuestos en laderas de pendientes medias (20°) a escarpadas (75°), son de fácil erosión y/o remoción ante lluvias intensas y efecto de la gravedad. Se suma a estas características la acción de las aguas de escorrentía y la presencia de agua subterránea, que saturan los terrenos; esta circulación de agua está ligado a las características estructurales del macizo rocoso (fallas y fracturas) y a los depósitos superficiales que los cubren.

Los procesos identificados en la quebrada Saphy corresponden a movimientos en masa tipo deslizamientos, derrumbes y flujo de detritos y otros peligros (erosión de ladera y erosión fluvial); eventos antiguos que han sufrido reactivaciones, como lo acontecido en el año 2020, donde se reactivaron y desplazaron (deslizamientos D1 y D2) masas de suelos y rocas hacia el cauce de la quebrada, el material estuvo compuesto por algunos bloques con diámetros de 0.7 hasta 4 m, que llegaron a obturar momentáneamente el cauce en la quebrada.

En la margen derecha de la quebrada Saphy, se observó mayor incidencia procesos por erosión de ladera en cárcavas. La zona de carcavamiento (C1) con mayor desarrollo, de prolongación suroeste - noreste, presenta reactivaciones en derrumbes. Asimismo, la cárcava C2, desarrollado sobre depositaciones de gravas arcillosas, con clastos de areniscas, calizas y limolitas, intercalados con bancos de arenas, presenta reactivación en deslizamientos. Estos eventos podrían afectar las viviendas de Los Huertos Acuña Rebatta, La Esmeralda de Santa Ana y Los Alisos. Considerando que esos procesos son los iniciadores de futuras zonas de deslizamiento o de producción de materiales para flujo de detritos (huaicos).

El área de estudio se considera como zona de **Peligro Muy Alto** a la ocurrencia de deslizamientos y derrumbes que pueden ser desencadenados en temporada de lluvias intensas o por actividad sísmica (reactivación de falla geológica Cusco); así como por flujo de detritos que pueden activarse en temporada de lluvias ocasionales y/o extraordinarias.

Finalmente, se recomienda implementar sistemas de drenaje tipo zanjas de coronación, sistemas de defensa ribereña, según el tipo de evento y magnitud. Modificar la pendiente del talud en banquetas y realizar limpieza periódica del curso de la quebrada Saphy.

## 1. INTRODUCCIÓN

El Ingemmet, ente técnico-científico desarrolla a través de los proyectos de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (DGAR) la “Evaluación de peligros geológicos a nivel nacional (ACT. 11)”, contribuye de esta forma con entidades gubernamentales en los tres niveles de gobierno mediante el reconocimiento, caracterización y diagnóstico del peligro geológico (movimientos en masa) en zonas que tengan elementos vulnerables.

Atendiendo la solicitud de la Municipalidad Provincial de Cusco según oficio N° 0084-DODC/MPC-2020, en el marco de nuestras competencias se realiza una evaluación de los eventos de tipo deslizamientos, derrumbes, erosión de ladera y erosión fluvial en la quebrada Saphy, ocurridos en junio de 2020.

La Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico del Ingemmet designó a la geóloga Guisela Choquenaira Garate, para realizar la evaluación de peligros geológicos, el 14 de octubre de 2020.

La evaluación técnica se basa en la recopilación y análisis de información existente de trabajos anteriores realizados por Ingemmet, los datos obtenidos durante el trabajo de campo (puntos de control GPS y fotografías), el cartografiado geológico y geodinámico, con lo que finalmente se realizó la redacción del informe técnico.

Este informe se pone en consideración de la Municipalidad Provincial de Cusco y entidades encargadas en la gestión del riesgo de desastres, donde se proporcionan resultados de la evaluación y recomendaciones para la mitigación y reducción del riesgo, a fin de que sea un instrumento técnico para la toma de decisiones.

### 1.1. Objetivos del estudio

El presente trabajo tiene como objetivos:

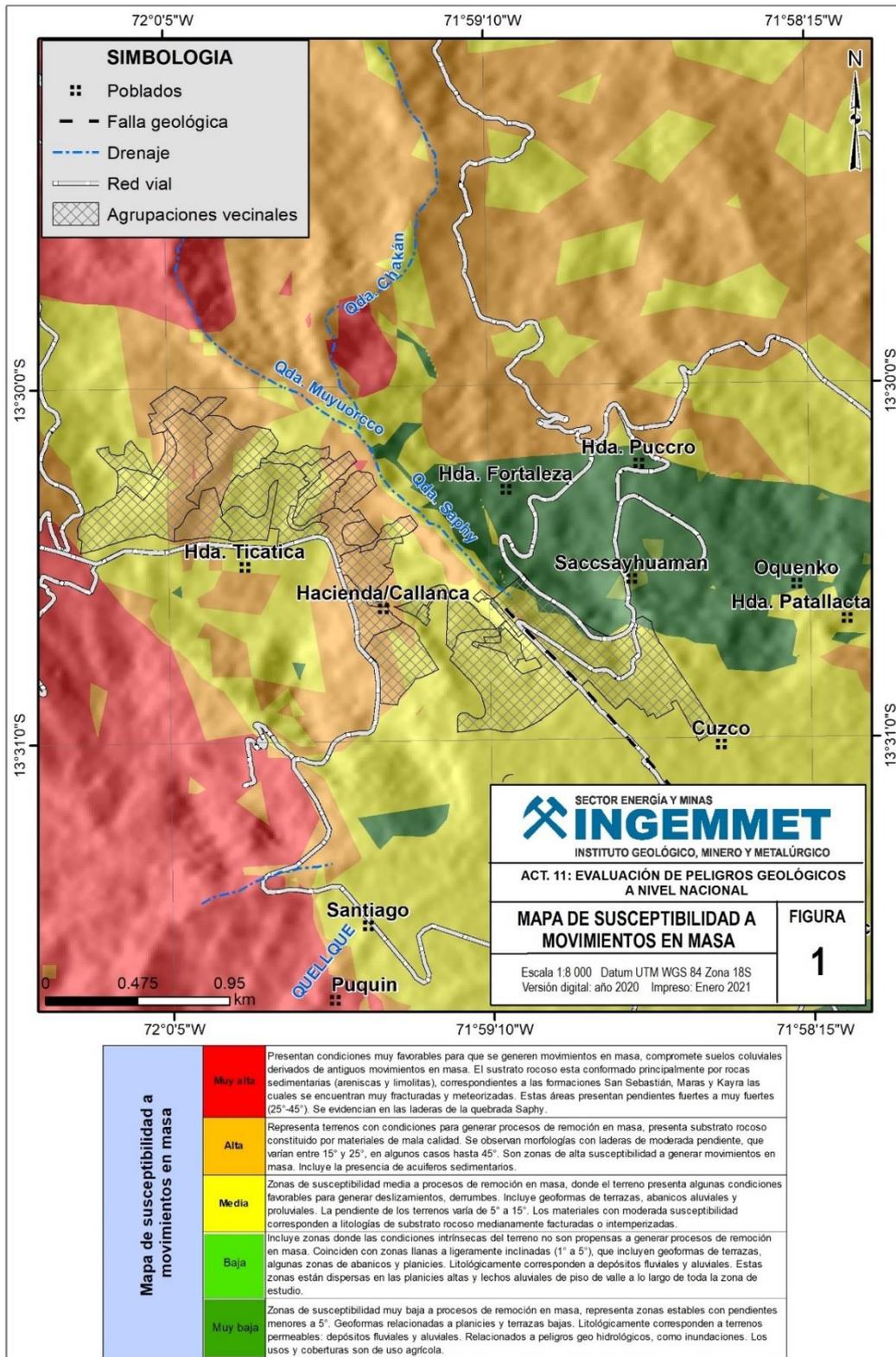
- a) Identificar, tipificar y caracterizar los peligros geológicos por movimientos en masa en la quebrada Saphy.
- b) Determinar los factores condicionantes y desencadenantes que influyen en la ocurrencia de los peligros geológicos por movimientos en masa.
- c) Proponer medidas de prevención, reducción y mitigación ante peligros geológicos evaluados en la etapa de campo.

### 1.2. Antecedentes y trabajos anteriores

Entre los principales estudios y publicaciones del Ingemmet, relacionados a temas de geología y geodinámica externa que incluyen a la quebrada Saphy, destacan los siguientes estudios:

- A) Boletín N° 74, serie C, geodinámica e ingeniería geológica: “Peligros Geológicos en la Región Cusco” (Vílchez et al., 2020); se identificó un total de 75 zonas críticas y 1682 ocurrencias de peligros geológicos, tipo: caídas, deslizamientos, flujos, procesos de erosión de laderas, erosión fluvial, reptación de suelos, inundación fluvial, movimientos complejos, hundimientos y finalmente vuelcos. Los peligros geológicos identificados en esta zona de estudio son de erosión fluvial. El estudio también realiza un análisis de susceptibilidad a movimientos en masa presentado en un mapa a escala 1: 100 000, donde la quebrada Saphy presenta media a alta susceptibilidad (figura 1).). Entendiéndose, la susceptibilidad a movimientos en masa como la propensión que

tiene una determinada zona a ser afectada por un determinado proceso geológico (movimiento en masa), expresado en grados cualitativos y relativos.



**Figura 1.** Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa en la quebrada Saphy, distrito de Cusco, provincia y región Cusco. Fuente: Vilchez, M., 2020.

B) En la “Memoria descriptiva de la revisión y actualización del cuadrángulo de Cusco-28-s (Carlotto et al., 2011); describe la geología a escala 1: 100 000, información

relacionada a los cambios más resaltantes sobre estratigrafía (formaciones Kayra, Puquin y San Sebastián). Además, señala de manera regional las unidades geomorfológicas (montañas modeladas en rocas sedimentarias) donde se ubica la quebrada Saphy.

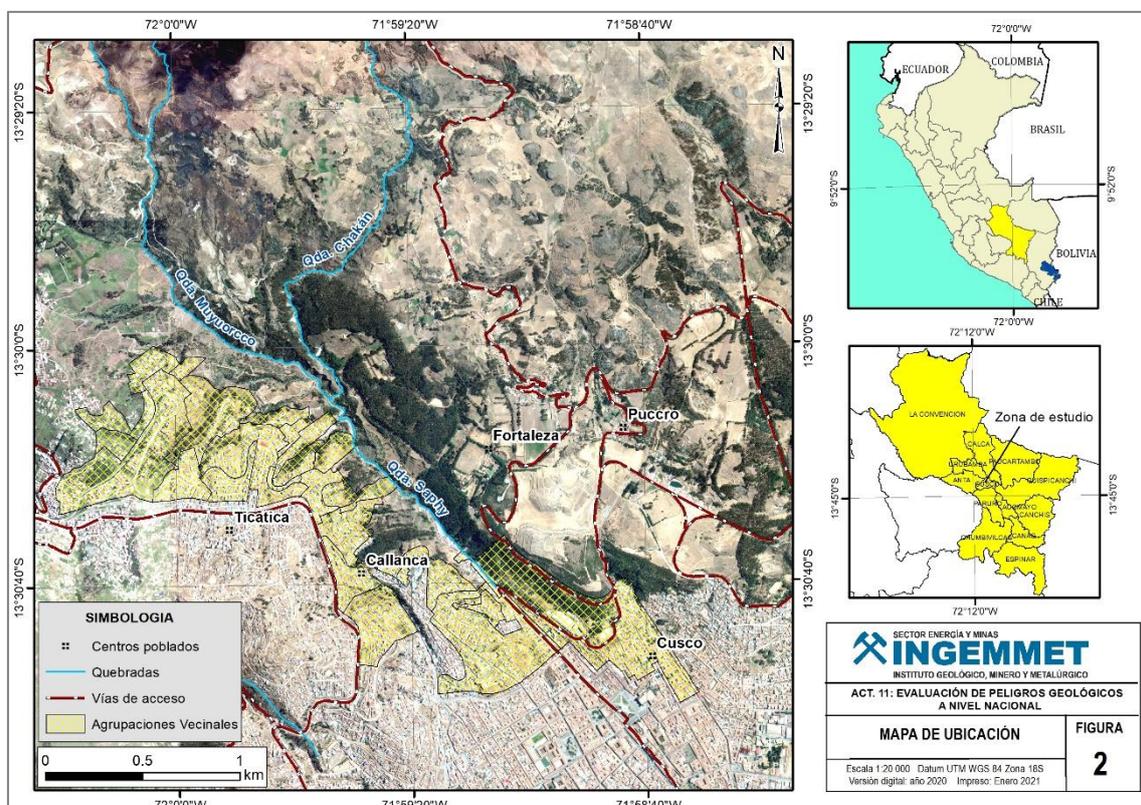
### 1.3. Aspectos generales

#### 1.3.1. Ubicación

La quebrada Saphy se ubica a 3.8 km al noroeste de la ciudad del Cusco, nace de la confluencia de las quebradas Chacán y Muyu Orcco y atraviesa la ciudad del Cusco por medio de una canalización Inca hasta la desembocadura en el río Huatanay, la cual posee una longitud de 3 km. Políticamente pertenece al distrito de Cusco, provincia de Cusco y región Cusco (figura 2); cuyas coordenadas centrales UTM (WGS84) son: 175882 E, 8505507 N, a 35310 m s.n.m. (cuadro 1).

