

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

Informe Técnico N° A7487

EVALUACIÓN GEOLÓGICA DEL DESLIZAMIENTO DE AURAHUÁ

Departamento Huancavelica
Provincia Castrovirreyna
Distrito Aurahuá



EVALUACIÓN GEOLÓGICA DEL DESLIZAMIENTO DE AURAHUÁ
Distrito Aurahuá, provincia Castrovirreyna, departamento Huancavelica

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

Equipo de investigación:

Gabino Fabrizio Delgado Madera

Referencia bibliográfica

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2024). *Evaluación geológica del deslizamiento de Aurahuá, distrito Aurahuá, provincia Castrovirreyna, departamento Huancavelica*. Lima: INGEMMET, Informe Técnico N° A7487, 38 p.

INDICE

RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	5
1. ANTECEDENTES	5
2. ASPECTOS GENERALES:	6
3. CONTEXTO GEOMORFOLOGICO Y GEOLÓGICO	7
3.1. CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO:.....	7
3.2. CONTEXTO GEOLÓGICO:.....	8
4.2.1. Formación Tantara (Pe-t3)	8
4.2.2. Formación Sacsaquero	9
4.2.3. Formación Castrovirreyna - Miembro Medio (PN-cas/m4).....	10
4.2.4. Depósitos Coluviales (Qh-co)	10
4.2.5. Depósitos fluviales (Qh-fl)	10
4. PELIGROS GEOLÓGICOS	10
4.1. GENERALIDADES.....	10
4.2. ZONAS EVALUADAS	11
4.2.1. ZONA 1 (Parte alta – cabecera del deslizamiento)	12
4.2.2. ZONA 2 (masa deslizada)	15
4.2.3. ZONA 3 (Parte baja – pie del deslizamiento)	17
5. FACTORES CONDICIONANTES Y DESENCADENANTES	20
6. ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN	22
6.1. DRENAJE SUPERFICIAL.....	22
6.2. DRENAJE SUBTERRÁNEO	27
6.3. ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN:	33
7. CONCLUSIONES	35
8. RECOMENDACIONES	36
9. REFERENCIAS	38

RESUMEN

El deslizamiento Aurahuá se ubica en la margen izquierda del río Tantara, en el distrito Aurahuá, provincia Castrovirreyna y departamento Huancavelica. La zona de estudio se encuentra entre las altitudes 3200 m.s.n.m. y 4300 m.s.n.m. con temperaturas promedio anuales de 12°C y presenta lluvias intensas estacionales entre los meses de diciembre a marzo.

En cuanto al contexto geomorfológico, en la zona de estudio destacan las montañas y el valle formado por el río Tantara, las pendientes del terreno varían entre muy fuerte (25° - 45°) a muy escarpado (> 45°). Geológicamente, se identifican rocas del Paleógeno como las formaciones Tantara, Sacsaquero (M2, M3), del Paleógeno-Neógeno como la formación Castrovirreyna y los depósitos cuaternarios coluviales y fluviales.

Los peligros geológicos reconocidos dentro del deslizamiento Aurahuá fueron procesos como caídas (derrumbes), cárcavas y erosión fluvial. En la cabecera del deslizamiento Aurahuá se observa el escarpe principal que es semicircular y tiene un ancho de ~2 km, en la parte superior del escarpe se observaron grietas tensionales a lo largo de ~1 km con aberturas hasta de un metro; además en el escarpe se identificó hasta 5 eventos posteriores al evento principal. Hacia el cuerpo de deslizamiento, se observan cárcavas provocado por la escorrentía superficial, además se observa deformación en el terreno que afecta principalmente las edificaciones y el canal de riego. Finalmente, al pie del deslizamiento, se observan reactivaciones que corresponden a derrumbes y procesos de erosión fluvial producidos por el aumento de caudal del río Tantara que debilita la base del deslizamiento y ocasiona derrumbes afectando así a terrenos de cultivo.

Los factores que condicionan la reactivación de estos procesos vienen a ser el tipo de litología y la pendiente del terreno, que genera la inestabilidad en el escarpe y en el pie del deslizamiento. Como factor detonante se considera al agua proveniente de las lluvias y el riego. Por otro lado, influyen también los sismos y el factor antrópico debido a los cortes de talud para las carreteras.

De acuerdo a la evaluación se concluye que, de no controlar todos los procesos identificados en esta evaluación, el distrito de Aurahuá se encontrará en **peligro alto**. Por tal motivo, las recomendaciones se enfocaron en mejorar la gestión del agua, debido a que es el principal factor detonante, para ello se deberá utilizar diferentes sistemas enfocados al control del agua, disminuyendo las fuerzas que producen movimiento y/o aumentando las fuerzas resistentes. Se recomienda que los diseños y ejecuciones de las obras, deben de ser realizadas por personal especializado.

1. INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos son fenómenos geológicos que en el mundo causan pérdidas económicas significativas, también representan un riesgo para la vida de las poblaciones (*Froude and Petley, 2018*). A lo largo de la cordillera de los Andes se identificaron y cartografiaron deslizamientos activos y antiguos (*Geocatmin, Delgado et al., 2022*). Entre los lugares con presencia de deslizamientos se encuentra el departamento de Huancavelica.

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

En ese entender el alcalde de la Municipalidad Distrital de Aurahuá, mediante oficio N° 099-2023-MDA/A, solicitó un estudio de riesgos, específicamente realizar la evaluación de peligros geológicos por movimientos en masa en el río Accarma. El Instituto Geológico Minero y Metalúrgico – INGEMMET, por intermedio de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico – DGAR, comisionó al geólogo Gabino Fabrizio Delgado Madera, especialista en movimientos en masa, para realizar la evaluación ingeniero – geológica del área. Los trabajos se realizaron del 17 al 19 de noviembre del presente año, previa coordinación con personal de la indicada municipalidad. En dicha evaluación se contó con la participación del sr. Ronny Llanos Curaca en representación de la Municipalidad Distrital de Aurahuá.

El presente informe contiene documentación obtenida en campo y revisión de información geológica y cartográfica (boletines técnicos, topografía e imágenes satelitales) que permitieron la evaluación del deslizamiento Aurahuá, y su influencia en la población e infraestructura. Este documento técnico se pone en consideración de la Municipalidad Distrital de Aurahuá e instituciones técnico normativas del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres – SINAGERD, como el Instituto Nacional de Defensa Civil – INDECI y el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastre - CENEPRED, a fin de proporcionar información técnica de la inspección, conclusiones y recomendaciones que contribuyan con la reducción del riesgo de desastres en el marco de la Ley 29664.

1. ANTECEDENTES

Como antecedentes de la zona a evaluar se tiene estudios y opiniones técnicas como:

- Vilchez & Ochoa (2014), consideran que el sector de Aurahuá es considerado como zona crítica por derrumbes y deslizamiento. En la margen izquierda del río San Juan (río Tantará), se identificó procesos de erosión fluvial, que ha inestabilizado el pie del deslizamiento antiguo, reactivándolo, estos procesos afectan terrenos de

cultivo. Recomendaron el monitoreo del deslizamiento para tener un control del progreso del deslizamiento.

- Informe Técnico N° A6697 (*Luza et al., 2015*) donde se concluye que en la zona de estudio los movimientos en masa continuarán, debido a que se evidencian nuevos escarpes y agrietamientos en el terreno (reactivación del deslizamiento en forma retrogresiva). En ese informe se brindó recomendaciones para que se tomen en cuenta para controlar los deslizamientos.
- *Vilchez et al., (2019)*, identificaron un mega-deslizamiento antiguo cuyo depósito llega al río Aurahuá, y señalan que el poblado de Aurahuá se emplazó en el depósito de este deslizamiento. Indican también que en el pie del deslizamiento se observó derrumbes ocurridos por la erosión ocasionada por el río Aurahuá.
- Opinión Técnica N° 002-2021 (*Ingemmet. 2021*), concluye que el área de estudio está considerado geodinámicamente activo, porque se presentan deslizamientos antiguos y recientes. Asimismo, se le considera como zona crítica y brindan recomendaciones.

2. ASPECTOS GENERALES:

El deslizamiento Aurahuá se ubica en la margen izquierda del río Tantara, en el distrito de Aurahuá, provincia de Castrovirreyna, departamento de Huancavelica (Figura 1). Las coordenadas UTM (WGS84) son: 8555961 N, 438534E; Zona 18L.

Para llegar a esta zona de estudio se accede desde Lima, a través de la carretera Panamericana Sur, hasta llegar a Chíncha Alta, para luego tomar la trocha afirmada Alto Larán-San Juan-Tantaré-Aurahuá.

La zona de estudio presenta alturas que varían entre los 3200 m.s.n.m. y los 4300 m.s.n.m. El distrito de Aurahuá se extiende desde la región QUECHUA (Ccollota – 2987 msnm) hasta la región JANCA o CORDILLERA (Altar, Ccoyre y Yanavaca – 5224 msnm). La temperatura promedio anual del distrito Aurahuá es 12°C, presenta lluvias intensas entre los meses de Diciembre a Marzo.

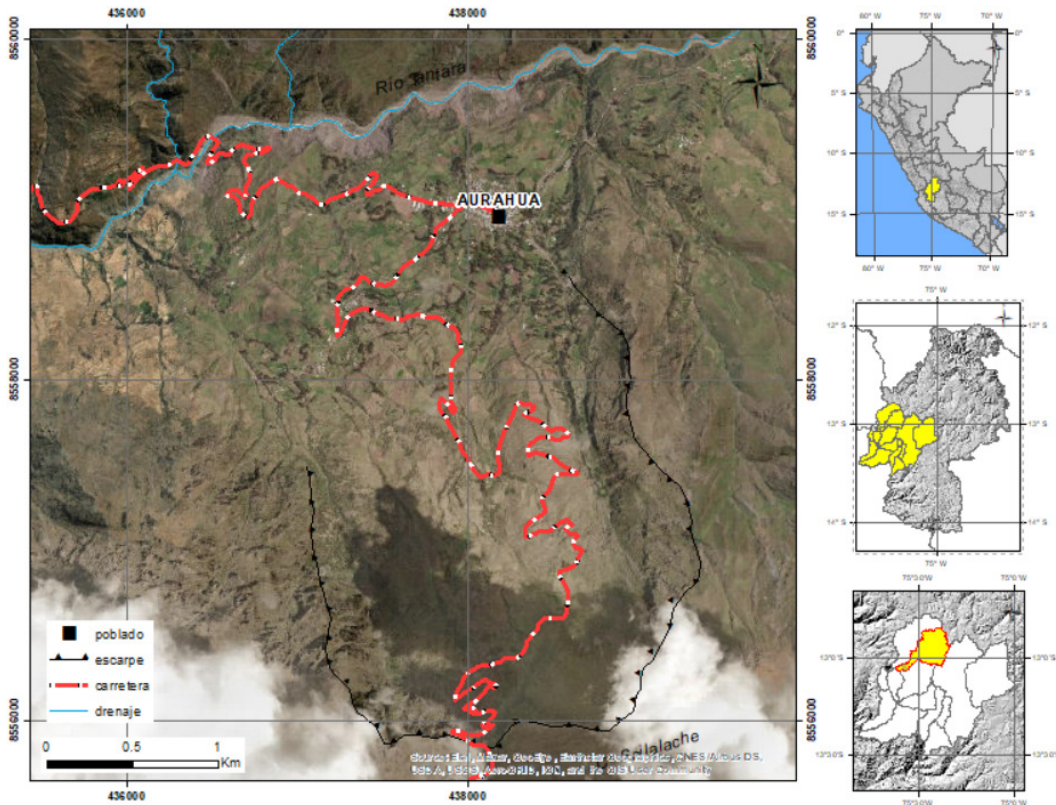


Figura 1. Ubicación del deslizamiento Aurahuá.

3. CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO Y GEOLÓGICO

3.1. CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO:

En la zona de estudio se reconocen las siguientes unidades geomorfológicas: **1) Montañas**, en el área de estudio presenta una altura de 4500 m.s.n.m. y un desnivel hasta el río Tantara de 1300 m con pendiente promedio del terreno de 20°. **2) Valle**, en la zona de estudio está formado por el río Tantara, se encuentra a 3200 m.s.n.m., tiene un perfil típico en “V” (valle joven) observa los depósitos de un antiguo deslizamiento donde se emplaza el Distrito de Aurahuá

El mapa de pendientes de la zona de estudio, indica que los flancos del río Tantara presentan pendientes entre muy fuerte (25° - 45°) a muy escarpado (> 45°), a excepción del deslizamiento Aurahuá cuya masa deslizada presenta pendientes < 25° (Figura 2).

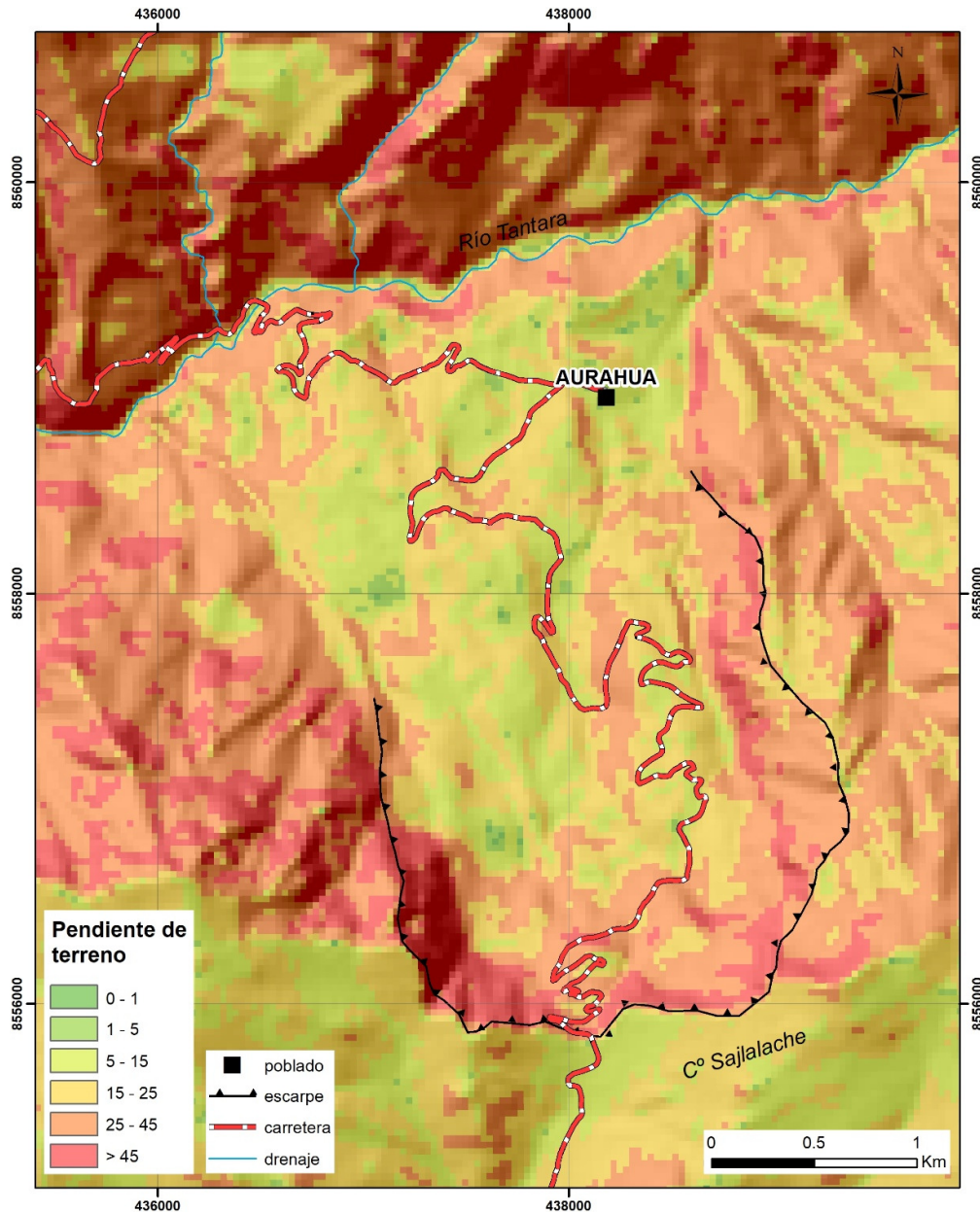


Figura 2: Mapa de pendiente del terreno, la pendiente en los taludes es $> 45^\circ$, mientras que en el cuerpo del deslizamiento la pendiente del terreno es $< 25^\circ$

3.2. CONTEXTO GEOLÓGICO:

En el área evaluada afloran las siguientes unidades estratigráficas (Figura 3):

- 4.2.1. **Formación Tantara (Pe-t3):** Son rocas vulcanosedimentarias, están compuestas por lava andesítica porfídica de color gris oscuros de textura fragmental con una matriz silicificada y tobas violáceas compacta con pómez verde.

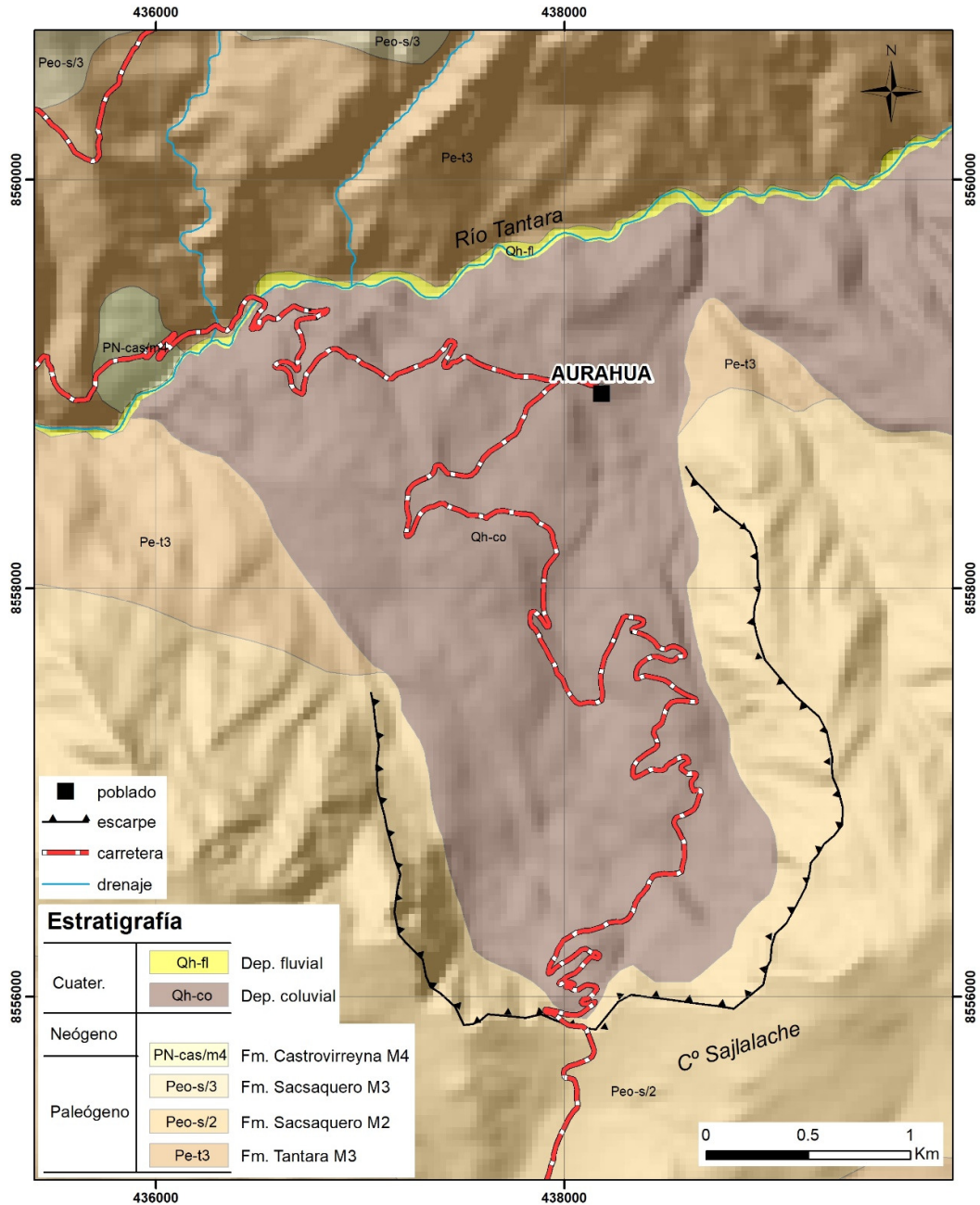


Figura 3: Mapa de las unidades estratigráficas del área de estudio.

4.2.2. **Formación Sacsaquero:** Corresponde a rocas vulcanosedimentarias que en la zona de estudio se diferencian por miembros, según su composición litológica

- **Formación Sacsaquero - Miembro 2 (Peo-s/2):** Corresponde a una secuencia intercalada de tobas, brechas monimícticas y lavas andesíticas porfídicas grises en sectores presentan coloración marrón a rojiza.

- **Formación Sacsaquero - Miembro 3 (Peo-s/3):** Corresponde a una secuencia de lavas gris oscuras porfídicas de composición andesítica con cristales de PGLs translucidos matriz afanítica.
- 4.2.3. **Formación Castrovirreyna - Miembro Medio (PN-cas/m4):** Corresponde a rocas vulcanosedimentarias compuestas por limolitas marrones seguidas por tobas vítreas de tonalidad rosácea, brechas monomíticas. Además, presenta lavas andesíticas.
- 4.2.4. **Depósitos Coluviales (Qh-co):** Son depósitos de talud, producto de la descomposición y disgregación físico – mecánica del suelo, se componen de bloques de roca sueltos subangulosos a angulosos y gravas mal seleccionadas, con escasa matriz (areno – limosa), sin consolidación, tienen poca resistencia en seco y son altamente permeables. En la zona de estudio, estos depósitos corresponden a depósitos de un antiguo deslizamiento.
- 4.2.5. **Depósitos fluviales (Qh-fl):** Corresponden a depósitos que se ubican sobre el cauce del río Tantara, está conformado por bloques, gravas, arenas y limos. Estos depósitos son aprovechados como agregados, y están siendo explotados como materiales para obras civiles.

4. PELIGROS GEOLÓGICOS

4.1. GENERALIDADES

Para la descripción del Deslizamiento de Aurahuá se ha tomado como base la clasificación de Varnes (1978, 1996) y la terminología sobre Movimientos en Masa en la región Andina preparado por el Grupo GEMMA (PMA: GCA, 2007):

- **DESLIZAMIENTOS:** Son movimientos ladera abajo de una masa de suelo y roca, cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de falla, o de zonas relativamente delgadas con gran deformación cortante (Cruden y Varnes, 1996). El deslizamiento de Aurahuá es del tipo rotacional; presenta un escarpe semicircular que es activo, presenta reactivaciones que corresponden a caídas posteriores.
- **CAÍDAS (DERRUMBES):** es un tipo de movimiento en masa en el cual uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera, sin que a lo largo de esta superficie ocurra desplazamiento cortante apreciable. Una vez desprendido, el material cae desplazándose principalmente por el aire pudiendo efectuar golpes, rebote y rodamiento (Varnes, 1978). Según la literatura, estos pueden ser producidos o reactivados por sismos, erosión (socavamiento de la base en riberas fluviales o acantilados rocosos), efecto de la lluvia (saturación de suelos incoherentes) y la actividad humana (acción antrópica: cortes de carreteras o áreas agrícolas). Estos movimientos tienen velocidades muy rápidas a extremadamente rápidas. En

la zona de estudio estos fenómenos se dan en la parte alta (Cabecera del antiguo deslizamiento de Aurahuá) y en la parte baja o pie del deslizamiento por efectos de la erosión fluvial.

- **CÁRCAVAS:** Tipo de erosión concentrada en surcos que se forma por el escurrimiento de las aguas sobre la superficie de las laderas. La presencia de cárcavas en el terreno, indica un grado avanzado de degradación, si estas incisiones por las que circula el agua en la ladera no se eliminan, estas irán progresando en el sentido aguas arriba captando desprendimientos y derrumbes de materiales de mayor tamaño debido a la falta de cohesión por exceso de humedad, llegando a producir profundas incisiones, de más de 30 cm a varios metros de profundidad, con secciones en forma de “V” o “U”, o una combinación de ambas. En la zona de estudio, estos procesos se vienen dando en el cuerpo del deslizamiento.
- **EROSIÓN FLUVIAL:** Llamada también erosión lateral, consiste en el arranque de los depósitos y/o materiales que se encuentran en ambas márgenes del cauce del río, producto del socavamiento producido por éste, provocando derrumbes en ambas márgenes. En la zona de estudio estos procesos se observan en la margen izquierda del río Tantara.

4.2. ZONAS EVALUADAS

El poblado de Aurahuá que es capital del distrito del mismo nombre, junto a otros poblados se emplazan sobre el cuerpo del deslizamiento antiguo de tipo rotacional, su corona es semicircular. El escarpe principal se encuentra a 4270 m s.n.m. y tiene ~ 2 km de ancho y el pie del deslizamiento se encuentra en el río Tantara a 3260 m s.n.m., haciendo un desnivel de más de 1000 metros y tiene una longitud de ~ 4 km (Figura 4). Presenta reactivaciones en el escarpe del deslizamiento y se observan grietas tensionales. En el cuerpo del deslizamiento se observa infraestructura agrietada. Hacia el pie del deslizamiento se observan derrumbes los cuales se encuentran activos.