**Cuadro 1.** Coordenadas de la quebrada Saphy.

N°	UTM - WGS84 - Zona 19L		Geográficas	
	Este	Norte	Latitud	Longitud
1	174885	8506101	-13. 49°	-72.00°
2	177004	8506101	-13. 49°	-71. 98°
3	177004	8504354	-13. 51°	-71. 98°
4	174881	8504350	-13. 51°	-72.00°
<b>COORDENADA CENTRAL DE LA ZONA EVALUADA O EVENTO PRINCIPAL</b>				
C	193200	8497400	-13.50°	-71.98°



**Figura 2.** Mapa de ubicación de la quebrada Saphy, distrito de Cusco, provincia y región Cusco.

### 1.3.2. Accesibilidad

El acceso a la quebrada Saphy, por vía terrestre desde la ciudad del Cusco, se realizó mediante la siguiente ruta (cuadro 1):

**Cuadro 2.** Rutas y accesos a la quebrada Saphy

<i>Ruta</i>	<i>Tipo de vía</i>	<i>Distancia (km)</i>	<i>Tiempo estimado</i>
Ciudad de Cusco – Campamento municipal	Asfaltada	3	5 minutos
Campamento municipal – Quebrada Saphy	Camino de herradura	2	3 minutos

### 1.3.3. Clima

De acuerdo al mapa climático de SENAMHI (2018), el clima de la quebrada Saphy es semiseco y frío, caracterizado por presentar lluvias acumuladas de 700 mm anuales en promedio y temperaturas medidas anuales de 12°C. Además, entre los meses de diciembre a marzo es frecuente las lluvias intensas, generando la reactivación de deslizamientos y derrumbes. La humedad es de tipo seco. Esta información está sustentada en la clasificación climática por el método de Thornthwaite con información meteorológica recolectada de aproximadamente 20 años.

## 2. ASPECTOS GEOLÓGICOS

El análisis geológico se desarrolló en base a la carta geológica del cuadrángulo de Cusco, hoja 28s, elaborado por Carlotto (2011), a escala 1/100 000; en la zona afloran rocas intrusivas, sedimentarias del Cretácico y depósitos Cuaternarios (coluviales, aluviales y fluviales). La cartografía geológica se complementó con trabajos de interpretación de imágenes satelitales, fotografías aéreas y observaciones de campo.

### 2.1. Unidades litoestratigráficas

Según Carlotto (2011), las unidades litoestratigráficas que afloran en la quebrada Saphy y alrededores son de origen sedimentario e intrusivo; conformado principalmente por las formaciones Maras, Puquin, Kayra, San Sebastián e intrusivo diorítico, los cuales se encuentran de mediana a muy fracturado y moderada a altamente meteorizadas. Estas unidades se encuentran cubiertas por depósitos coluvio – deluviales, aluviales y fluviales, que han sido acumulados desde el Pleistoceno hasta la actualidad (figura 3).

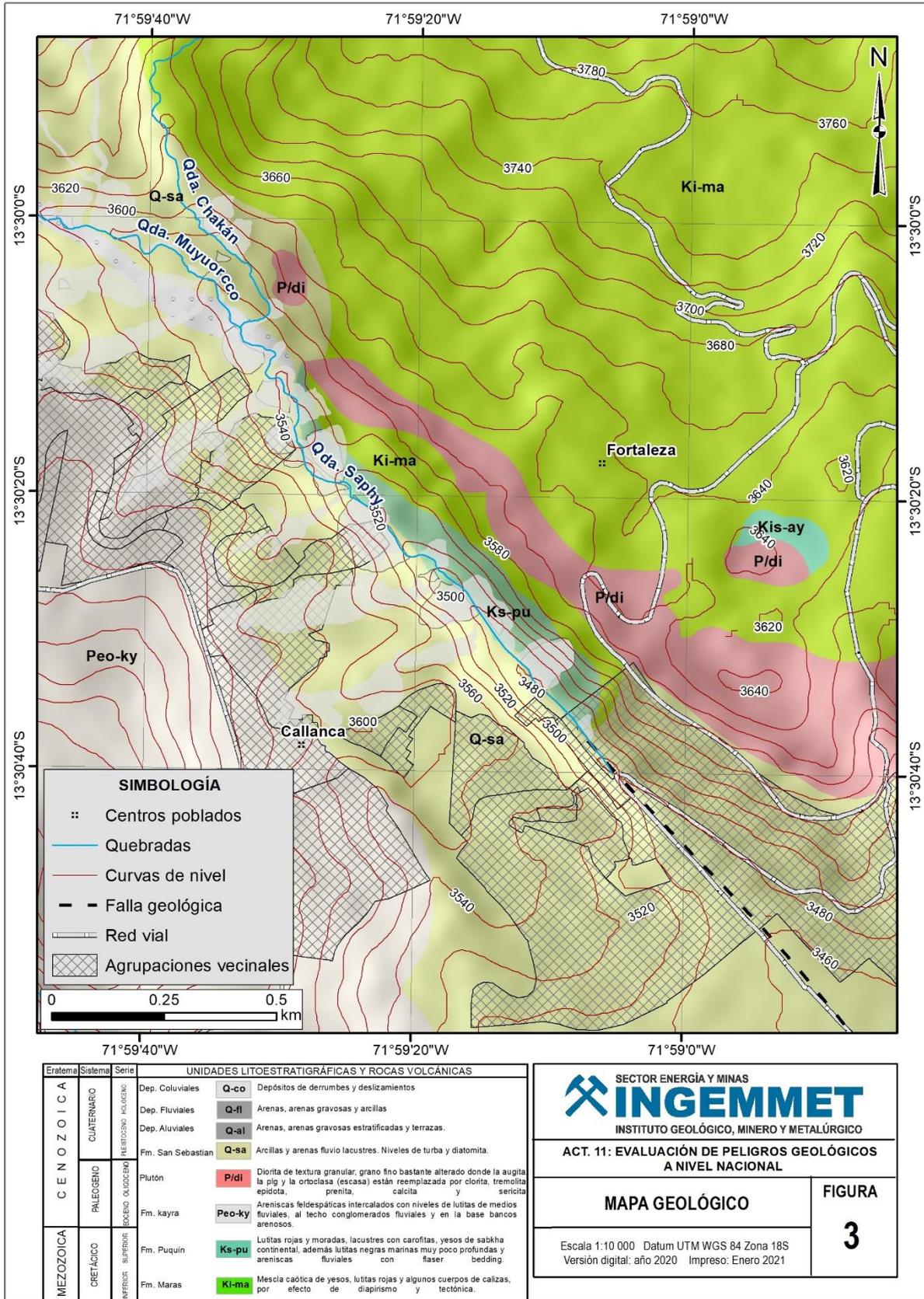


Figura 3. Mapa geológico de la quebrada Saphy. Modificado de Carlotto, 2011.

### 2.1.1. Formación Maras (Ki-ma)

Aflora al noreste de la quebrada Saphy, con mayor proporción en la parte alta y margen izquierda. Conformada por yesos intercalados con lutitas rojas y verdes y con algunos niveles de calizas color amarillo, con un espesor estimado de 200 m (Carlotto et al., 2011). Se encuentran muy fracturados y altamente meteorizados.

Según Carlotto (2003), esta unidad presenta un comportamiento geomecánico pobre, poca resistencia a la erosión, permeabilidad baja producto de la heterogeneidad de sus componentes litológicos y muy deformados. Sobre estas rocas se desarrollaron varios deslizamientos y derrumbes

### 2.1.2. Formación Puquin (Ks-pu)

Esta unidad conforma el anticlinal de Puquin y aflora en el fondo de la quebrada Saphy. Compuesta por lutitas negras y rojas, intercaladas con láminas de yeso y capas de areniscas de origen fluvial, las cuales se encuentran muy fracturadas y moderadamente meteorizadas (fotografía 2).

Según Carlotto (2003), estas rocas son consideradas de mala calidad geotécnica, ya que desarrollan deslizamientos, derrumbes y cárcavas.



**Fotografía 1.** Vista del fondo de la quebrada Saphy, conformada por lutitas negras y rojas, intercaladas con láminas de yeso y capas de areniscas muy fracturadas y moderadamente meteorizadas.

### 2.1.3. Formación Kayra (Peo-k)

Esta Formación aflora al suroeste de la quebrada Saphy y se extiende al norte de la falla Tambomachay. Conformada por areniscas muy fracturadas, intercaladas con lutitas rojas y micro conglomerados. Es una de las unidades más importantes, no solo por la extensión de los afloramientos y el espesor de sedimentos, sino porque constituye el principal acuífero de la cuenca. Son rocas que forman laderas estables y en general, son favorables para la construcción de obras civiles (Carlotto, 2008).

### 2.1.4. Formación San Sebastián (Q-sa)

Aflora ampliamente en ambas márgenes de la quebrada Saphy. Constituida por gravas arcillosas, con clastos de 8 a 10 cm de areniscas, calizas y limolitas, intercalados con bancos de arenas.

Presenta un comportamiento geomecánico muy variado, pese a la buena compactación que presentan las gravas, es afectada por las filtraciones de aguas pluviales. En esta unidad se desarrollan grandes deslizamientos (Carlotto et al., 2003).

### 2.1.5. Depósito fluvial (Q-fl)

Se encuentran dispuestos en el fondo de la quebrada Saphy, son materiales que fueron arrastrados y depositados en épocas de crecida de la quebrada, están constituido por bloques de formas subredondeados a redondeados de diversos diámetros, gravas, arenas y limos

Sobre este depósito se encuentra el Campamento Municipal.

### 2.1.6. Depósito aluvial (Q-al)

Se encuentran dispuestos en ambas márgenes del cauce de la quebrada Saphy, formando terrazas aluviales, están compuestos por bloques de formas subangulosos de calizas y areniscas, envueltos en matriz areno – arcillosa.

### 2.1.7. Depósito coluvio-deluvial (Q-cd)

Se localizan en las laderas de pendiente empinada que circunscriben la quebrada Saphy. Se originan por acción de la gravedad y son removidos por agua de escorrentía superficial (fotografía 3). Se componen de arcillas, arenas y gravas, inmersos en matriz areno arcillosa. Los clastos de las gravas tienen tamaños mayores a 10 cm y en promedio de 2 a 5 cm.

### 2.1.8. Plutón Diorita

Aflora en la margen izquierda de la quebrada, al suroeste de la quebrada Saphy corta a la Formación Maras. Es una roca maciza densa de grano fino y textura granular con cristales de augita y pequeños agregados de epidota. En la zona de estudio se encuentran medianamente fracturadas y moderadamente meteorizadas, ello favorece la formación y reactivación de deslizamientos y derrumbes, se clasifica como pórfido diorítico con augita (Carlotto *et al.*, 2011).



**Fotografía 2.** Vista de depósitos coluvio-deluviales, producto de la reactivación de un deslizamiento en la margen izquierda de la quebrada Saphy.