En la evaluación se procedió a identificar y cartografiar a detalle el deslizamiento Aurahuá y los procesos internos (Figura 5). Para una mejor descripción, el área de estudio se dividió en tres zonas: Zona 1 (Parte alta o Cabecera del deslizamiento), Zona 2 (Parte media o Cuerpo del deslizamiento) y Zona 3 (Parte Baja o pie del deslizamiento).

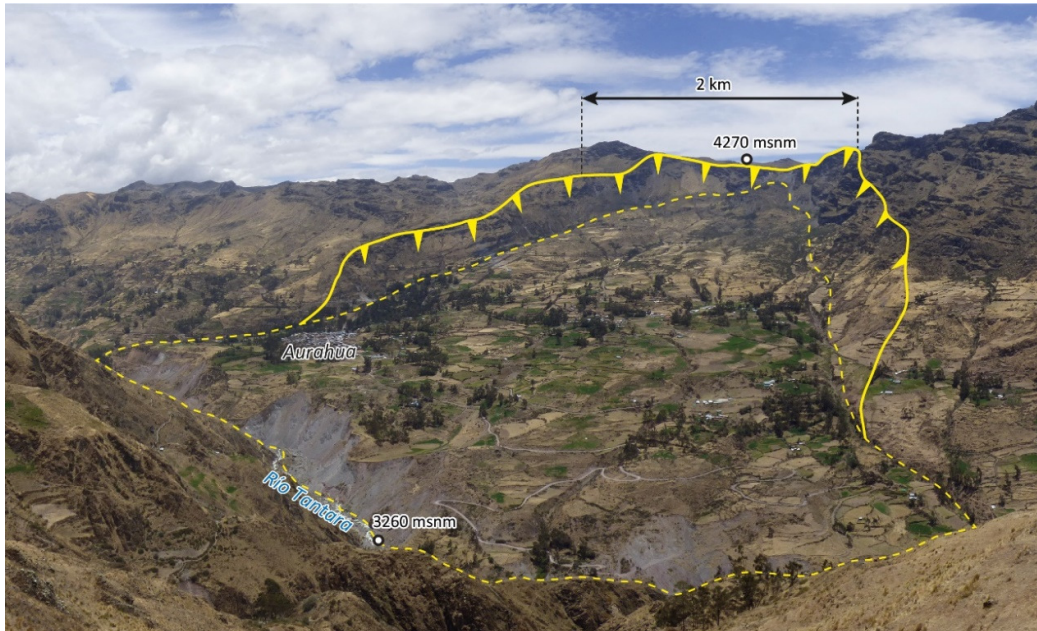


Figura 4: Vista del deslizamiento Aurahuá, donde se observa en línea continua amarilla el escarpe del deslizamiento y en línea punteada el depósito del deslizamiento Aurahuá llegando hasta el río Tantara.

4.2.1. ZONA 1 (Parte alta – cabecera del deslizamiento)

Esta parte corresponde a la cabecera del deslizamiento Aurahuá, se encuentra en el cerro Sajlalache a una altura de 4270 m s.n.m. (Figura 4; 5), la corona es semicircular y tiene un ancho de ~2 km. Este deslizamiento se origina en rocas vulcanoclasticas de la Formación Sacsaquero (Figura 6). Los estratos tienen una dirección N 135° y buzan 30° SW. Las rocas se encuentran fracturadas y alteradas, y sumada la presencia de agua son factores que condicionan las reactivaciones en esta parte.

Además del evento principal que viene a ser el deslizamiento Aurahuá, se identificó y cartografió hasta 5 eventos posteriores que corresponden a caídas (Derrumbes y/o avalanchas) que se depositaron encima de los depósitos del evento principal (Figura 7) estos se deben a un proceso retrogresivo.

En la parte alta del escarpe principal, en su parte posterior se observan grietas tensionales con aberturas hasta >1 metro (Figura 8). Por estas grietas se infiltra agua, desgastando y deformando el talud del deslizamiento. Esto señala que el escarpe esta susceptible a generar nuevas caídas y/o derrumbes que podrían afectar la carretera que lleva a la capital de distrito de Aurahuá.

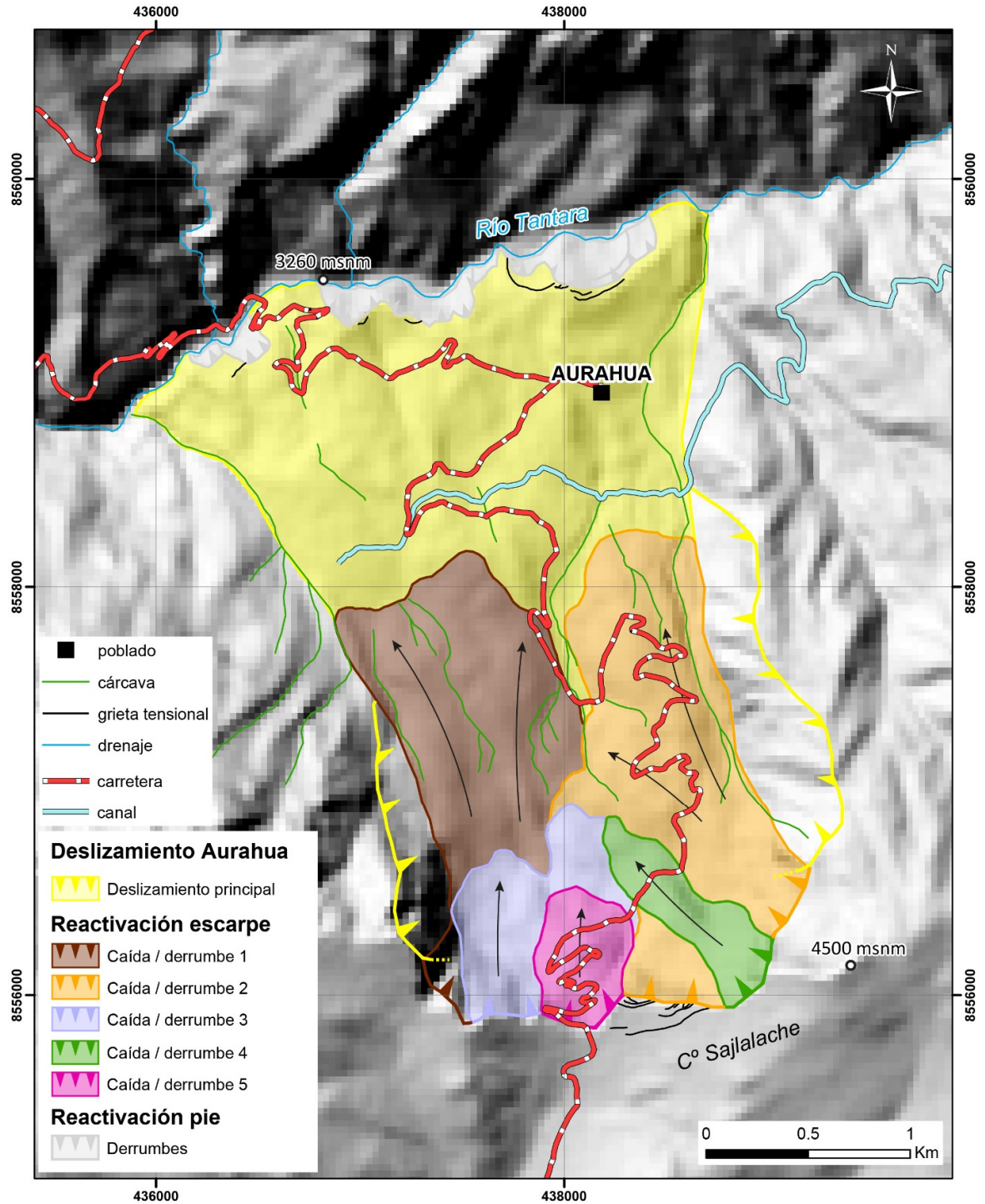


Figura 5. Cartografiado de detalle del deslizamiento Aurahúa y los eventos internos y reactivaciones.



Figura 6: Escarpe del deslizamiento Aurahúa en rocas vulcanoclásticas de la Formación Sacsaquero.

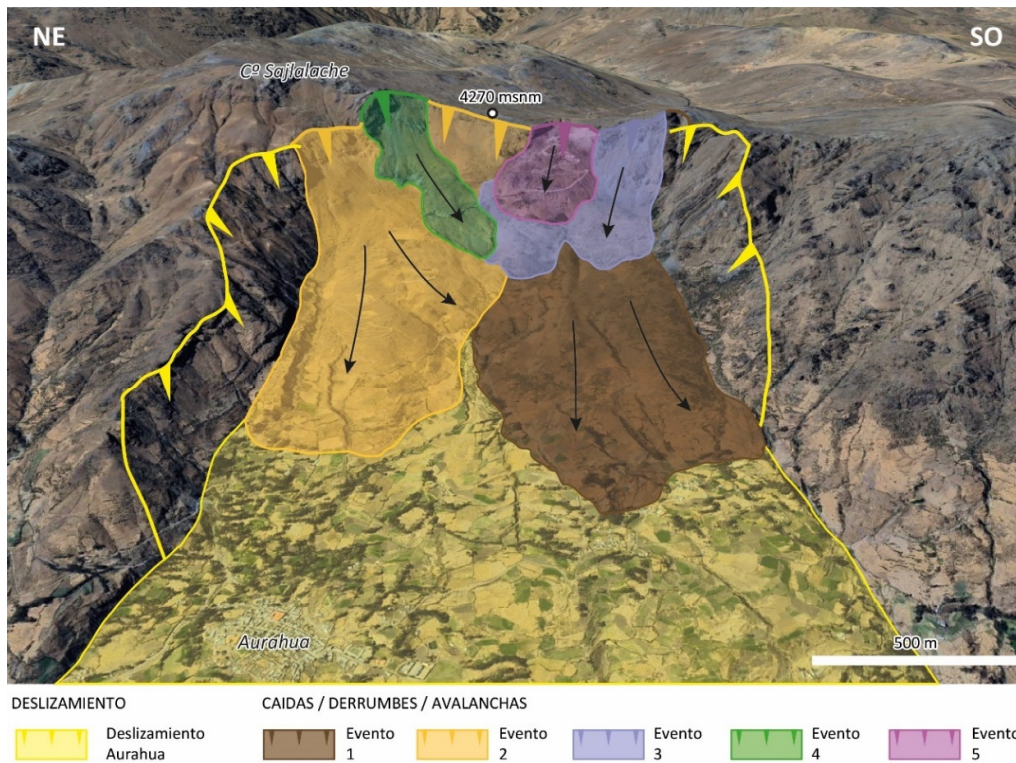


Figura 7. Se observa la cabecera del deslizamiento Aurahúa, en color amarillo se observa el evento principal, y encima del depósito se observan seis eventos secundarios que corresponden a caídas / derrumbes o avalanchas debido a reactivaciones del escarpe principal.

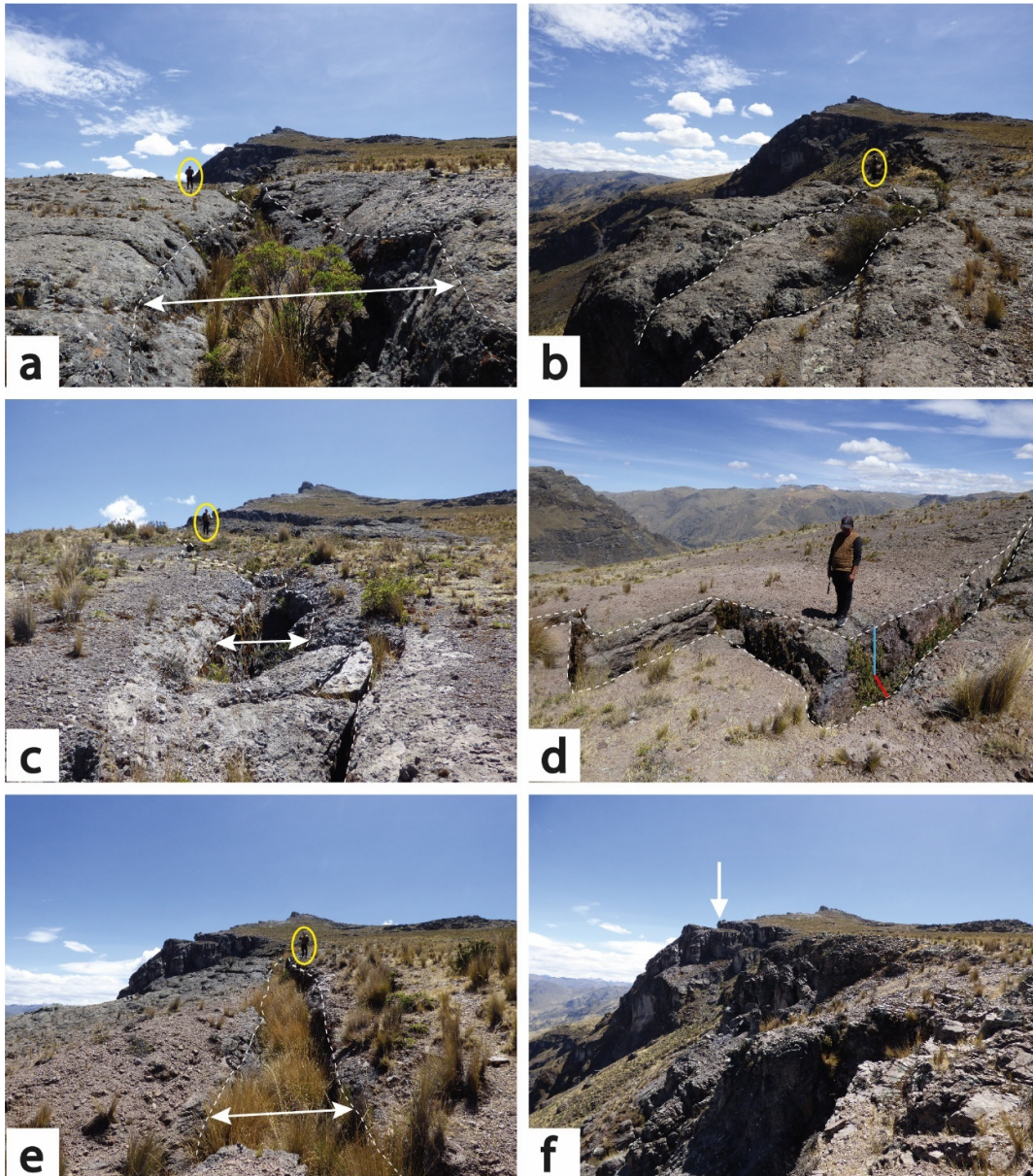


Figura 8. Grietas tensionales ubicadas detrás del escarpe principal del deslizamiento Aurahuá. En algunos sectores llega a tener aperturas mayores a 1 metro. Nótese de escala referencial una persona (circulo amarillo).

4.2.2. ZONA 2 (masa deslizada)

Esta parte corresponde a la parte media del deslizamiento Aurahuá, en esta parte no se observan escarpes nuevos ni reactivaciones, se observa cárcavas debido a la incisión provocada por el agua de las precipitaciones. También se observa deformación en el terreno que está afectando edificaciones e infraestructura.

Sobre los depósitos del deslizamiento se emplazó el poblado de Aurahúa. En este sector, que viene a ser el cuerpo del deslizamiento hasta el río Tantara corresponde a la zona de terrenos de cultivo. Por tal motivo se construyó un canal de concreto para transportar agua para riego. Este canal en algunos sectores está deformado y presenta fugas de agua, las cuales se infiltran en el terreno (Figura 9).

Por otro lado, debido a la deformación del terreno en el cuerpo del deslizamiento se observan construcciones afectadas, uno de ellos viene a ser la Institución Educativa Inicial, con presencia de grietas en los muros, estos llegan a tener aperturas de hasta 4 cm (Fotos 10).



Figura 9. Canal de concreto para riego, con presencia de fugas debido al deterioro y/o agrietamiento del canal por la deformación del terreno.



Figura 10. Muros agrietados en infraestructuras de ladrillo y cemento debido a la deformación del terreno.

4.2.3. ZONA 3 (Parte baja – pie del deslizamiento)

Esta zona corresponde al pie del deslizamiento Aurahuá (Figura 5). Está ubicado en la margen izquierdo del río Tantara, presenta pendientes muy fuertes $>25^\circ$ (Figura 2), el pie del deslizamiento tiene una longitud ~ 3 km y es ahí donde se dan las reactivaciones que corresponden a caídas y/o derrumbes (Figuras 11, 12, 13, 14), estos se dan como procesos retrogresivos que vienen afectando principalmente terrenos de cultivo y carreteras para extracción de material de agregados y la carretera que une el distrito de Aurahuá con el distrito de Chupamarca, el desnivel promedio que existe entre la corona de estos derrumbes con el río Tantara viene a ser ~ 100 m. Además, se observan grietas tensionales detrás de los escarpes; estas grietas llegan a presentar desniveles hasta de 1.6 m (Figura 15). Esta zona esta constituida principalmente por los depósitos del deslizamiento Aurahuá. En varias partes del talud, se observan surgencias de agua (Figura 11) las cuales se intensifican en temporada de lluvias que constituye una de las causas de la generación de caídas en esta parte, además de la inestabilidad del talud que ocasiona la acción erosiva del río Tantara que socaba la base del talud y debilita la pared.



Figura 11. Reactivaciones en la base del deslizamiento Aurahúa, donde influye el tipo de material, la presencia de surgencias de agua en el talud y la acción erosiva del río Tantara.



Figura 12. Reactivación en el pie del deslizamiento, el derrumbe debido a un proceso retrogresivo. Las líneas punteadas de color blanco, vienen a ser las grietas tensionales detrás del escarpe del derrumbe.



Figura 13. Derrumbes al pie del deslizamiento Aurahuá. Las líneas amarillas indican el escarpe con un movimiento retrogresivo, hacia el pie del talud se observa el socavamiento y erosión (flechas rojas) generada por el río Tantara.

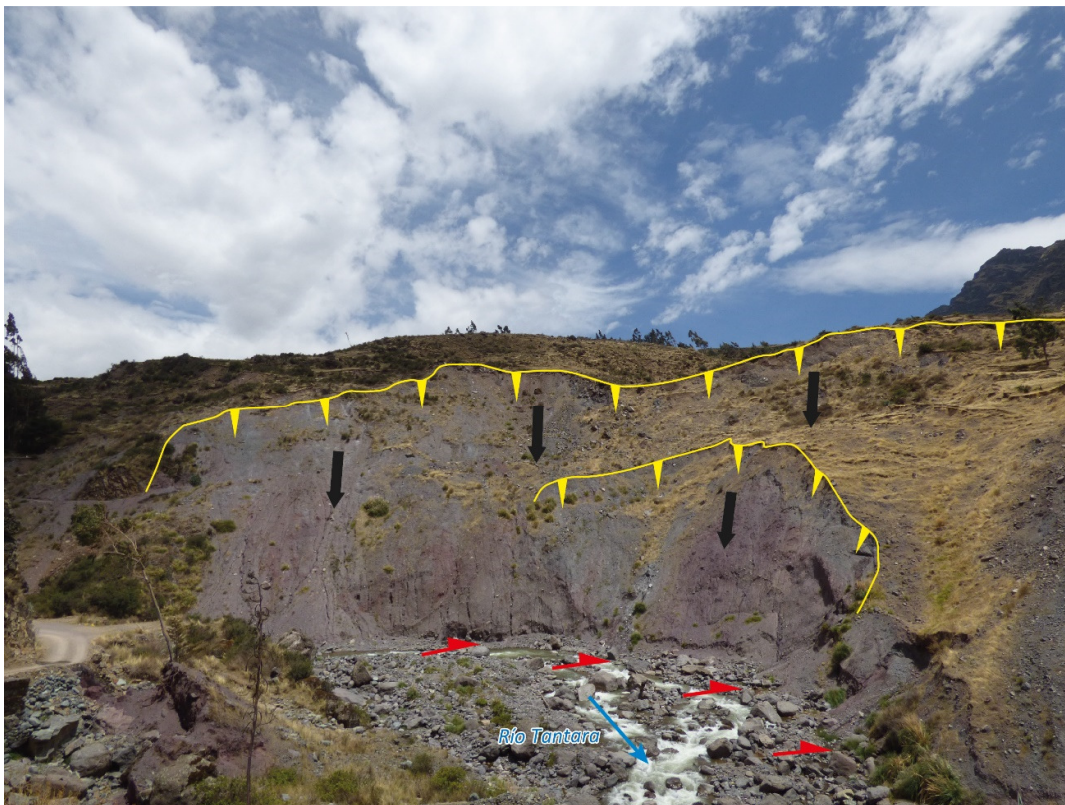


Figura 14. Derrumbes al pie del deslizamiento (líneas amarillas) reactivados debido a la acción erosiva del río Tantara (flechas rojas) que viene socavando la base del talud.

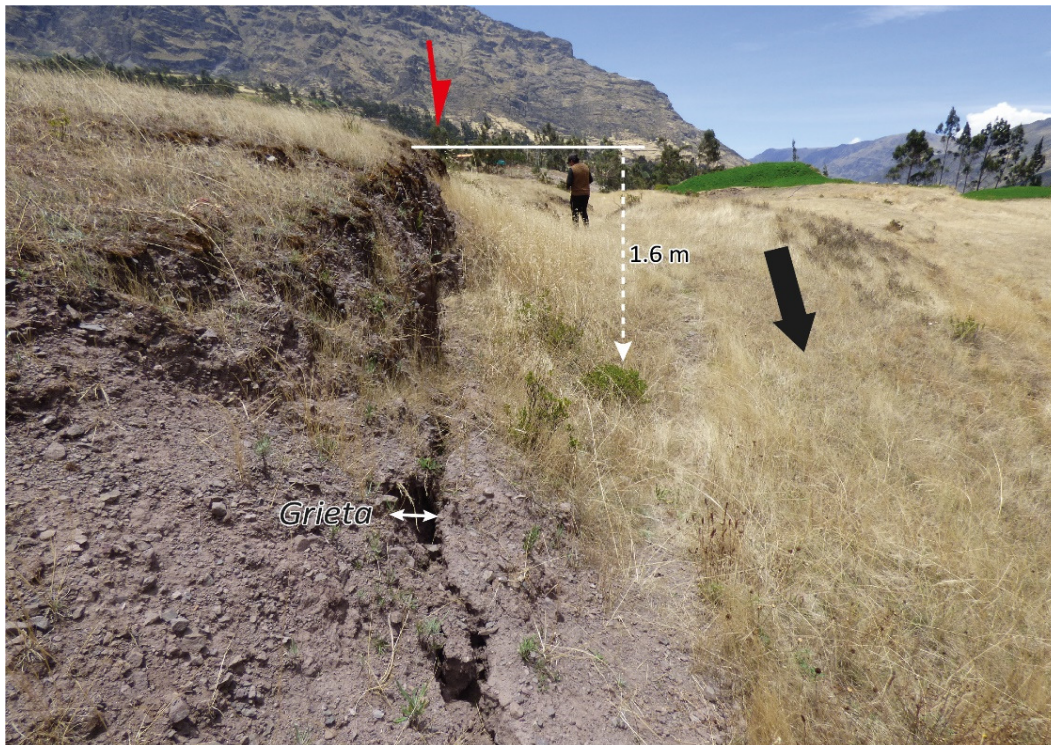


Figura 15. Escarpe y grieta en el pie del deslizamiento Aurahuá. El desnivel tiene 1.6 m mientras que la apertura reciente tiene 8 cm. La flecha negra indica el bloque que esta descendiendo.

5. FACTORES CONDICIONANTES Y DESENCADENANTES

El deslizamiento Aurahuá, viene a ser un mega deslizamiento antiguo con reactivaciones en su pie. El servicio ForM@Ter LArge-scale Sentinel-1 Multi-Temporal Interface Sentinel-1 (FLATSIM) procesó una cantidad masiva de datos multitemporales entre 2014 y 2021 (Thollard et al., 2021). Que permiten visualizar deformaciones o desplazamientos superficiales muy pequeños (mm/año). Superponiendo los resultados de InSar con el deslizamiento Aurahuá se pudo observar que la masa deslizada se está deformando, eso indica que se está moviendo en dirección de la pendiente hacia el Noroeste (Figura 16).

En ese entender, dentro de los factores que condicionan la reactivación de los deslizamientos o caídas en el escarpe del deslizamiento Aurahuá, viene a ser: i) la litología que corresponde a la Formación Sacsacero que está constituida de secuencias intercaladas de tobas, brechas y lavas andesíticas, que se encuentran fracturadas y alteradas, ii) la pendiente del terreno, que en esta parte es mayor a 45°. Estos factores facilitan para que detrás del escarpe se formen grietas tensionales con aberturas mayores a 1 m por donde infiltran el agua proveniente de las lluvias e incrementan la inestabilidad del talud del escarpe.