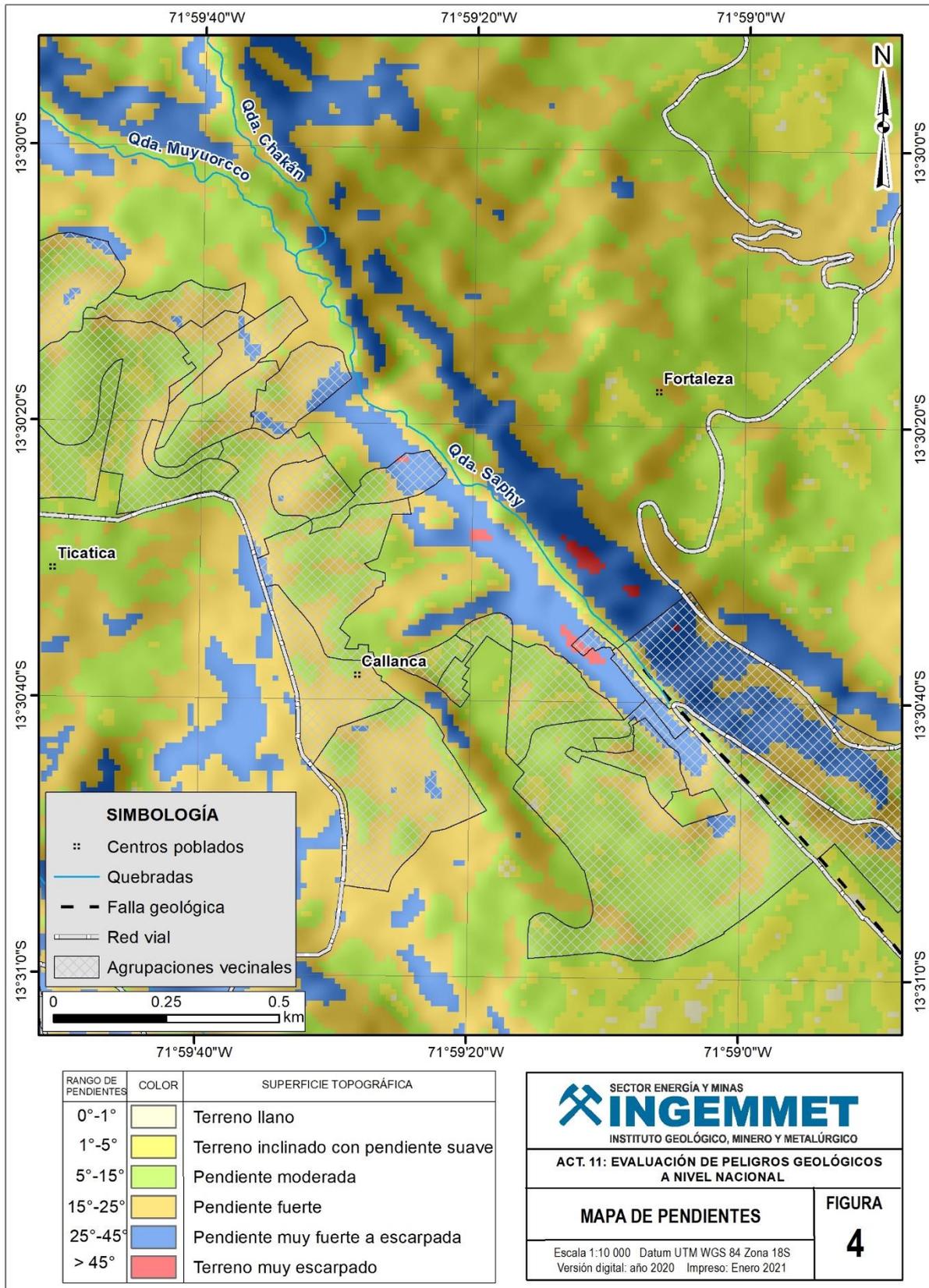
### 3. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

#### 3.1. Pendientes del terreno

La pendiente es un parámetro importante en la evaluación de procesos por movimientos en masa, actúa como factor condicionante y dinámico en la generación de movimientos en masa.

En la figura 4, se presenta el mapa de pendientes, elaborado en base a información del modelo de elevación digital de 12.5 m de resolución (USGS), donde se presentan con mayor predominio laderas y estribaciones con inclinación de pendientes que van de rangos de terrenos llanos a inclinados suavemente ( $1^{\circ}$ - $5^{\circ}$ ), con un cambio abrupto a terrenos de pendiente muy fuerte ( $25^{\circ}$ - $45^{\circ}$ ) a escarpados ( $> 45^{\circ}$ ).

En la zona baja de la quebrada Saphy las laderas presentan  $20^{\circ}$  a  $30^{\circ}$  de pendiente, mientras que, en la zona media está representada por laderas de pendientes muy escarpadas ( $70^{\circ}$ ), lo que facilita el escurrimiento superficial del agua de precipitación pluvial y el arrastre del material suelto disponible en las laderas.



**Figura 4.** Mapa de pendientes de la quebrada Saphy, distrito de Cusco, provincia de Cusco y región Cusco. Elaboración propia.

### 3.2. Unidades geomorfológicas

Para la caracterización de las unidades geomorfológicas en el área de estudio (figura 5), se consideraron criterios de control como: la homogeneidad litológica y caracterización conceptual en base a aspectos del relieve en relación a la erosión, denudación y sedimentación (Vílchez et al., 2020).

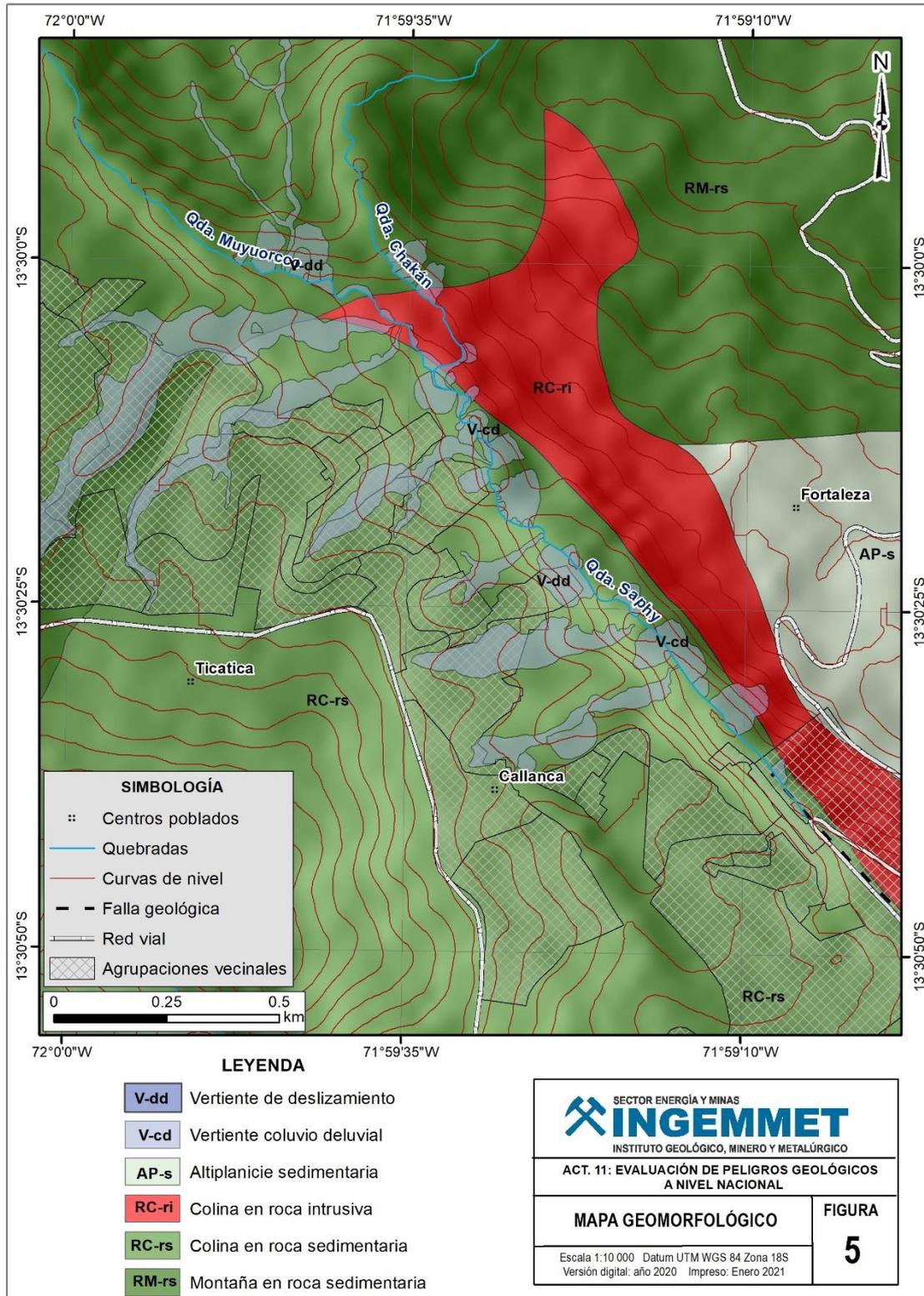


Figura 5. Mapa geomorfológico de la quebrada Saphy. Adaptado de Vílchez et al., 2020.

### 3.2.1. Geoformas de carácter tectónico degradacional y erosional

Están representadas por las formas de terreno resultados del efecto progresivo de procesos morfodinámicos degradacionales sobre los relieves iniciales originados por la tectónica, estos procesos conducen a la modificación parcial o total de estos a través del tiempo geológico y bajo condiciones climáticas cambiantes (Villota, 2005).

#### 3.2.1.1. Unidad de montañas

Tienen una altura de más de 300 m con respecto al nivel de base local; según el tipo de roca que las conforma y los procesos que han originado su forma actual, se diferencia las siguientes subunidades:

**Subunidad de montañas en rocas sedimentaria (RM-rs):** Relieve modelado en rocas sedimentarias de las formaciones Maras, Kayra, Puquin y San Sebastián; compuestos por micro conglomerados, areniscas, yesos, lutitas y limolitas, presentan elevaciones de terrenos producto de la tectónica, con pendientes medias ( $20^\circ$ ) a fuerte ( $70^\circ$ ), y procesos denudativos tipo erosión, determinado por la lluvia-escorrentía (figura 6). Esta caracterizado por una topografía accidentada de cimas subredondeadas a alargadas.



**Figura 6.** Vista al suroeste de la quebrada Saphy, la unidad de montaña en roca sedimentaria y la unidad de colina en roca sedimentaria.

### 3.2.1.2. **Unidad de colinas y lomadas**

Se consideran dentro de unidad de colina a terrenos con alturas menores a los 300 m desde la base hasta la cima, provienen de aplanamientos de acción prolongada por procesos denudacionales de piedemontes y altiplanicies por su baja resistencia litológica, presenta procesos erosivos teniendo un modelado del relieve de tipo fluvio - erosional.

**Subunidad de colina en roca sedimentaria (RC-rs):** Relieve modelado en afloramientos de las formaciones Kayra y San Sebastián, cuyas laderas presentan pendientes medias (5° - 15°), resultado de la degradación de antiguos piedemontes, por procesos de erosión de ladera, derrumbes y deslizamientos.

**Subunidad de colina en roca intrusiva (RC-ri):** Relieve modelado sobre el Plutón diorítico, donde se observan cimas estrechas y agudas, con pendientes medias (20°) a muy fuertes (65°).

### 3.2.2. **Geoformas de carácter depositacional y agradacional**

Están representadas por formas de terreno resultados de la acumulación de materiales provenientes de los procesos denudativos y erosionales que afectan las geoformas anteriores, aquí se tienen:

#### 3.2.2.1. **Subunidad de vertiente de deslizamiento**

Corresponde a las acumulaciones de laderas originadas por procesos de movimientos en masa, antiguos y recientes, que pueden ser del tipo deslizamientos, avalancha de rocas y/o movimientos complejos. Generalmente su composición litológica es homogénea; con materiales inconsolidados a ligeramente consolidados, de corto a mediano recorrido. Su morfología es usualmente convexa y su disposición semicircular a elongada en relación a la zona de arranque o despegue del movimiento en masa.

Esta geoforma se observó en ambas márgenes de la quebrada Saphy, conformado por bloques subangulosos, inmersos en matriz areno arcillosa.

#### 3.2.2.2. **Subunidad de vertiente coluvio - deluvial**

Son depósitos inconsolidados, localizados al pie de las laderas que circunscriben la quebrada Saphy, resultantes de la acumulación de material caído desde las partes altas, por acción de la gravedad y por agua de escorrentía superficial (figura 7). Su morfología es usualmente convexa y su disposición semicircular a elongada en relación a la zona de arranque o despegue del movimiento en masa



**Figura 7.** Unidad de vertiente o piedemonte coluvio-deluvial, conformada por depósitos de derrumbes recientes y antiguos dentro de la quebrada (V-cd).

#### **4. PELIGROS GEOLÓGICOS**

Los peligros geológicos reconocidos en la zona evaluada, corresponden a movimientos en masa de tipo deslizamientos, flujos (flujos de detritos o huaicos) y caídas (derrumbes) (Proyecto Multinacional Andino: GCA, 2007). Estos procesos son resultado del proceso de modelamiento del terreno, así como la incisión sufrida en los cursos de agua en la Cordillera de los Andes, que conllevó a la generación de diversos movimientos en masa, que modificaron la topografía de los terrenos y movilizaron cantidades variables de materiales desde las laderas hacia el curso de los ríos.

##### **4.1. Peligros geológicos por movimientos en masa**

La quebrada Saphy presenta una geodinámica muy activa, representada por derrumbes, deslizamientos, flujo de detritos, erosión de ladera en cárcavas y erosión fluvial (figura 8). De todos los eventos mencionados, se ha procedido a evaluar y describir detalladamente dos procesos de deslizamientos (D1-D2) y erosión de laderas en cárcavas (C1-C2)

Cabe mencionar que, la quebrada Saphy tiene antecedentes de huaicos antiguos. Además, según registros históricos, el sismo del 5 de abril de 1986, desencadenó deslizamientos, cuyo material desplazado al cauce de la quebrada generó represamiento; el desembalse se dio de forma rápida. No se registraron daños en el Centro Histórico de la ciudad de Cusco (Oviedo, 2008).

Debido a la existencia de procesos por movimientos en masa en la quebrada Saphy, esta cuenta con sistemas de defensa ribereña tipo gaviones, sistemas de drenaje y canalización, los cuales atenúan y/o evitan la reactivación de deslizamientos y derrumbes.

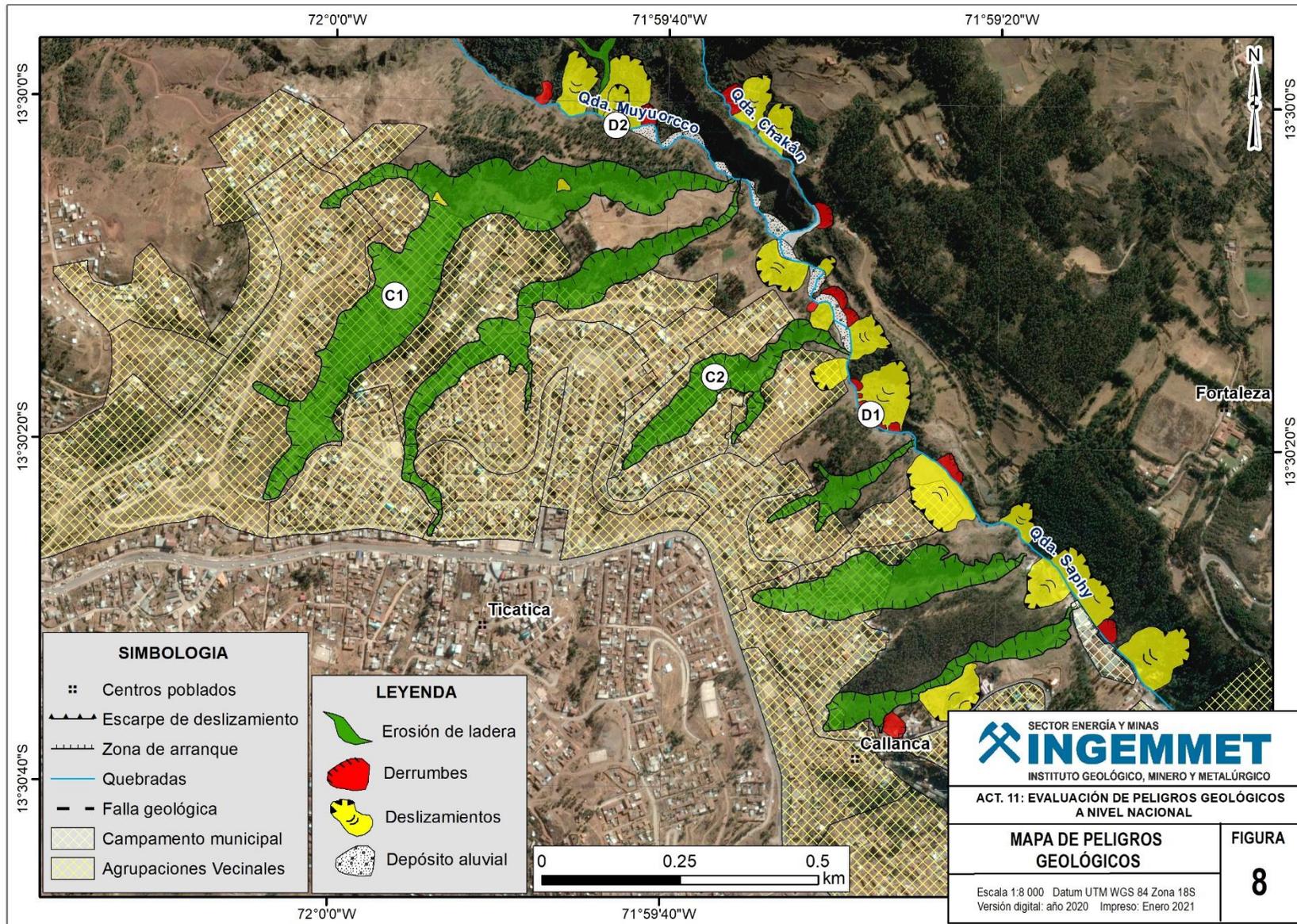


Figura 8. Cartografía de peligros geológicos de la quebrada Saphy, distrito de Cusco, provincia de Cusco y región Cusco.

## 4.2. Deslizamientos

Se identificó deslizamientos antiguos y reactivados, desarrollados en ambas márgenes de la quebrada. El substrato rocoso, sobre los que se originan estos eventos corresponden a lutitas y areniscas de la Formación Puquin; gravas arcillosas de la Formación San Sebastián y depósitos coluvio - deluviales.

A continuación, se describen a detalle los procesos por movimientos en masa reactivados, como los deslizamientos D1 y D2, suscitados en el año 2020, los cuales representan un peligro latente.

### - DESLIZAMIENTO D-1:

Evento localizado en la margen izquierda de la quebrada Saphy, a una distancia aproximada de 300 m aguas abajo de la desembocadura del río Chacán, tiene un área aproximada de 150 m<sup>2</sup>. Presenta un escarpe de forma semicircular, de 110 m de longitud y una altura de 80 m entre el escarpe y pie del deslizamiento. Producto de las lluvias intensas el deslizamiento rotacional antiguo se reactivó en caída de rocas – derrumbes, originadas sobre las laderas con 30° de inclinación, compuestas por lutitas y arcillas grises de la Formación Puquin (figura 9).

#### 4.2.1. Características visuales del evento 1

En junio del 2020, el deslizamiento reciente D1 se reactivó en caída de rocas – derrumbe (DR), este último presenta una longitud de 14 m entre la zona de arranque y pie del derrumbe y un ancho de 9 m en la zona más amplia (figura 10).

La caída de bloques presenta diámetros de hasta 4 m, depositados en el cauce de la quebrada Saphy, algunos bloques de menor dimensión llegaron a interrumpir la circulación normal de las aguas de la quebrada.

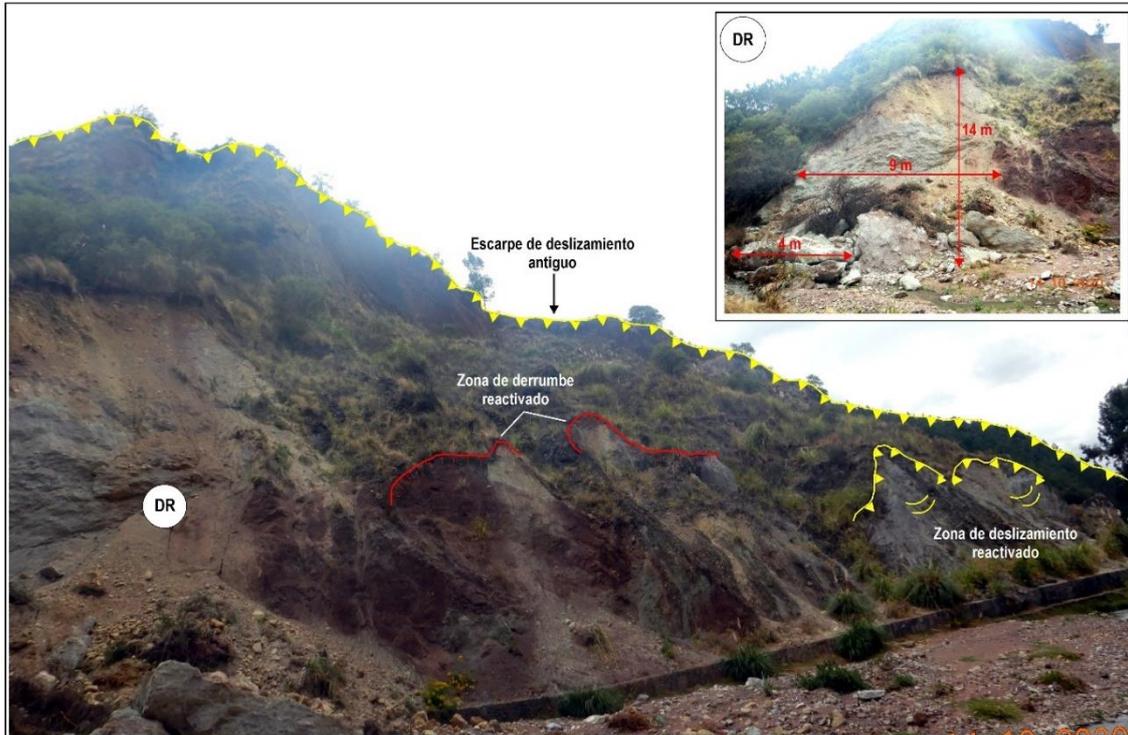
La reactivación del deslizamiento D1 tiene las siguientes características y dimensiones:

- Ancho promedio de la zona de arranque: 9 m
- Forma de la superficie de rotura: ondulada
- Diferencia de altura aproximada de la corona a la base del derrumbe: 14 m
- Dirección (azimut) del movimiento: N 225°
- Área del deslizamiento: 150 m<sup>2</sup>
- Volumen aproximado de material colapsado: 300 m<sup>3</sup>.
- Sin evidencia de represamiento alguno en la quebrada Saphy, sin embargo, se estima que, de activarse el deslizamiento rotacional antiguo podría formar un dique aproximadamente de 15 000 m<sup>3</sup>.

Cabe mencionar que, todos estos procesos, debido a lluvias intensas ocasionales, excepcionales y actividad sísmica podrían reactivarse nuevamente, el material desplazado podría represar el cauce de la quebrada, su desembalse en forma de flujo de detritos podría generar erosión en las márgenes de la quebrada (zonas que no cuentan con defensa ribereña), consecuentemente, reactivando derrumbes y deslizamiento. Este evento afectaría

el Campamento Municipal, Centro histórico de la ciudad del Cusco y viviendas asentadas en áreas circundantes a la quebrada.

De igual modo, aguas arriba del deslizamiento D1, debido a la reactivación de continuos derrumbes en la margen derecha de la quebrada (figura 11) se observó el estrechamiento del cauce de la quebrada Saphy en 1 m.



**Figura 9.** Se aprecia el deslizamiento reciente DR y el deslizamiento mayor que puede sufrir una reactivación. Con coordenadas UTM (WGS 84): 176157 E, 8505097 N a 3511 m s.n.m.



**Figura 10.** Se aprecia el deslizamiento reciente DR y el deslizamiento antiguo reactivado. Con coordenadas UTM (WGS 84): 176175 E, 850507 N a 3516 m s.n.m.



**Figura 11.** Vista de la quebrada Saphy, con estrechamiento de 1 m producto de la reactivación de derrumbes continuos. Con coordenadas UTM (WGS 84): 176134 E, 8505124 N a 3507 m s.n.m.

- Deslizamiento D2.

Evento localizado en la margen izquierda de la quebrada Muyu Orcco, a 100 m aguas arriba de la confluencia con el río Chacan. Este deslizamiento tiene un área aproximada de 122 m<sup>2</sup> producto de la reactivación de un deslizamiento antiguo. El material colapsado está compuesto por arenas y gravas de la Formación San Sebastián. En las laderas se evidencia bastante material suelto disponible, el cual podría ceder cuesta abajo y represar el cauce de la quebrada, en futuras crecidas del río podría desencadenar flujo de detritos.

4.2.2. Características visuales del evento 2

El deslizamiento D-2 se reactiva constantemente durante todo el año, coadyuvado por el material fácilmente erosionable y removible dispuesto en laderas de 70° de pendiente (figura 12).

Aguas arriba del deslizamiento, el cauce de la quebrada se encuentra canalizada y en buenas condiciones geotécnicas (fotografía 3), ello contribuye en el control de la estabilización del deslizamiento.

El deslizamiento D2 tiene las siguientes características y dimensiones:

- Ancho promedio de la zona de arranque: 3 m
- Forma de la superficie de rotura: ondulada
- Diferencia de altura aproximada de la corona a la base del derrumbe: 10 m
- Dirección (azimut) del movimiento: N 225°

- Área del deslizamiento: 122 m<sup>2</sup>
- Volumen aproximado de material colapsado: 122 m<sup>3</sup>.
- Sin evidencia de represamiento de la quebrada Muyu Orcco; sin embargo, de reactivarse y deslizarse, las masas de suelos y rocas desplazadas formarían un dique de aproximadamente 11 628 m<sup>3</sup>, pudiendo ser el desencadenante de nuevos deslizamientos que se encuentran aguas abajo.



**Figura 12.** Se aprecia las dimensiones del deslizamiento reciente D2, además del deslizamiento antiguo. Con coordenadas UTM (WGS84): 175930 E, 8505469 N a 3526 m s.n.m.



**Fotografía 3.** Vista del cauce canalizado de la cárcava que confluye a la quebrada Muyu Orcco, el cual atenúa y/o reduce la erosión fluvial en las márgenes de la quebrada referida. Con coordenadas UTM (WGS84): 175783 E, 8505419 N a 3544 m s.n.m.

### 4.3. Erosión de ladera

En la margen derecha de la quebrada Saphy hay mayor incidencia de procesos por erosión de ladera en cárcavas. Se han diferenciado e identificado dos eventos (C1 y C2).