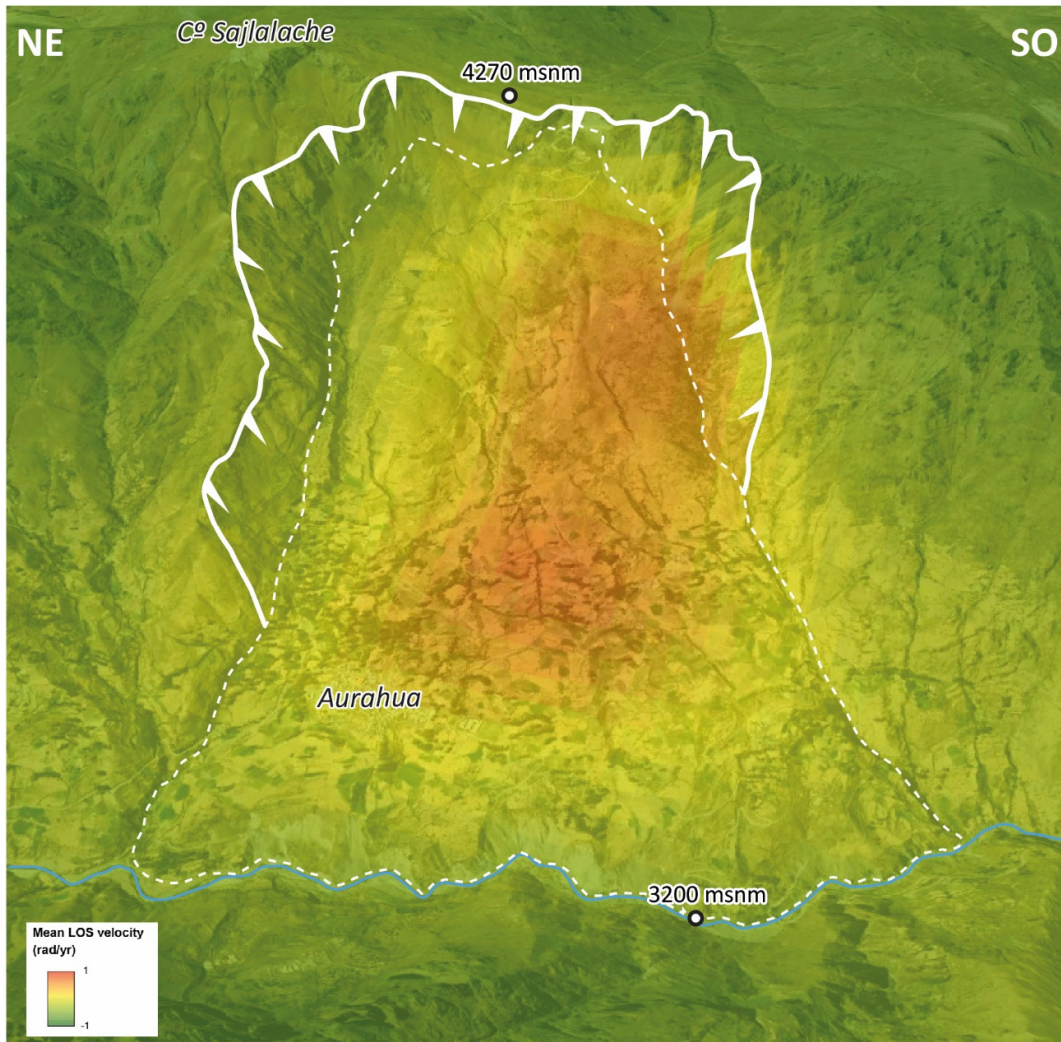


Figura 16. Imagen InSar generada de datos multitemporales entre 2014 y 2021, los resultados muestran que el deslizamiento Aurahuá presenta deformación.

Por otro lado, los factores que condicionan la formación de caídas y/o derrumbes en el pie del deslizamiento, se deben al tipo de suelo el cual no es consolidado y corresponde al depósito del deslizamiento Aurahuá. La infiltración del agua proveniente del riego en los terrenos de cultivo y las lluvias intensas que ocurren en los meses de diciembre a marzo saturan el depósito, incrementando el peso del material inestable, de tal manera que en el pie del deslizamiento se observan surgencias de agua producto del saturamiento del terreno. La pendiente del terreno también es este sector es fuerte lo que permite la inestabilidad del talud, a esto se suma la erosión producida por el río Tantara, el cual se incrementa su caudal en el periodo lluvioso (Diciembre - Marzo).

Por consiguiente, los factores detonantes vienen a ser en primer lugar el agua proveniente de lluvias y riego, los sismos y el factor antrópico debido a los cortes de talud y por el inadecuado uso de riego tecnificado.

6. ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

Una de las medidas fundamentales para garantizar la estabilidad en este tipo de fenómenos es el manejo controlado del agua tanto en la superficie como en el subsuelo. Estos sistemas están diseñados para regular el agua y sus efectos, reduciendo las fuerzas que pueden desencadenar el movimiento y/o fortaleciendo las fuerzas de resistencia.

Los métodos destinados a estabilizar deslizamientos mediante el control del agua, ya sea en la superficie o en el subsuelo, resultan altamente eficaces y, por lo general, más económicos que la construcción de estructuras de contención a gran escala. Estos métodos tienden a desactivar o reducir la presión de poros, que se considera el principal factor desestabilizador en las laderas o zonas de pendientes. El drenaje no solo disminuye el peso de la masa, sino que también aumenta la resistencia de la ladera (Suarez, 1998).

Las medidas de drenaje recomendadas se incluyen en la figura 17 (la ubicación de las alternativas de solución propuestas son referenciales) y son las siguientes:

6.1. DRENAJE SUPERFICIAL

El objetivo es recolectar las aguas superficiales, incluyendo aquellas captadas por drenajes profundos, y dirigir las lejos del talud para prevenir la infiltración y la erosión.

El sistema de recolección de aguas superficiales debe abarcar tanto la escorrentía de la ladera como la proveniente de la cuenca de drenaje ubicada en la parte superior del talud, conduciendo el agua hacia una ubicación segura, alejada del deslizamiento.

La evacuación de las aguas de escorrentía se lleva a cabo mediante zanjas de drenaje, ya sea impermeabilizadas o no, dispuestas aproximadamente de manera paralela al talud. Estas zanjas deben situarse a una corta distancia de la cresta del talud y en su parte posterior, con el fin de evitar que el agua alcance las grietas de tensión. (Figura 18, 19 y 20).

Se emplean *zanjas horizontales o canaletas de drenaje horizontal*, las cuales son dispuestas de manera paralela al talud y ubicadas al pie del mismo. Se utilizan *canales colectores en forma de espina de pescado*, que combinan una zanja drenante o canal en gradería, siguiendo la línea de máxima pendiente, con zanjas secundarias (espinas) ligeramente inclinadas que convergen en la espina central. La construcción y el mantenimiento de estas estructuras en áreas críticas requieren una supervisión adecuada. Para prevenir la reinfiltración de las aguas, es fundamental impermeabilizar adecuadamente estos canales, como se muestra en la Figura 21.

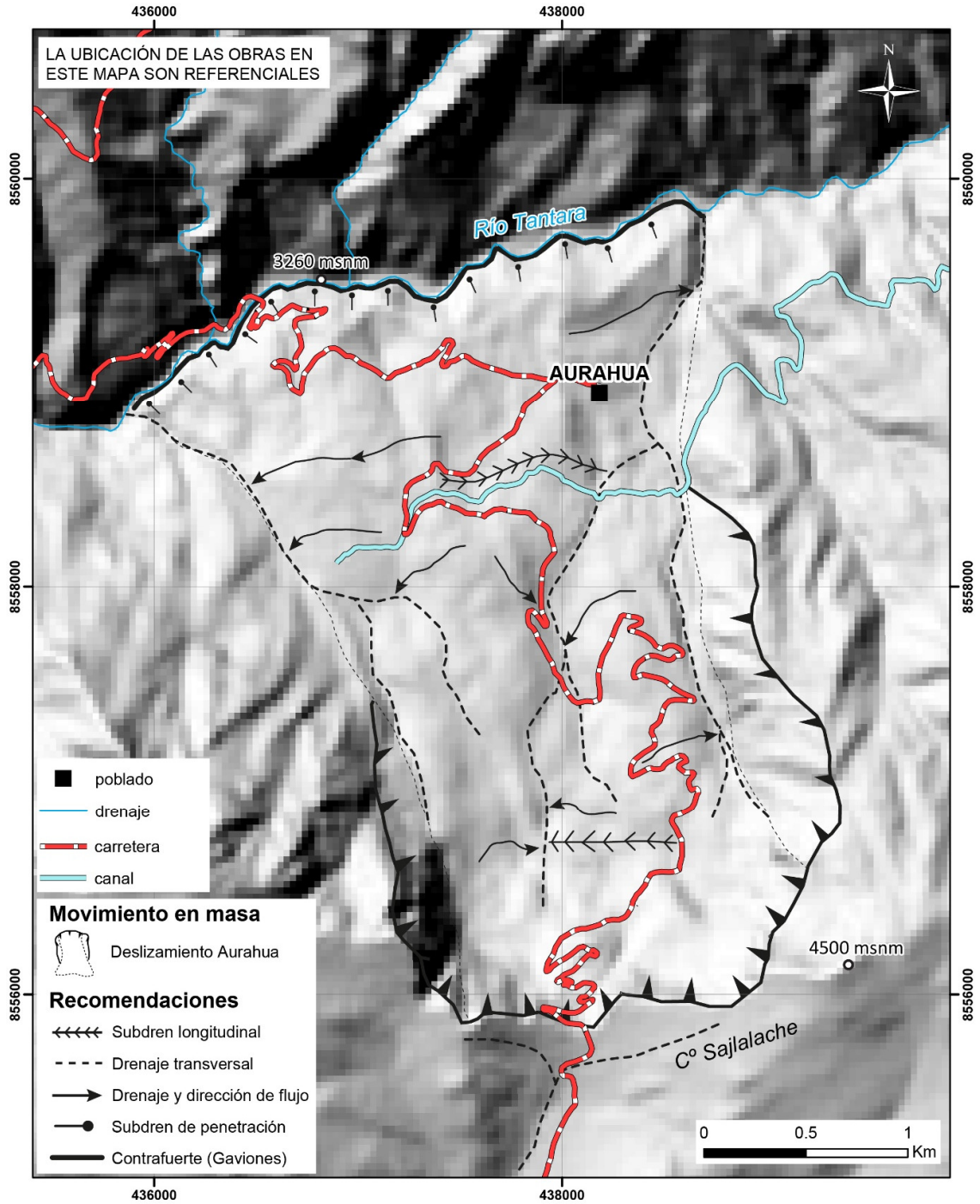


Figura 17. Mapa de recomendaciones, donde se propone alternativas de solución para controlar el agua y sus efectos. La ubicación de las obras es referencial, se debe de hacer un planteamiento y diseño con personal especializado.

Las zanjas y/o canales deben dirigirse hacia zonas de entrega en gradería u otro disipador de energía que canalice el agua recolectada hacia un lugar seguro, tal como se ilustra en las Figuras 22 y 23.

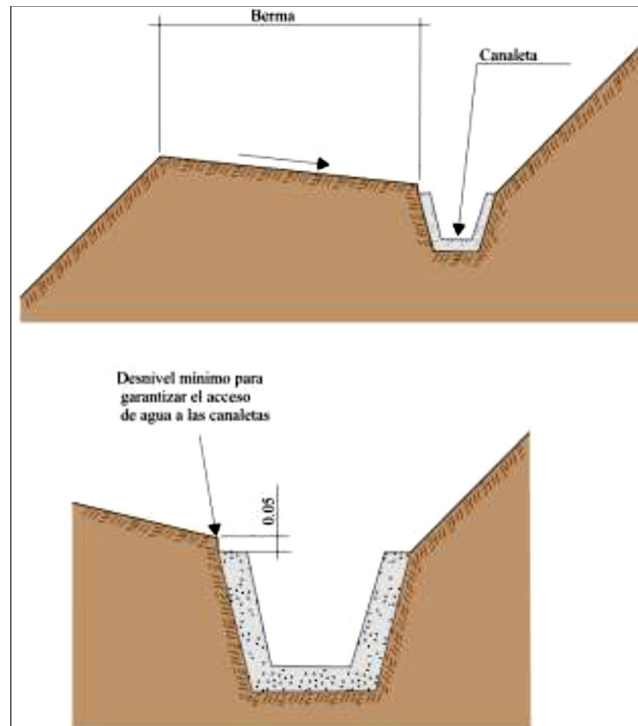


Figura 18: Detalle de una canaleta de drenaje superficial (tomado de INGEMMET, 2000).