La zona de carcavamiento (C1) con mayor desarrollo se localiza en las coordenadas UTM (175413, 8505364), de prolongación suroeste - noreste, presenta un área de 95516.01.86 m<sup>2</sup>. Trabajos en campo permitieron describirla como una cárcava alargada de pendientes escarpadas (45°). En su parte central, donde se ubica el A.P.V Portales de Tica Tica (fotografía 4) presenta aproximadamente un ancho de 85 m y una profundidad de 75 m. Si bien, la cárcava cuenta con sistemas de canalización y diques disipadores de energía, aun se evidencia deslizamientos y derrumbes. Esta zona se halla cubierta por vegetación regular.

Dentro de la zona de carcavamiento hay desarrollo de terrenos de cultivo, además vertimiento de material de desmonte sobre su cauce, lo cual condiciona y obstaculiza el cauce normal y natural de la quebrada; además, pueden comportarse como material aportante de flujo de detritos.

Es importante mencionar que, estas incisiones de cárcavas, se consideran los iniciadores de deslizamientos y otros procesos de remoción en masa, por lo que es necesario tomar en cuenta su evolución geodinámica



**Fotografía 4.** Vista de la parte media del carcavamiento C1, en sus laterales se encuentran asentadas las viviendas del A.P.V Portales de Tica Tica, además de desarrollo de terreno de cultivo, el cual podría coadyuvar en la reactivación de derrumbes y/o deslizamientos. Con coordenadas UTM (WGS84): 175761 E, 8505405 N a 3549 m s.n.m.

La zona alta de la cárcava se prolonga hasta los APVs Huasahuara – Camino real (fotografía 5). Según manifiestan los pobladores, el año 2010, la quebrada que desciende a la cárcava se reactivó, afectando viviendas y vías de acceso (calles y vía férrea).

Actualmente, el Parque multifuncional que se viene construyendo en esta zona, cuenta con diques disipadores de energía, algunos de ellos se encuentran en malas condiciones debido a la erosión (fotografía 5).

Las lluvias intensas (enero a marzo) del 2020, incrementaron el caudal en la quebrada Huasahuara, trayendo consigo la erosión y socavamiento en ambas márgenes de la quebrada, reactivando pequeños derrumbes. La actividad retrogresiva de este evento podría afectar construcciones del Parque en mención (figura 13).



**Fotografía 5.** Vista de diques transversales dañados por la erosión fluvial de la quebrada Huasahuara. Con coordenadas UTM (WGS84): 824714 E, 8504980 N a 3628 m s.n.m.



**Figura 13.** La activación de derrumbe en la margen izquierda de la quebrada Huasahuara, pone en riesgo al Mirador (824713 E, 8504988 N, 3628 m).

La zona de carcavamiento C2, se desarrolló sobre depositaciones de gravas arcillosas, con clastos de areniscas, calizas y limolitas, intercalados con bancos de arenas de la Formación San Sebastián, presenta un área de 24377.27 m<sup>2</sup>, el flujo de agua desemboca en la quebrada Saphy, generando erosión en la margen derecha.

A través del análisis de imágenes satelitales (Google Earth) disponibles desde el año 2002 se observó el proceso evolutivo del carcavamiento C2 (figura 14). Teniendo para los 2002 y 2013 la evidencia de zonas de erosión en el lateral izquierdo y para el año 2014, la activación de un deslizamiento.

Finalmente, en la imagen del año 2020, el deslizamiento ya presenta una longitud de escarpa de 17 m, un salto de 7 m y una distancia de 45 m entre el escarpe y pie del deslizamiento.

Los laterales del carcavamiento propiamente dicho, muestran reactivaciones que ponen en riesgo e inestabilidad las zonas de Los Huertos Acuña Rebatta, La Esmeralda de Santa Ana y Los Alisos, asentadas en áreas circundantes a la cárcava.

Actualmente, este proceso cuenta con las siguientes características y dimensiones:

- Ancho promedio de la cárcava: 10 m
- Profundidad de la incisión: 20 m
- Longitud de la cárcava: 400 m aproximadamente
- Dirección (azimut) de la cárcava: N 120°



**Figura 14.** Proceso evolutivo de la zona de carcavamiento C2 en un periodo de 18 años, visualizado a través de imágenes históricas del Google Earth, donde se puede apreciar el crecimiento de la cárcava y la reactivación de deslizamientos, enumeradas por la secuencia (A, B, C y D).

A: Imagen del 2002 de la quebrada Saphy a la altura de la APV. Los Huertos Acuña Rebata

B: Imagen tomada en abril del 2013.

C: Imagen tomada en mayo del 2014.

D: Imagen tomada en julio del 2020.

#### 4.4. Erosión fluvial

Este evento mostrado en la figura 15, ocurre en ambas márgenes de la quebrada Saphy, actúa como condicionante y desencadenante de los movimientos en masa. Desestabilizan los taludes y favorecen la activación y reactivación de deslizamientos y derrumbes, como se describió en los eventos D1 y D2.

Estas socavaciones responden a la poca competitividad de las rocas, saturación de los suelos por aguas pluviales, subterráneas y fuerte pendiente que presentan los taludes.



**Figura 15.** Se aprecia el desgaste del suelo por la acción del agua en líneas de color verde (erosión fluvial) y parte del deslizamiento D2 que viene siendo socavado en las crecidas del río.

#### 4.5. Factores condicionantes

##### Factor litológico-estructural

- Sustrato rocoso, compuesto por areniscas, yesos, calizas, lutitas rojas y verdosas altamente meteorizadas y muy fracturadas, condicionado por la presencia de la falla Cusco y fallas circundantes (falla Tambomachay); los cuales permiten mayor infiltración y retención de agua de lluvia al terreno, originando inestabilidad en las laderas.
- Suelos inconsolidados, conformado por depósitos coluvio-deluviales, adosados en las laderas que delimitan la quebrada Saphy, son de fácil erosión y remoción ante lluvias intensas.
- Presencia e incidencia de estructuras geológicas de la falla Cusco sobre la quedada Saphy, correspondiente al sistema Zurite-Cusco-Urcos-Sicuani.

##### Factor geomorfológico

- Las laderas que circunscriben la quebrada Saphy presentan pendientes medias (20°) a escarpadas (75°), ello permite que el material suelto disponible se erosione y se remueva fácilmente pendiente abajo por efecto de la gravedad y/o acción de las aguas de escorrentía.

##### Factor hidrológico - hidrogeológico

- Presencia de aguas de escorrentía sobre las laderas que circunscriben la quebrada Saphy.
- Presencia de agua subterránea, los cuales saturan el terreno. La circulación del agua está ligado a las características estructurales del macizo rocoso (fallas y fracturas) y a los depósitos superficiales que los cubren.

### **Otros factores antrópicos**

- Vertimiento de material de desmonte sobre el cauce de la quebrada Saphy y zonas de carcavamiento.
- Modificación del terreno para la construcción de viviendas en áreas circundantes a deslizamientos y cárcavas.
- Presencia de cobertura vegetal regular a rala, debido a la tala de árboles.

### **4.6. Factores detonantes o desencadenantes**

- Según la clasificación de SENAMHI (2018), la quebrada Saphy está caracterizada por presentar precipitaciones acumuladas de 700 mm anuales en promedio y temperaturas medidas anuales de 12°C. El año 2020, en temporada de lluvias intensas (enero a marzo), en la región cusco se dieron en el orden de 357.8 mm, periodo en que se reactivan deslizamientos y derrumbes.

Por lo que se considera como un factor desencadenante de la reactivación de deslizamiento, derrumbes y flujo de detritos. A ello se puede sumar la actividad sísmica por reactivación de fallas geológicas; además en la ciudad de Cusco se tienen antecedentes de ocurrencias de sismos de magnitud 5.4 Mw (IGP). El último ocurrido en 1986.

## 5. CONCLUSIONES

1. En la quebrada Saphy se identificó procesos de deslizamientos antiguos y reactivados, denominados (D1-D2), ocurridos sobre lutitas y areniscas de la Formación Puquin; gravas arcillosas de la Formación San Sebastián y depósitos coluvio – deluviales. El material desplazado se depositó en el cauce de la quebrada, con algunos bloques de menor dimensión que llegaron a interrumpir la circulación normal y temporal de las aguas, sin llegar a represarlo totalmente.
2. En la margen derecha de la quebrada Saphy hay mayor incidencia de procesos por erosión de ladera en cárcavas. La zona de carcavamiento (C1) con mayor desarrollo, tiene una prolongación suroeste – noreste y presenta reactivaciones de derrumbes. Por otro lado, la cárcava C2, se desarrolló sobre gravas arcillosas, con clastos de areniscas, calizas y limolitas, intercalados con bancos de arenas de la Formación San Sebastián, en la cual se presenta reactivación de deslizamientos. Estos eventos podrían afectar a las Asociaciones Pro Vivienda Los Huertos Acuña Rebatta, La Esmeralda de Santa Ana y Los Alisos, asentadas en áreas circundantes al carcavamiento. Considerando que esos procesos son los iniciadores de futuras zonas de deslizamiento o de producción de materiales para flujo de detritos (huaicos).
3. Ante lluvias intensas y/o actividad sísmica, los procesos de deslizamientos y derrumbes identificados en la quebrada Saphy podrían reactivarse nuevamente; el material desplazado podría represar el cauce de la quebrada y desembalsar en forma de flujo de detritos. Este evento afectaría el Campamento Municipal, Centro histórico de la ciudad del Cusco y viviendas asentadas en áreas circundantes a la quebrada.
4. El área de estudio se considera de Peligro Muy Alto a la ocurrencia de deslizamientos y derrumbes que pueden ser desencadenados en temporada de lluvias intensas o por actividad sísmica (reactivación de falla geológica Cusco); así como por flujo de detritos que pueden activarse en temporada de lluvias intensas y/o extraordinarias.
5. La ocurrencia de peligros geológicos por movimientos en masa en la zona evaluada está condicionada por los siguientes factores:
  - Substrato rocoso, compuesto por areniscas, yesos, calizas, lutitas rojas y verdosas altamente meteorizadas y muy fracturadas, condicionado por la presencia de la falla Cusco y fallas circundantes (falla Tambomachay); los cuales permiten mayor infiltración y retención de agua de lluvia al terreno, originando inestabilidad en las laderas.
  - Suelos inconsolidados, conformado por depósitos coluvio-deluviales, adosados en las laderas que delimitan la quebrada Saphy, son de fácil erosión y remoción ante lluvias intensas.
  - Presencia e incidencia de estructura geológica de falla Cusco sobre la quedada Saphy, correspondiente al sistema Zurite-Cusco-Urcos-Sicuni.
  - Las laderas que circunscriben la quebrada Saphy presentan pendientes medias (20°) a escarpadas (75°), ello permite que el material suelto disponible se erosione y se remueva fácilmente pendiente abajo por efecto de la gravedad y/o acción de las aguas de esorrentía.

- Presencia de aguas de escorrentía sobre las laderas que circunscriben la quebrada Saphy.
  - Presencia de agua subterránea, los cuales saturan el terreno. La circulación del agua está ligado a las características estructurales del macizo rocoso (fallas y fracturas) y a los depósitos superficiales que los cubren.
6. Se considera como factor desencadenante para la reactivación de deslizamiento, derrumbes y flujo de detritos a las lluvias intensas que se registran entre los meses de diciembre a marzo y/o actividad sísmica (reactivación de fallas geológicas).

## 6. RECOMENDACIONES

### A corto plazo:

- A. Se recomienda alertar a la población sobre el peligro latente que representan los derrumbes, erosión de laderas en cárcavas y reactivación de deslizamientos en la quebrada Saphy.
- B. Realizar un monitoreo visual y constante sobre el estado de deslizamientos y derrumbes ubicados en ambos márgenes de la quebrada Saphy.
- C. Realizar limpieza periódica del cauce de la quebrada Saphy.
- D. Prohibir y/o evitar el vertimiento de material de desmonte sobre el cauce de la quebrada Saphy y zonas de carcavamiento.
- E. Restringir la construcción de viviendas en zonas de carcavamiento y en áreas circundantes a deslizamientos.
- F. Prohibir la tala de árboles.

### A largo plazo:

- A. Implementar sistemas de drenaje superficial y subdrenaje en zonas de deslizamientos (especialmente en los deslizamientos reactivados D1 y D2) y derrumbes de la quebrada Saphy, mediante zanjas de coronación y subdrenes. El sistema de recolección de aguas superficiales debe interceptar y conducir adecuadamente las aguas de lluvia y evitar su paso por el talud; mientras, el subdrenaje reducirá las presiones intersticiales, estas medidas deben ser diseñadas por un especialista.
- B. Realizar la modificación del talud en banquetas en los deslizamientos, con el fin de estabilizarlos, para ello se debe realizar estudio de suelos y conocer el ángulo de reposo. Para ejecutar estas acciones se debe contar con profesionales capacitados.
- C. Para el control de la erosión en las zonas de carcavamiento (tratamiento integral de la cárcava) se recomienda implementar medidas de control de escorrentía, control del fondo de la cárcava y protección de la superficie del talud.
- D. Implementar sistemas de defensa ribereña en toda la quebrada Saphy según el tipo de evento y magnitud, con el fin de estabilizar los taludes inestables y evitar erosión fluvial.
- E. Prohibir el vertimiento de aguas residuales proveniente de las viviendas, hacia las cárcavas y cauce de la quebrada Saphy, puesto que ello contribuye en el proceso erosivo del suelo. Además, los canales de derivación deben conectar a cauces definido.
- F. Realizar un tratamiento de las tuberías de desagüe vertidas sobre el terreno, con el fin de evitar la sobre saturación del mismo.
- G. Reforestar las zonas desprovistas de vegetación, con el fin de estabilizar las laderas y atenuar la erosión en el suelo.