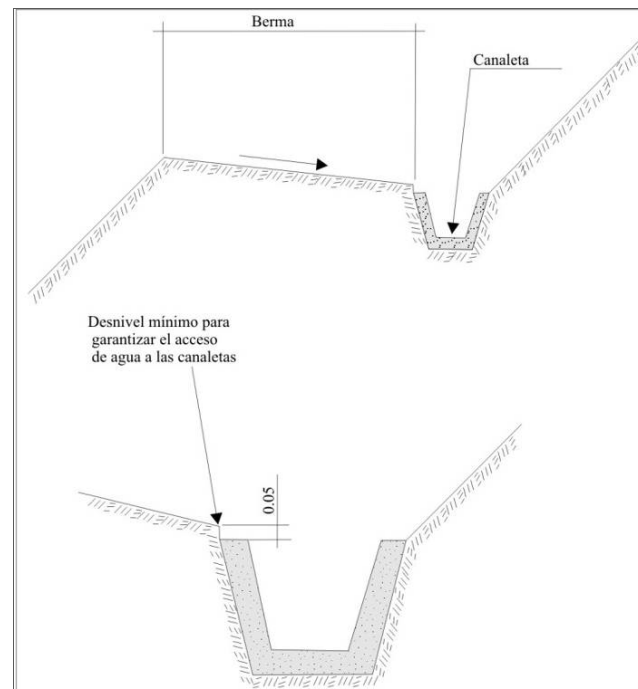


Figura 19: Detalle una canaleta de drenaje superficial (Zanjas de coronación).

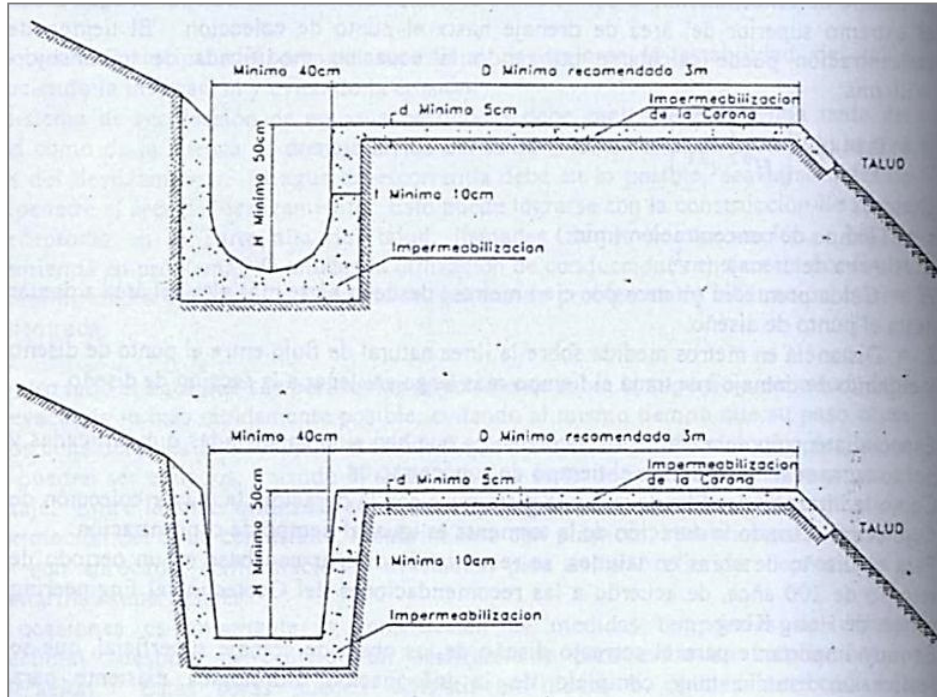


Figura 20: Detalle de zanjas de coronación para el control de aguas superficiales en un talud.

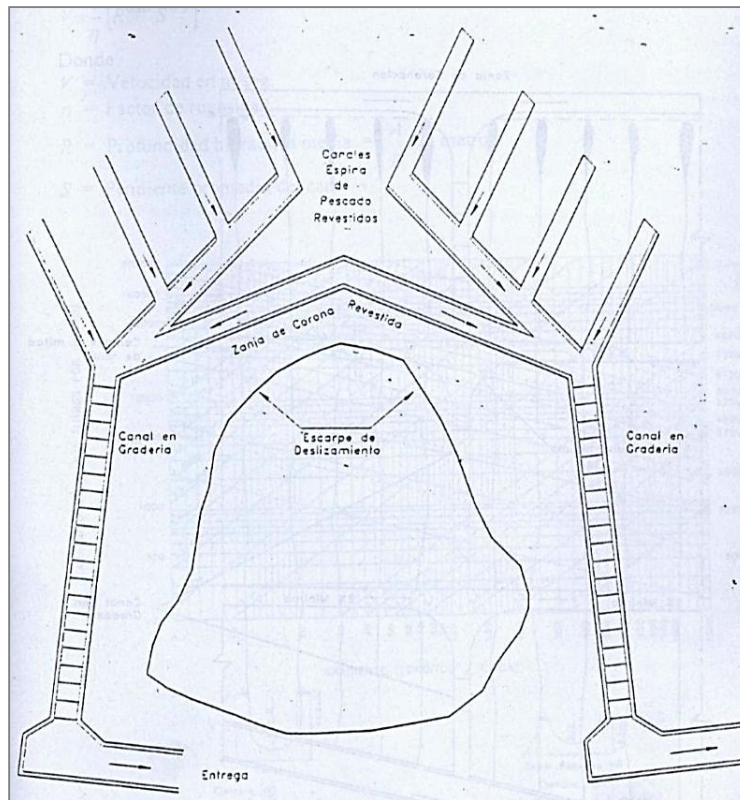


Figura 21: Esquema de planta de canales colectores espina de pescado con canales en gradería

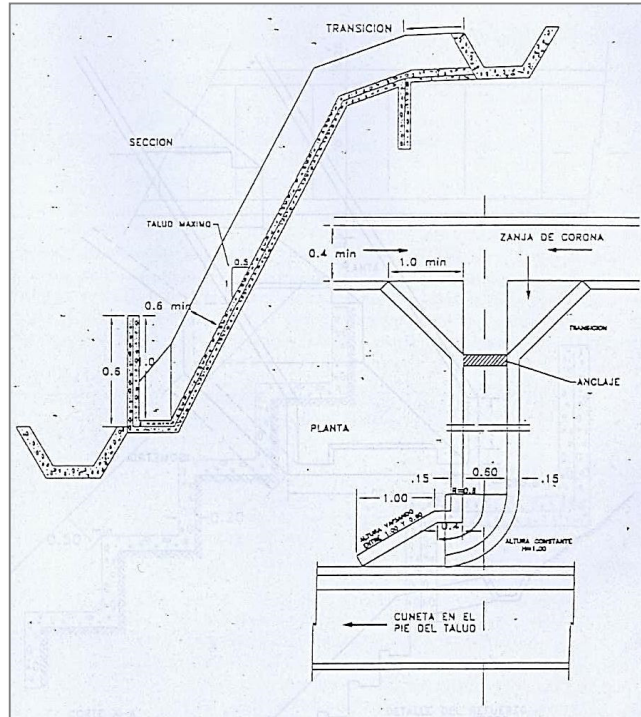


Figura 22: Detalle de un canal rápido de entrega

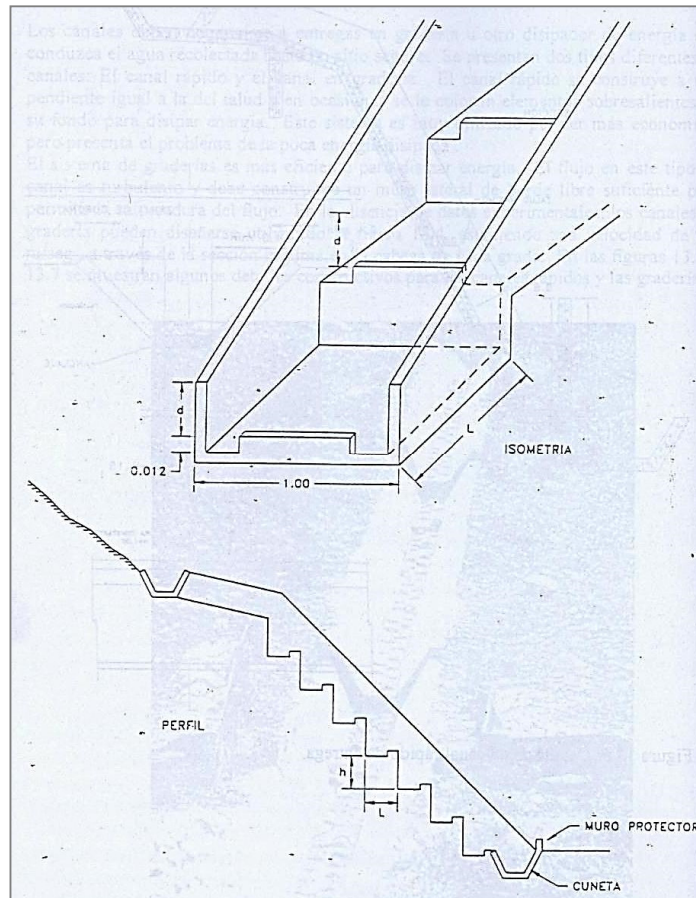


Figura 23: Canal de entrega con gradas de disipación.

6.2. DRENAJE SUBTERRÁNEO

El objetivo del drenaje subterráneo es reducir las presiones de poro o evitar su aumento. Su aplicación requiere el previo conocimiento de las características hidrogeológicas del terreno. En el caso específico del deslizamiento Aurahuá, es evidente que la napa freática es superficial y constituye la principal causa de la inestabilidad de la ladera. Se recomienda lo siguiente:

Zanjas con relleno drenante: Consisten en zanjas rellenas con material drenante, excavadas en el talud o más allá del pie del mismo y cuya acción drenante se limita a profundidades pequeñas (Figura 24). Estas zanjas pueden estar dispuestas detrás del escarpe del deslizamiento Aurahuá o en la masa deslizada.

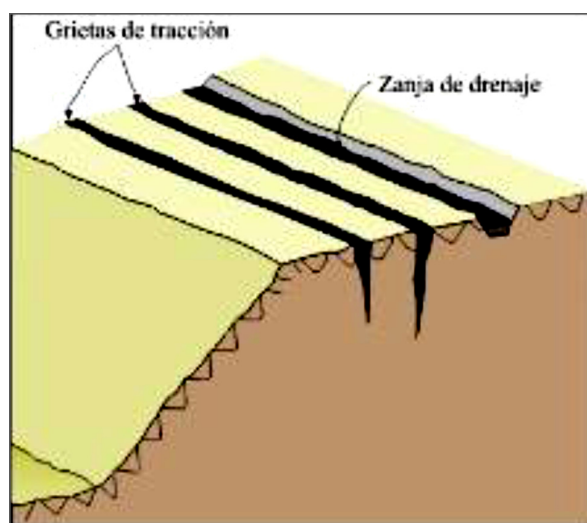


Figura 24: Disposición de zanjas en un talud (Tomado de INGEMMET, 2000)

Pueden ser de dos tipos:

Subdrenes interceptores: Son zanjas excavadas manualmente o con retroexcavadora, rellenas de material filtrante y equipadas con elementos de captación y transporte de agua. Para el deslizamiento Aurahuá, se recomienda que este subdren tenga una profundidad máxima de 3.50 m.

Existen diversas formas de construirlos (Figura 25): A) utilizando material de filtro y tubo colector; B) empleando geotextil como filtro, material grueso y tubo colector; C) con material grueso permeable sin tubo (dren francés); D) utilizando un tubo colector con una capa gruesa de geotextil alrededor; E) con geotextil, material grueso sin tubo; F) utilizando un dren sintético con geomalla, geotextil y tubo colector.

La elección del tipo de subdren dependerá del material disponible en la zona, los costos asociados y la necesidad específica de captación y caudal del drenaje. En el caso del deslizamiento Aurahuá, se recomienda cualquiera de los tipos A, C y D (Figura 25, 26, 27, 28).

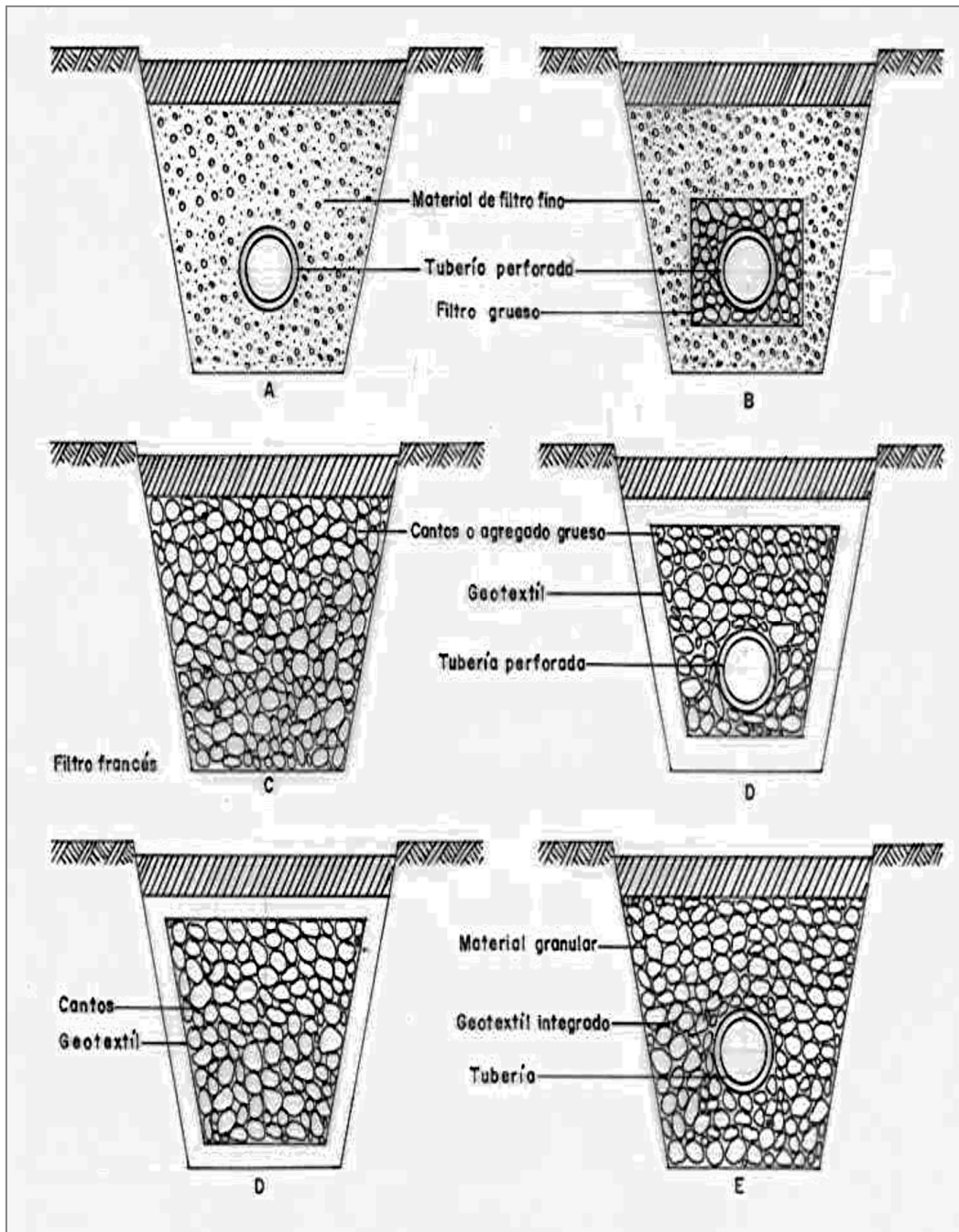


Figura 25: Tipos de subdrenes interceptores (Adaptado de Suárez, 1998)

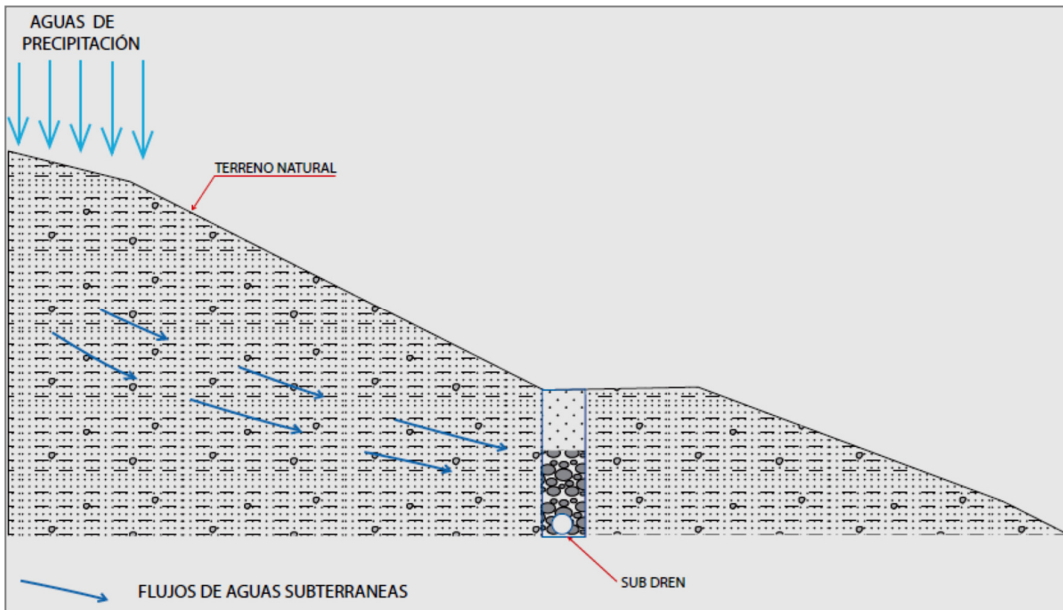


Figura 26: Esquema del subdrén Tipo A) material de filtro y tubo colector.

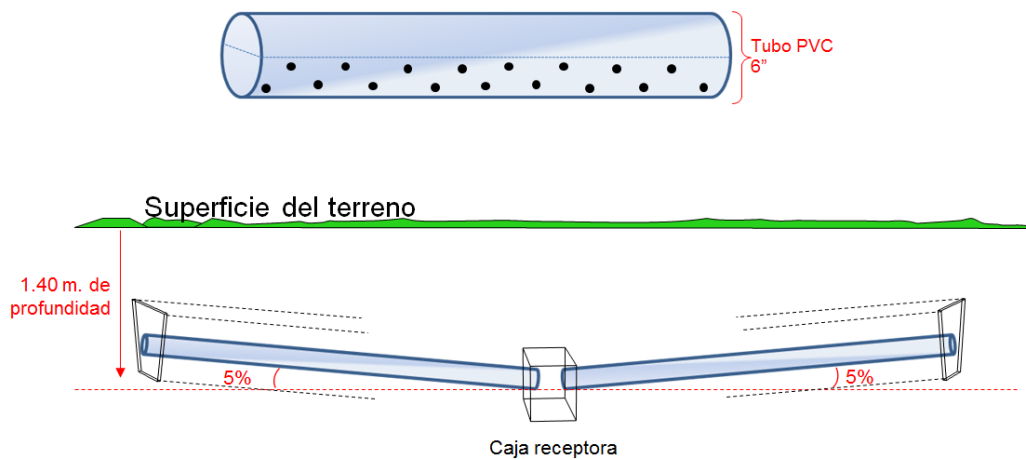


Figura 27: Modelo de tubo ranurado (cribado) y posición en profundidad. La caja receptora también puede estar a los extremos dependiendo de la ruta de evacuación.



Figura 28, Proceso constructivo de un subdrén tipo D) con tubería cribada, material grueso (Grava) y geotextil, aplicado para drenaje longitudinal. El geotextil es permeable (Farfan et,al 2010).

Drenes horizontales o de penetración: Este sistema implica el uso de una tubería perforada que atraviesa una masa de suelo mediante una perforación subhorizontal o ligeramente inclinada. El objetivo es reducir el nivel freático a un punto que mejore la estabilidad de la ladera o talud. La principal ventaja de este tipo de drenes radica en su instalación que es rápida y sencilla, lo que permite lograr un aumento significativo en el factor de seguridad de la ladera en un corto período de tiempo (Figuras 29 y 30).

Estos tipos de drenaje se recomiendan para el pie del deslizamiento Aurahuá, en el río Tantara.

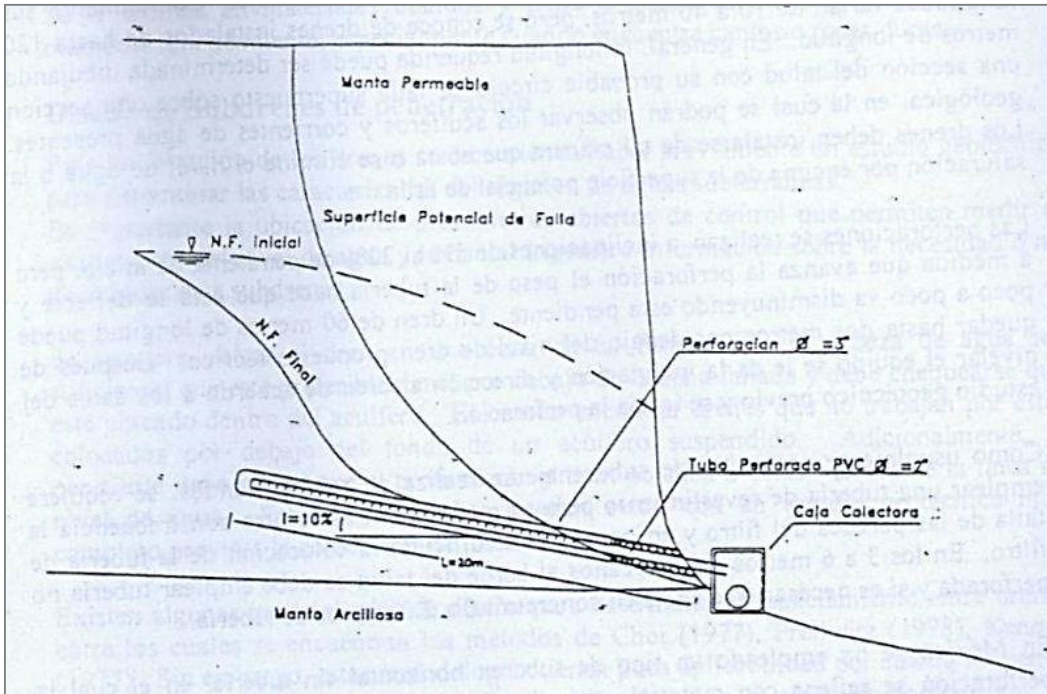


Figura 29: Esquema general de colocación de un subdrén de penetración.

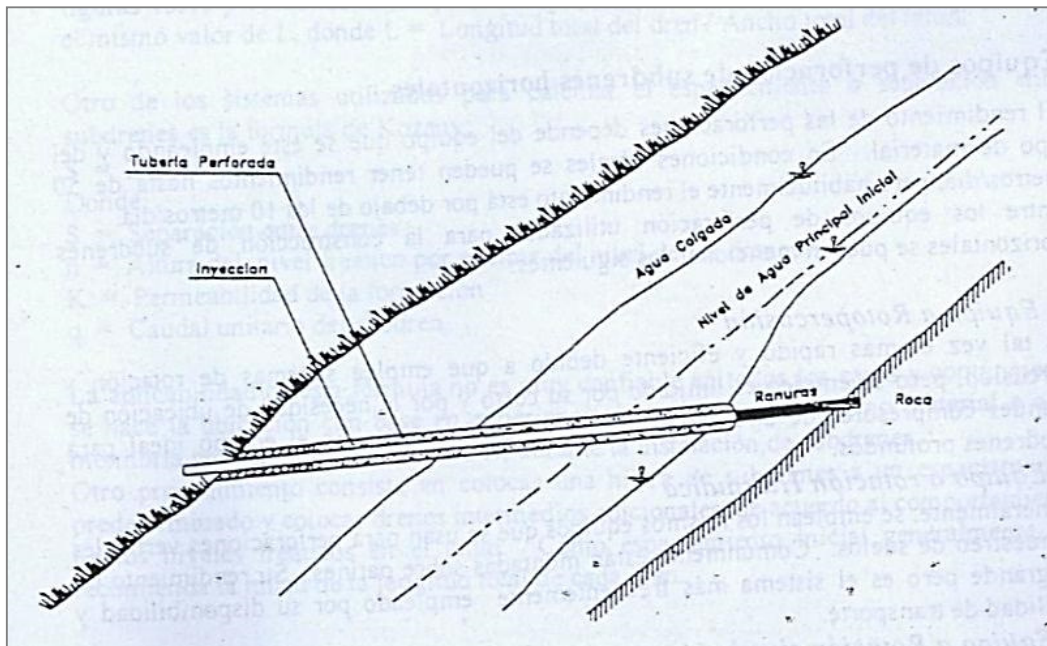


Figura 30: Subdrén de penetración diseñado para captar solamente en la punta interior

Pantallas de drenaje: Este tipo de estructuras son similares en apariencia a un muro de contención, las cuales se colocan sobre la superficie de la ladera o talud con el objetivo principal de impedir que se produzca erosión ocasionada por las filtraciones del agua subterránea (Figura 31).