Segundo A. Núñez Juárez  
Jefe de Proyecto-Act. 11



Ing. LIONEL V. FIDEL SMOLL  
Director  
Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico  
INGEMMET

## 7. BIBLIOGRAFÍA

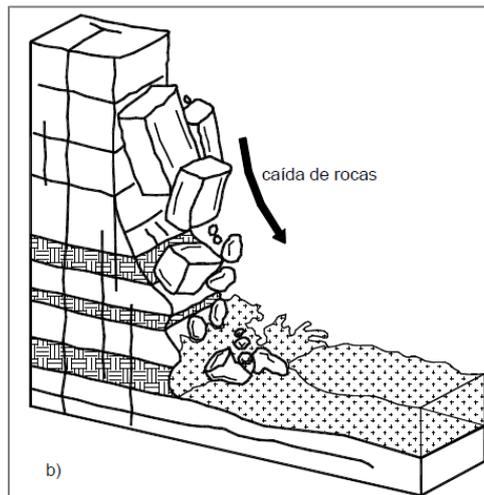
- Benavente, C.; Delgado, F.; Taípe, E.; Audin, L & Pari, W. (2013) - Neotectónica y peligro sísmico en la región Cusco. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 55, 261 p.
- Carlotto, V., Cárdenas, J. y Carlier, G. (2011) - Geología del Cuadrángulo de Cusco 28-s - 1:50 000 INGEMMET, Boletín, Serie A: 138, 258p., 6 mapas.
- Carlotto, V., Fernández Baca, C., & Casos, G. (2013) – Estudio geológico, geodinámico y análisis de estabilidad, predicción y riesgos en la quebrada Saphy. Centro Guamán Poma de Ayala 47 p.
- Cruden, D.M. & Varnes, D.J. (1996) - Landslides types and processes, en Turner, K., y Schuster, R.L., ed., Landslides investigation and mitigation: Washintong D. C, National Academy Press, Transportati3n researchs board Special Report 247, p. 36-75.
- González, L.; Ferrer, M.; Ortuño, L. & Oteo, C., eds. (2002) - Ingeniería Geológica. Madrid: Pearson Educación, 732 p.
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (2003) - Estudio de riesgos geológicos del Perú, Franja N° 3. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 28, 373 p.
- Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (2007) - Movimientos en masa en la región andina: una guía para la evaluación de amenazas. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, 432 p., Publicación Geológica Multinacional, 4.
- Rosell, L. (2018) - Estudiomorfotectónico y Paleosísmico de las Fallas Tambomachay y Qoricocha, Implicancia en el Peligro Sísmico de la Región Cusco. Tesis de grado, Ingeniería Geológica, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, 136 p.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (2020) – SENAMHI. (consulta: 03 de enero 2020). <https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>.
- Shruthi, R. B. V., Kerle, N., & Jetten, V. G. (2011) - Object - based gully feature extraction using high spatial resolution imagery. Geomorphology, 134(3-4), 260-268. DOI: 10.1016/j.geomorph.2011.07.003.
- Suárez, J. (1998) - Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Bucaramanga: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Universidad Industrial de Santander, 548 p.
- Vílchez, M. & Sosa, N. (2015) – Zonas críticas por peligros geológicos en la región Cusco. Informe técnico geología ambiental. INGEMMET, 100 p.
- Vílchez, M.; Sosa, N.; Pari, W. & Peña, F. (2020) - Peligro geológico en la región Cusco. INGEMMET. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 74, 155 p.

## ANEXO 1: GLOSARIO

En el presente Glosario se describe según los términos establecidos en el Proyecto Multinacional Andino - Movimientos en Masa GEMMA, del PMA: GCA:

**CORONA** (crown) Zona adyacente arriba del escarpe principal de un deslizamiento que prácticamente no ha sufrido desplazamiento ladera abajo. Sobre ella suelen presentarse algunas grietas paralelas o semi paralelas conocidas como grietas de tensión o de tracción.

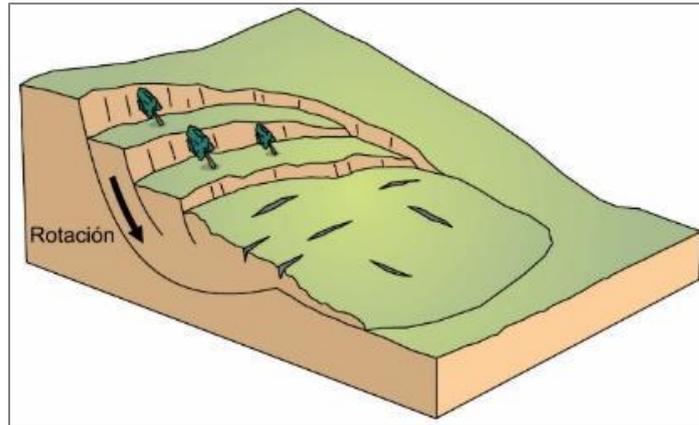
**CAIDA** (landslide) Término común para referirse a diversos tipos de movimientos en masa, particularmente caídas y deslizamientos. En Perú se utiliza este término para diferenciar un tipo de caída. La caída es un tipo de movimiento en masa en el cual uno o varios bloques de suelo roca se desprenden de una ladera, sin que a lo largo de esta superficie ocurra desplazamiento cortante apreciable (figura 16). Una vez desprendido, el material cae desplazándose principalmente por el aire pudiendo efectuar golpes, rebotes y rodamiento (Varnes, 1978). Dependiendo del material desprendido se habla de una caída de roca, o una caída de suelo. El movimiento es muy rápido a extremadamente rápido (Cruden y Varnes, 1996), es decir con velocidades mayores a  $5 \times 10^1$  mm/s. El estudio de casos históricos ha mostrado que las velocidades alcanzadas por las caídas de rocas pueden exceder los 100 m/s.



**Figura 16.** Esquema de caída de rocas. Fuente Suárez (1998).

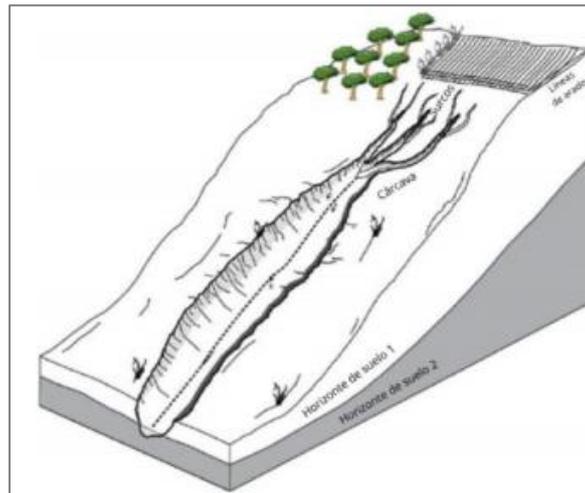
**DESLIZAMIENTO** (slide) Son movimientos de masas de roca, residuos o tierra (figura 17), hacia abajo de un talud” (Cruden, 1991), son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los humanos, causando miles de muertes y daños en las propiedades, por valor de decenas de billones de dólares cada año (Brabb y Harrod, 1989). Los deslizamientos producen cambios en la morfología del terreno, diversos daños ambientales, daños en las obras de infraestructura, destrucción de viviendas, puentes, bloqueo de ríos, etc.

Los desplazamientos en masa se dividen en subtipos denominados deslizamientos rotacionales, deslizamientos traslacionales o planares y deslizamientos compuestos de rotación. Esta diferenciación es importante porque puede definir el sistema de análisis y el tipo de estabilización que se va a emplear (Suarez J., 2009).



**Figura 17.** Esquema de un deslizamiento rotacional (tomado del Proyecto Multinacional Andino, 2007).

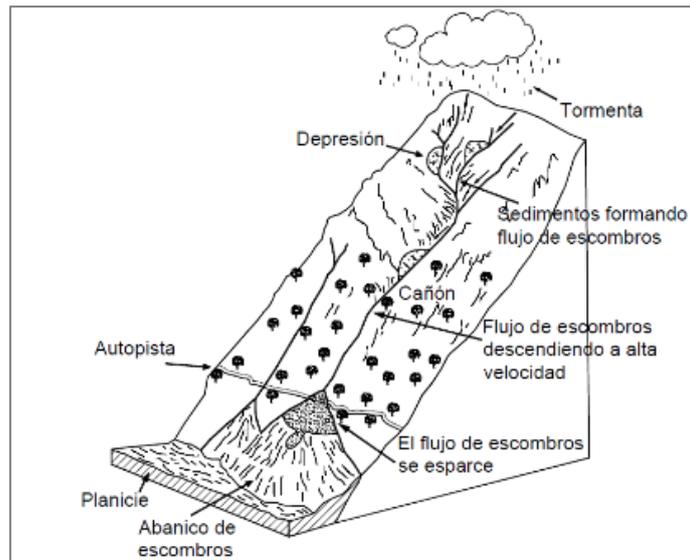
**EROSIÓN DE LADERA** Se considera dentro de esta clasificación a este tipo de eventos, porque se les considera predecesoras en muchos casos a la ocurrencia de grandes eventos de movimientos en masa. La erosión de los suelos es producto de la remoción del material superficial por acción del agua o viento. El proceso se presenta gracias a la presencia de agua en forma de precipitación pluvial (lluvias) y escorrentías (escurrimiento), que entra en contacto con el suelo (figura 18); en el primer caso por el impacto y en el segundo caso por fuerzas tractivas que vencen la resistencia de las partículas (fricción o cohesión) del suelo generándose los procesos de erosión (Duque et al, 2016).



**Figura 18.** Esquema de la formación de cárcavas originadas por profundización en surcos. Tomado y modificado de (Shruthi et al., 2011).

**ESCARPE** (scarp) sin.: escarpa. Superficie vertical o semi vertical que se forma en macizos rocosos o de depósitos de suelo debido a procesos denudativos (erosión, movimientos en masa, socavación), o a la actividad tectónica. En el caso de deslizamientos se refiere a un rasgo morfométrico de ellos.

**FLUJOS** Es un tipo de movimiento en masa que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante al de un fluido; puede ser rápido o lento, saturado o seco. En muchos casos se originan a partir de otro tipo de movimiento, ya sea un deslizamiento o una caída (Varnes 1978). Según el tipo de material y mecanismo de velocidad de desplazamiento y ocurrencia, se pueden identificar flujos de detritos, de lodo y aluviones (figura 19).



**Figura 19.** Esquema de un flujo de detritos (huaico). Fuente: Suárez J, 2009.

**FRACTURA (crack)** Corresponde a una estructura de discontinuidad menor en la cual hay separación por tensión, pero sin movimiento tangencial entre los cuerpos que se separan.

**METEORIZACIÓN (weathering)** Se designa así a todas aquellas alteraciones que modifican las características físicas y químicas de las rocas y suelos. La meteorización puede ser física, química y biológica. Los suelos residuales se forman por la meteorización in situ de las rocas subyacentes.

**MOVIMIENTO EN MASA (mass movement, landslide)** sin.: Fenómeno de remoción en masa (Co, Ar), proceso de remoción en masa (Ar), remoción en masa (Ch), fenómeno de movimiento en masa, movimientos de ladera, movimientos de vertiente. Movimiento ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras (Cruden, 1991).

## ANEXO 2: MEDIDAS DE PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN

### A. CORRECCIÓN POR DRENAJE

Unas de las técnicas más efectivas para la estabilización de laderas y taludes es el control de las aguas superficiales y subterráneas (cuadro 3). Su objetivo es controlar el agua y sus efectos, disminuyendo las fuerzas que producen el movimiento y/o aumentando las fuerzas resistentes. El drenaje y el subdrenaje generalmente son poco costosos y muy efectivos como medidas de prevención de los movimientos.

**Cuadro 3.** Métodos de drenaje y subdrenaje

Método	Ventajas	Desventajas
<b>Canales superficiales para el control de escorrentía</b>	Se recomienda construirlos como obra complementaria en la mayoría de los casos. Generalmente, las zanjas se construyen arriba de la corona del talud	Se deben construir estructuras para la entrega de las aguas y la disipación de energía.
<b>Subdrenes de zanja</b>	Muy efectivos para estabilizar deslizamientos poco profundos, en suelos saturados sub superficialmente.	Poco efectivos para estabilizar los deslizamientos profundos o los deslizamientos con nivel freático profundo
<b>Subdrenes horizontales de penetración</b>	Muy efectivos para interceptar y controlar las aguas subterráneas relativamente profundas.	Se requieren equipos especiales de perforación y su costo puede ser alto.
<b>Galerías o túneles de subdrenaje</b>	Efectivos para estabilizar los deslizamientos profundos en las formaciones con permeabilidad significativa y aguas subterráneas.	Muy costosos y complejos de construir
<b>Pozos profundos de subdrenaje</b>	Útiles en los deslizamientos profundos con aguas subterráneas. Efectivos para las excavaciones no permanentes.	Su uso es limitado debido a la necesidad de operación y mantenimiento permanente.

Fuente: Suárez, 1996.

Los sistemas más comunes para el control del agua son: •

- Zanjas de coronación o canales colectores drenaje superficial).
- Subdrenes de zanja o subdrenes interceptores. •
- Subdrenes horizontales o de penetración

**Drenaje superficial:** El objetivo principal del drenaje superficial es mejorar la estabilidad del talud reduciendo la infiltración y evitando la erosión. El sistema de recolección de aguas superficiales debe captar la escorrentía, tanto del talud como de la cuenca de drenaje arriba del talud y llevar el agua a un sitio seguro, lejos del talud que se va a proteger.

## Tipos de obra de drenaje superficial

- a. **Canales para redireccionar el agua de escorrentía:** Se debe impedir que el agua de escorrentía se dirija hacia la zona inestable.
- b. **Zanjas de corona.** Las zanjas en la corona o en la parte alta de un talud, son utilizadas para interceptar y conducir adecuadamente las aguas lluvias y evitar su paso por el talud. La zanja de la corona no debe construirse muy cerca del borde superior del talud para evitar que se convierta en activadora de un deslizamiento en cortes recientes; o en una nueva superficie de falla (movimiento regresivo) en deslizamientos activos; o se produzca la falla de la corona del talud o escarpe.
- c. **Diques en la corona del talud.** Son diques en relleno, colocados arriba de la corona, con el objeto de desviar hacia los lados las aguas de escorrentía.
- d. **Drenes Franceses.** Son zanjas rellenas de material granular grueso que tienen por objetivo captar y conducir las aguas de escorrentía.
- e. **Trinchos o Cortacorrientes.** Consisten en diques a través del talud para desviar lateralmente, las aguas de escorrentía.
- f. **Torrenteras.** Son estructuras que recogen las aguas de los canales, diques o cortacorrientes y las conducen hacia abajo del talud. Generalmente, incluyen elementos para disipar la energía del flujo del agua.
- g. **Sellado de grietas con arcilla o mortero.** El objeto es impedir la infiltración de agua hacia el deslizamiento.
- h. **Canales colectores en Espina de Pescado.** Para disminuir la infiltración de agua en las áreas grandes arriba del talud, se construyen canales colectores en Espina de Pescado, los cuales conducen las aguas colectadas fuera de las áreas vulnerables del talud, entregándolas generalmente a los canales en gradería o torrenteras. Estos canales deben impermeabilizarse adecuadamente para evitar la nuevamente la infiltración del agua

No se recomienda en problemas de taludes, la utilización de conducciones en tubería por la alta susceptibilidad a agrietarse o a taponarse, con lo cual se generan problemas de infiltración masiva concentrada.

**Subdrenaje:** Las técnicas de drenaje subterráneo o subdrenaje son uno de los métodos más efectivos para la estabilización de los deslizamientos. El drenaje subterráneo tiene por objeto disminuir las presiones de poros o impedir que éstas aumenten (figuras 20 y 21). A menor presión de poros la resistencia del suelo es mayor. El diseño de los sistemas de subdrenaje es complejo debido a que la mayoría de los taludes no son homogéneos desde el punto de vista del drenaje subterráneo y es muy difícil aplicar principios sencillos en el diseño de obras de subdrenaje. El movimiento de las aguas en los taludes por lo general, es irregular y complejo.

Elementos para tener en cuenta en el análisis de los sistemas de subdrenaje:

- Falta de continuidad de los mantos o sectores permeables.
- Cantidad de agua recolectada.
- Poco efecto del subdrenaje en el factor de seguridad.
- Poco efecto del subdrenaje cuando el nivel freático se encuentra muy cercano a la superficie de falla.
- Asentamientos en las áreas circunvecinas como efecto del subdrenaje.

- La rata de flujo para el diseño del sistema debe calcularse teniendo en cuenta la permeabilidad del suelo o la roca que se va a drenar.

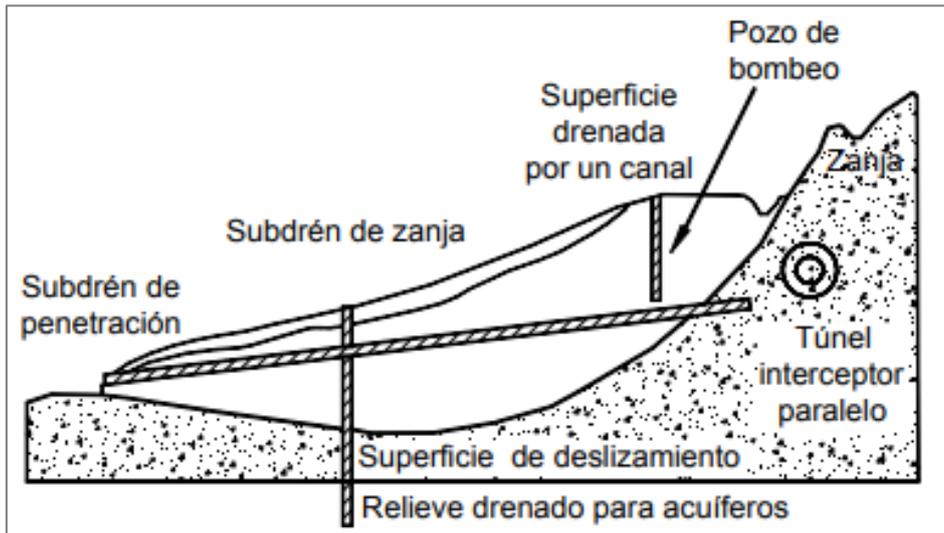


Figura 20. Sistemas de subdrenaje (Suárez, 1998).

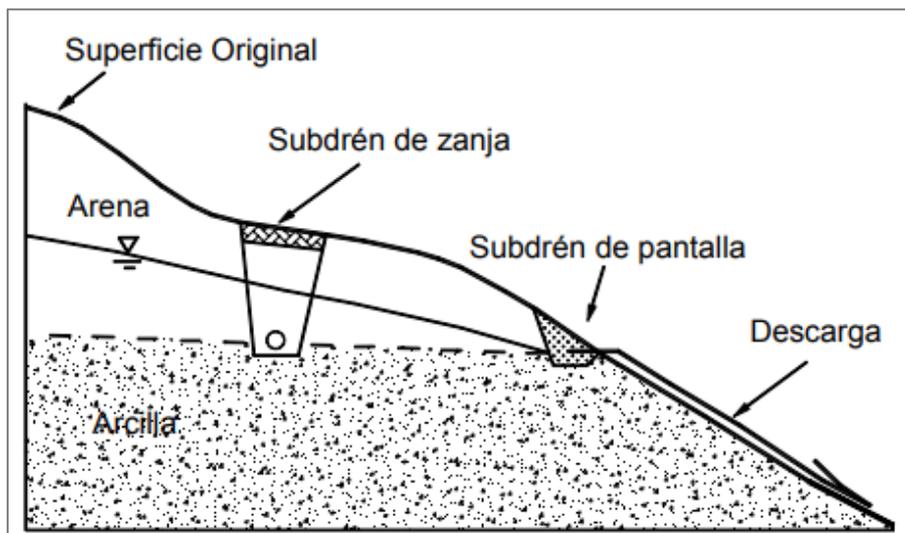


Figura 21. Esquema de un subdrenaje interceptor y un dren en el afloramiento (Suárez, 1998).

## B. CORRECCIÓN POR ELEMENTOS RESISTENTES

**MUROS RÍGIDOS** Son estructuras de contención generalmente de concreto que no permiten deformaciones importantes sin romperse (cuadro 4). Se apoyan sobre suelos competentes para transmitir fuerzas de su cimentación al cuerpo del muro y de esta forma generar fuerzas de contención. La utilización de muros rígidos es una de las formas más sencillas de manejar cortes y terraplenes. Los muros rígidos actúan como una masa relativamente concentrada que sirve de elemento contenedor de la masa inestable.

**Cuadro 4.** Ventajas y desventajas de los diversos tipos de muro rígido

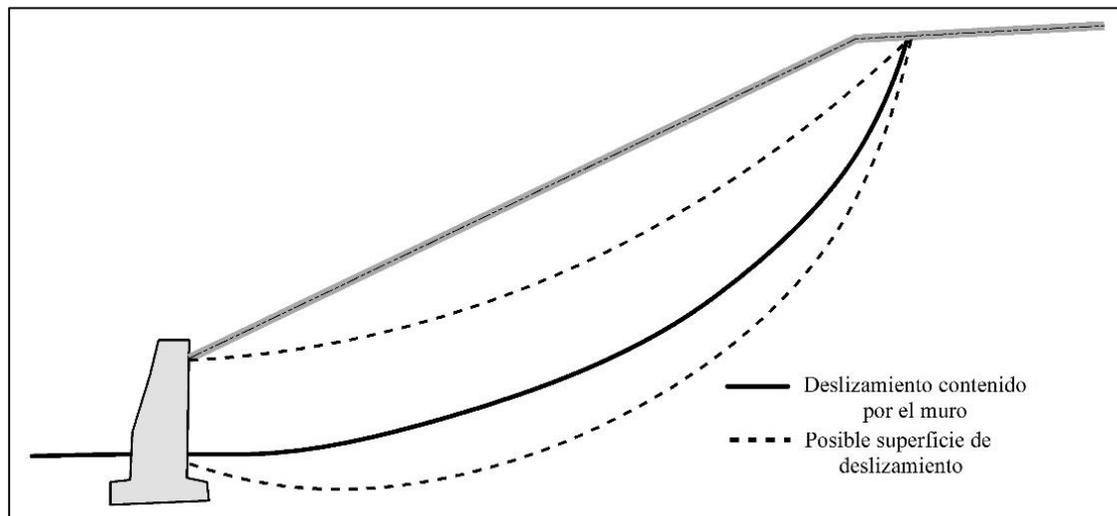
Muro	Ventajas	Desventajas
<b>Reforzado</b>	Los muros de concreto reforzado pueden emplearse en alturas grandes (superiores a ocho metros), previo su diseño estructural y estabilidad. Se utilizan métodos convencionales de construcción, en los cuales la mayoría de los maestros de construcción tienen experiencia.	Requieren de buen piso de cimentación. Son poco económicos en alturas muy grandes y requieren de formaletas especiales. Su poco peso los hace poco efectivos en muchos casos de estabilización de deslizamientos de masas grandes de suelo
<b>Concreto simple</b>	Relativamente simples de construir y mantener, pueden construirse en curvas y en diferentes formas para propósitos arquitectónicos y pueden colocarse enchapes para mejorar su apariencia exterior	Se requiere una muy buena fundación y no permiten deformaciones importantes, se necesitan cantidades grandes de concreto y un tiempo de curado antes de que puedan trabajar efectivamente. Generalmente, son poco económicos para alturas mayores de tres metros.
<b>Concreto ciclópeo</b>	Similares a los de concreto simple. Utilizan bloques o cantos de roca como material embebido, disminuyendo los volúmenes de concreto. Generalmente, son más económicos que los de concreto simple o reforzado.	Se requiere muy buena fundación. El concreto ciclópeo (cantos de roca y concreto) no puede soportar esfuerzos de flexión grandes. Se requiere la disponibilidad de bloques de roca.
<b>Concreto ciclópeo con columnas de refuerzo</b>	Combinan las ventajas de economía del concreto ciclópeo con la capacidad de flexión del concreto reforzado	Es muy poca la investigación sobre su comportamiento y no existe una metodología aceptada de diseño
<b>Mampostería o bloques de roca pegados con concreto</b>	Son muy económicos cuando hay disponibilidad de bloques de roca. Son visualmente atractivos	Se requiere muy buena fundación. Resistencia muy baja a la flexión. Son muy vulnerables a los movimientos.

Fuente: Suarez, 1996.

Los muros se emplean frecuentemente como elementos resistentes en taludes (figura 22), tiene por finalidad aumentar la resistencia al corte mediante sistemas más frecuentes como: anclajes formados por cables o barras de acero que se anclan en zonas estables del macizo; trabajan a tracción y proporcionan una fuerza contraria al movimiento y un incremento de las tensiones normales sobre la superficie de rotura.

Una contención solo puede sostener una longitud determinada de deslizamiento ya que en caso contrario el deslizamiento sobrepasa al muro. Cuando quieran sujetarse deslizamientos más largos, debe recurrirse a un sistema de muros o a otros de los procedimientos expuestos. Por todo ello, en taludes con signos evidentes de inestabilidad puede ser más apropiado realizar el muro con objeto de retener un relleno estabilizador.

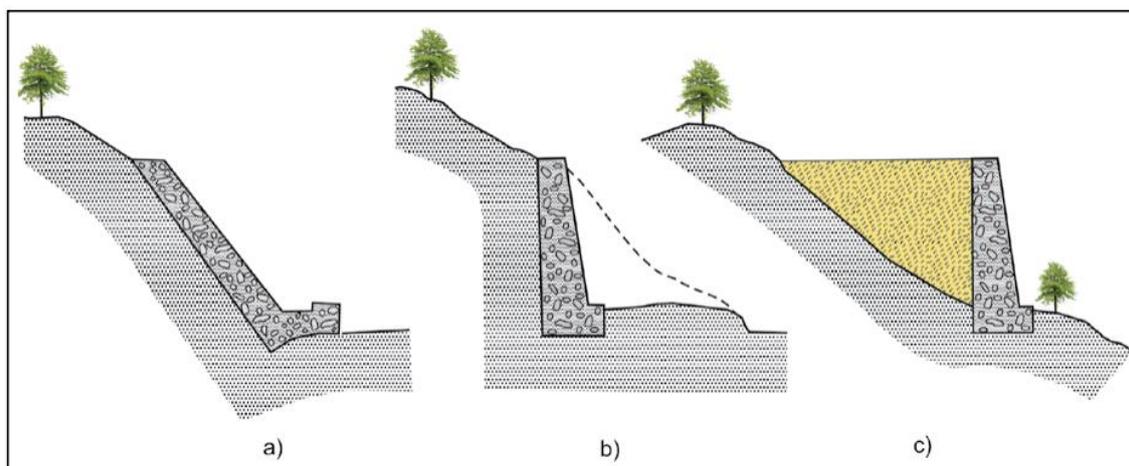
En desmontes y terraplenes en los que la falta de espacio impone taludes casi verticales, el empleo de muros resulta casi obligado. Este es un caso frecuente en la construcción de vías de transporte. En ocasiones, como en el caso de un desmonte en una ladera, puede resultar más económica la construcción de un muro, frente al coste de sobre excavación requerido si aquel no se realiza. La construcción de un muro es generalmente una operación cara. A pesar de ello, los muros se emplean con frecuencia pues en muchos casos son la única solución viable.



**Figura 22.** Contención de un deslizamiento mediante un muro.

Los muros se pueden clasificar en tres grupos (figura 23): 1) Muros de sostenimiento, los cuales se construyen separados del terreno natural y se rellenan posteriormente, 2) los muros de contención generalmente van excavados y se construyen para contener un terreno que sería probablemente inestable sin la acción del muro y 3) muros de revestimiento que consiste esencialmente en proteger el terreno de la erosión y meteorización además de proporcionar un peso estabilizador.

Cuando se proyecta un muro deberán determinarse las cargas a las que va a estar sometido y su distribución, lo que permitirá planificar una estructura capaz de resistirlas.

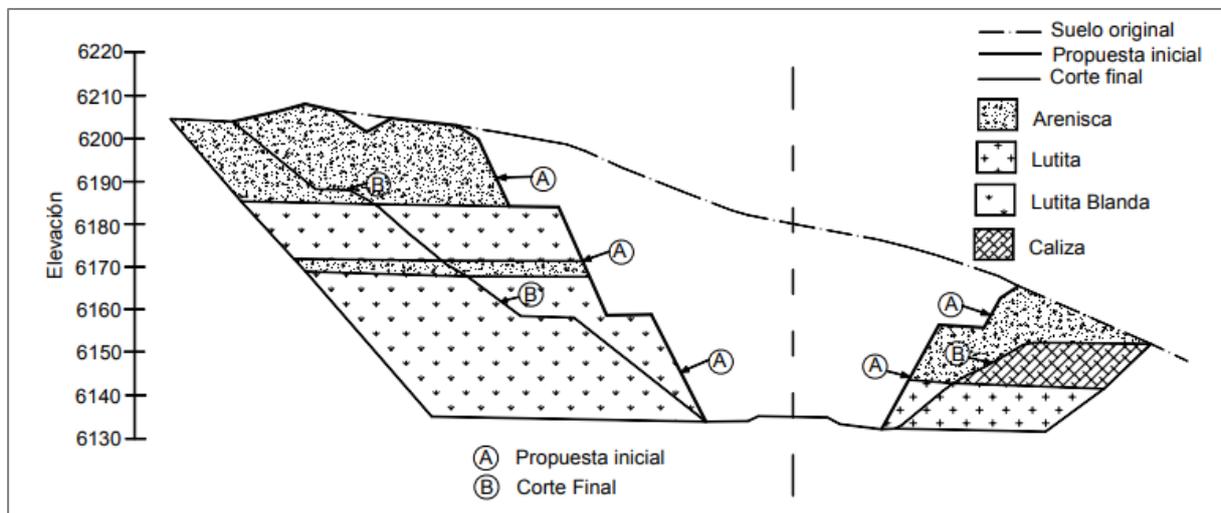


**Figura 23.** Tipo de muros: a) muro de revestimiento, b) muro de contención, c) muro de sostenimiento (Jiménez, 1976).

### C. CORRECCIÓN POR MODIFICACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL TALUD

**Abatimiento de la pendiente.** La disminución de la pendiente de los taludes es uno de los métodos más utilizados para mejorar su estabilidad y en ocasiones es la primera opción a considerar. Al igual que con otros métodos, éste no es de uso universal y su efectividad puede variar de un sitio a otro. La disminución de la pendiente puede ser efectivo en deslizamientos rotacionales, pero generalmente tiene muy poco efecto o puede tener un efecto negativo en deslizamientos de traslación.

Al disminuir la pendiente del talud, se disminuyen las fuerzas actuantes y adicionalmente el círculo crítico de falla se hace más largo y más profundo aumentándose en esta forma el factor de seguridad. El abatimiento se puede lograr por corte o por relleno (figura 24). Al disminuir la pendiente del talud debe analizarse si al bajar la pendiente no se está facilitando la activación o reactivación de fallas profundas. En todos los casos es conveniente la realización de análisis de estabilidad para determinar los efectos reales de la disminución de la pendiente.



**Figura 24.** Talud con ángulo uniforme y talud con excavado de forma escalonada con bermas y bancos (González, 2002).

Las acciones que pueden realizarse sobre la geometría de un talud para mejorar su estabilidad son las siguientes:

- Eliminar la masa inestable o potencialmente inestable. Esta es una solución drástica que se aplica en casos extremos, comprobando que la nueva configuración no es inestable.
- Eliminar el material de la parte superior (descabezamiento) de la masa potencialmente deslizante. En esta área el peso del material contribuye más al deslizamiento y presenta una menor resistencia, dado que la parte superior de la superficie de deslizamiento presenta una máxima inclinación. Por ello la eliminación de escasas cantidades de material produce aumentos importantes del factor de seguridad.

Una de las técnicas más utilizadas para la estabilización de taludes es la conformación o diseño de la morfología del talud (cuadro 5). Al modificar la forma de la superficie del talud, se puede lograr un equilibrio de masas, que reduzca las fuerzas que producen el movimiento y que aumente la longitud del círculo crítico de falla.

**Cuadro 5.** Métodos de conformación topográfica del talud

Método	Ventajas	Desventajas
<b>Remoción de materiales de la cabeza del talud</b>	Muy efectivo en la estabilización de los deslizamientos rotacionales.	En movimientos muy grandes, las masas que se van a remover tendrían una gran magnitud.
<b>Abatimiento de la pendiente</b>	Efectivo, especialmente en los suelos friccionantes.	No es viable económicamente, en los taludes de gran altura.
<b>Terraceo de la superficie</b>	Además de darle estabilidad al deslizamiento, permite construir obras para controlar la erosión.	Cada terraza debe ser estable independientemente.
<b>Colocación de bermas o contrapesos</b>	Contrarrestan el momento de las fuerzas actuantes y, además, actúan como estructura de contención.	Se requiere una cimentación con suficiente capacidad de soporte.

Fuente: Suarez, 1996.

**Terraceo del talud.** El terraceo se puede realizar con el propósito de controlar la erosión y facilitar el establecimiento de la vegetación, o para aumentar el factor de seguridad (figura 25).

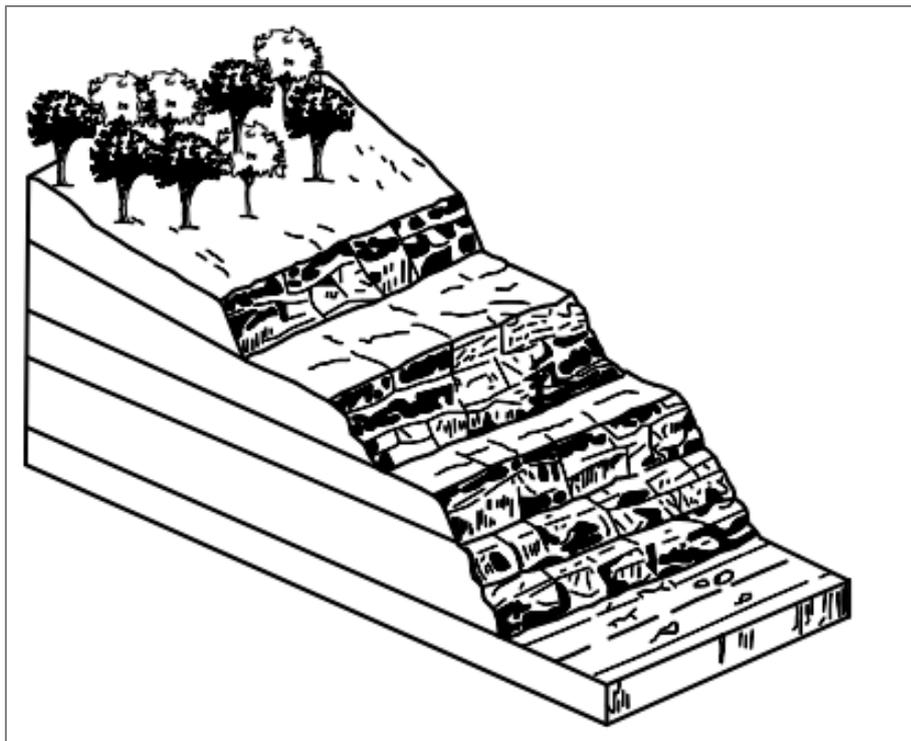
La altura de las gradas es generalmente de 5 a 7 metros y cada grada debe tener una cuneta revestida para el control del agua superficial. El sistema de cunetas a su vez debe conducir a una estructura de recolección y entrega con sus respectivos elementos de disipación de energía. Las terrazas son muy útiles para control de aguas de escorrentía. Al construir las terrazas, el talud puede quedar dividido en varios taludes de comportamiento independiente, produciéndose taludes estables.

Para el diseño de bermas y pendientes se deben tener en cuenta los siguientes criterios:

- **Formación geológica.** A mayor competencia de la roca se permiten mayores pendientes y mayores alturas. Las areniscas, calizas y rocas ígneas duras y sanas, permiten taludes casi verticales y grandes alturas. Los esquistos y lutitas no permiten taludes verticales. Se deben colocar bermas anchas en los sitios de cambios bruscos de litología.
- **Meteorización.** Al aumentar la meteorización se requieren taludes más tendidos, menores alturas entre bermas y mayor ancho de las gradas. Los materiales muy meteorizados requieren de taludes inferiores a 1H: 1V, y en la mayoría de las formaciones geológicas no se permiten alturas entre bermas superiores a 7.0 metros y requieren anchos de berma de mínimo 4.0 metros.
- **Microestructura y estructura geológica.** A menos que las discontinuidades se encuentren bien cementadas, las pendientes de los taludes no deben tener ángulos superiores al buzamiento de las diaclasas o planos de estratificación. Entre menos espaciadas sean las discontinuidades se requieren pendientes menores de talud. Para

materiales muy fracturados se requieren taludes, alturas y bermas similares a los que se recomiendan para materiales meteorizados.

- **Niveles freáticos y comportamiento hidrológico.** Los suelos saturados no permiten taludes superiores a 2H: 1V, a menos que tengan una cohesión alta.
- **Sismicidad.** En zonas de amenaza sísmica alta no se deben construir taludes semiverticales o de pendientes superiores a 1/2H:1V, a menos que se trate de rocas muy sanas.
- **Factores antrópicos.** En zonas urbanas no se recomienda construir taludes con pendientes superiores a 1H: 1V y las alturas entre bermas no deben ser superiores a 5.0 metros.
- **Elementos en riesgo.** Los taludes con riesgo de vidas humanas deben tener factores de seguridad muy altos.



**Figura 25.** Terraceo en taludes en roca con estratificación subhorizontal (Suárez, 1998).