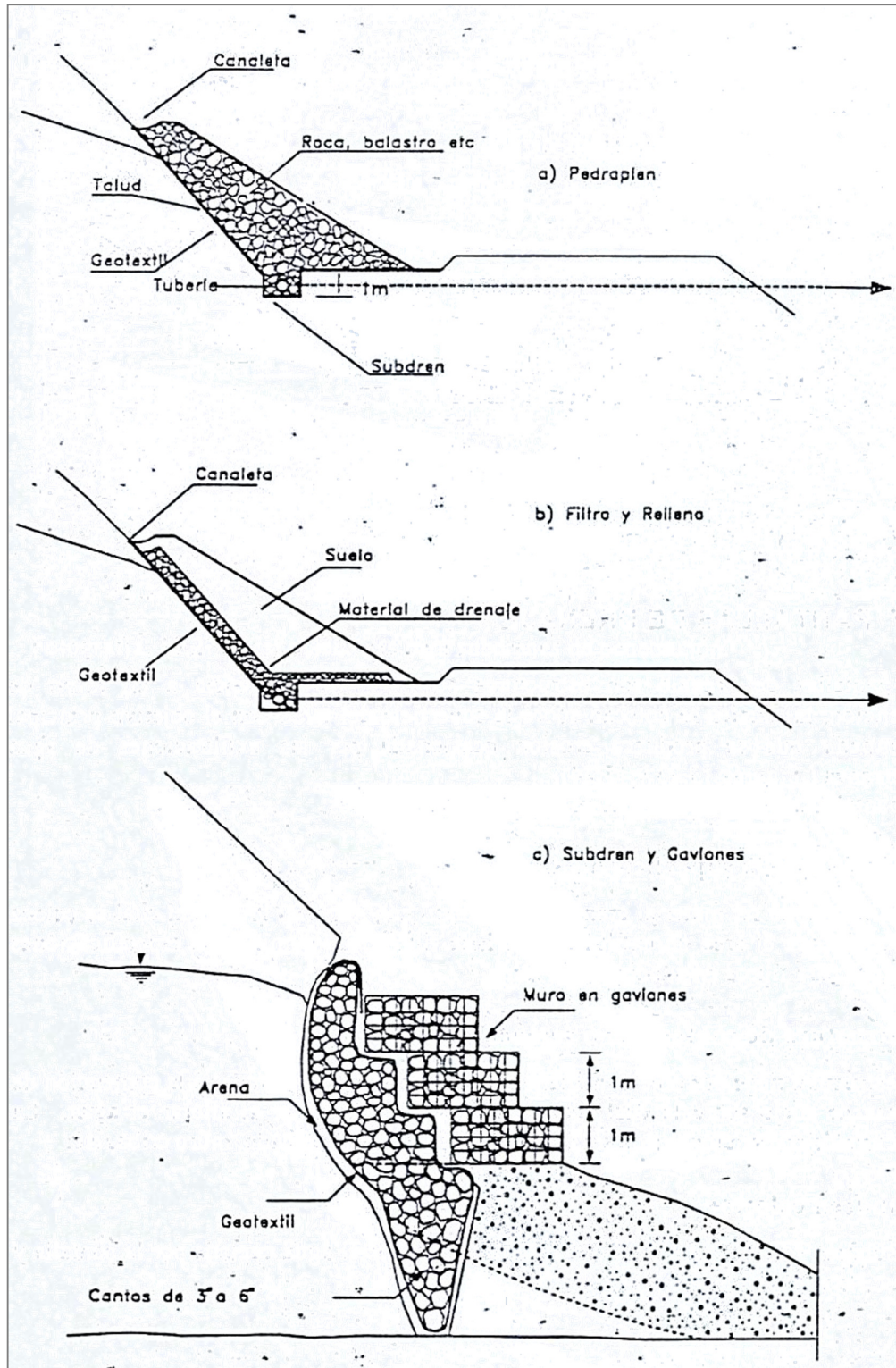


Figura 31: Ejemplos de subdrenes de pantalla

6.3. ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN:

Para la contención de los taludes y en especial controlar las reactivaciones al pie del deslizamiento Aurahuá y así evitar su evolución de este, se debe proponer estructuras de contención. Es recomendable que los muros de contención cuenten con subdrenes (figura 32). Se recomiendan este tipo de estructuras para el pie del talud o la ladera. Estas estructuras de contención pueden ser una combinación entre muro de contención o contrafuerte en el pie de deslizamiento activo (con gaviones) y sistemas de canalización (Figura 33).

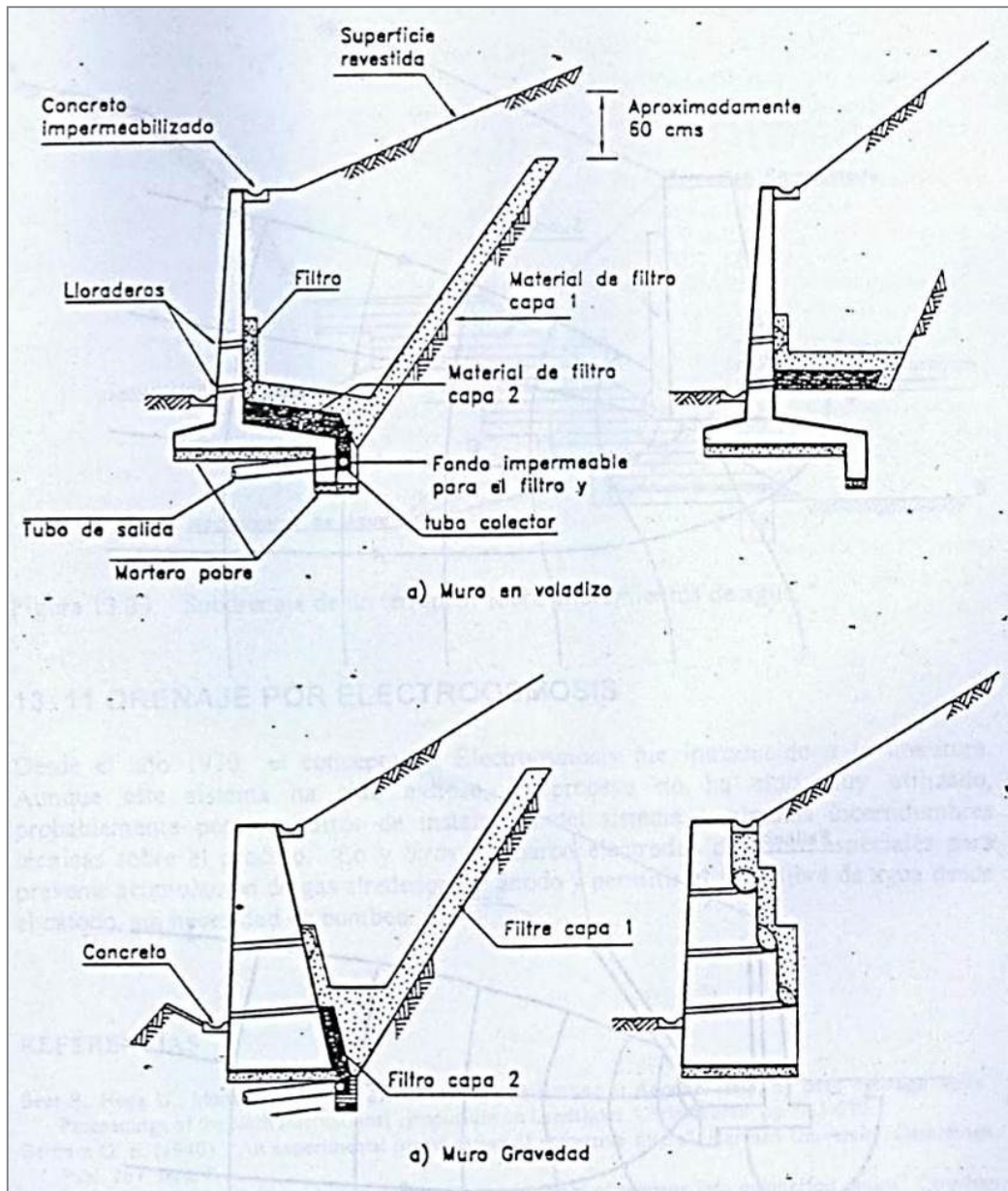


Figura 32: Ejemplos de subdrenajes con muros de contención.



a)



b)

Figura 33: Muros de contención. a) Combinación de muro de contención o contrafuerte en el pie de deslizamiento activo (con gaviones) y canalización de quebrada en la margen derecha (vista aguas arriba). b) Muro de contención (Gaviones).

7. CONCLUSIONES

En base al análisis de información geológica de la zona de estudio, así como a los trabajos de campo y la evaluación de peligros geológicos, emitimos las siguientes conclusiones:

- a) El área de estudio se considera geodinámicamente muy activa, debido a la presencia del deslizamiento Aurahuá, que viene a ser un deslizamiento antiguo en proceso de reactivación. Evidencia de estos procesos se ven en el escarpe y pie del deslizamiento.
- b) El deslizamiento Aurahuá es de tipo rotacional y es considerado un mega deslizamiento debido a las dimensiones que presenta. Este evento tiene un ancho de ~ 2 km, el desnivel entre la cabecera y el pie del deslizamiento es 1000 m y la longitud de recorrido es ~ 4 km. Este deslizamiento movilizó millones de metros cúbicos de material; por sus características este deslizamiento llegó a bloquear temporalmente la quebrada del río Tantara.
- c) La descripción del área de estudio se dividió en tres zonas: **Zona 1**, corresponde a la parte alta o cabecera del deslizamiento, donde se observan reactivaciones (caídas y/o derrumbes) con un movimiento retrogresivo; **Zona 2**, corresponde a la parte media del deslizamiento, en esta parte de se encuentra emplazado el poblado de Aurahuá, también corresponde a la zona agrícola. Se observa infraestructura dañada como es el agrietamiento del canal de agua, que produce fuga de agua la cual se infiltra en el subsuelo, y por otro lado se observa construcciones dañadas como el centro educativo que tiene los muros agrietados, esto es producto de la deformación del terreno. **Zona 3**, corresponde a la parte baja del deslizamiento, presenta reactivaciones (derrumbes) que vienen afectando principalmente terrenos de cultivo y la carretera que une los distritos de Aurahuá y Chupamarca, el movimiento es retrogresivo, a ello se suma la erosión causado por el río Tantara.
- d) La causa principal de la reactivación al pie del deslizamiento es al agua producto de las fuertes precipitaciones pluviales y el riego inadecuado que se infiltran, saturan el subsuelo e inestabilizan el talud.
- e) El depósito del deslizamiento Aurahuá presenta poca resistencia al corte y tiene baja cohesión.
- f) La Pendiente del terreno al pie del deslizamiento es fuerte ($> 25^\circ$), lo que permite su inestabilidad sumada a la erosión causada por el río Tantara al pie del talud y el peso que ejercen las caídas y derrumbes que ocurrieron en la cabecera del deslizamiento.
- g) Todos estos movimientos y/o procesos de reactivación pueden ser acelerados por sismos, precipitaciones pluviales excepcionales y la acción del hombre (antrópica).
- h) Los datos InSar muestran una deformación del deslizamiento Aurahuá, lo que indica que se está moviendo lentamente en dirección de la pendiente que viene a ser hacia el Noroeste
- i) Por lo explicado, el poblado que es capital del distrito de Aurahuá y se ubica en el cuerpo del deslizamiento Aurahuá, está afectado por un movimiento lento y constante que afecta infraestructura (canal, colegio y carretera), y las reactivaciones generan pérdida de terrenos de cultivo. De no controlar el avance y deformación de este deslizamiento se podría generar daños mayores. En ese sentido la capital del distrito de Aurahuá se encuentra en peligro inminente a ser afectado por la evolución del deslizamiento si no se toman en cuenta recomendaciones para minimizar o reducir el impacto.

8. RECOMENDACIONES

Las recomendaciones están enfocadas en controlar el drenaje de la zona (agua superficial y subterránea), utilizando diferentes sistemas, disminuyendo las fuerzas que producen movimiento y/o aumentando las fuerzas resistentes. **Se recomienda que los diseños y ejecuciones de las obras, deben de ser realizadas por personal especializado en geotecnia:**

- a) **Levantamiento topográfico:** Realizar un levantamiento topográfico detallado del deslizamiento Aurahuá, utilizando drones a alta resolución (centímetros). Esta herramienta servirá de base para el planteamiento y desarrollo de las obras de estabilización.
- b) **Monitoreo del deslizamiento:** Se debe de realizar un monitoreo del deslizamiento Aurahuá, para ver la deformación y dinámica del deslizamiento.
- c) **Control del agua superficial:** Se debe implementar filtros o subdrenes interceptores, consistentes en zanjas rellenas de material filtrante y elementos de captación y transporte de agua (Ver Item 7). Ello con la finalidad de controlar la presión producida por las aguas subsuperficiales y regular las fluctuaciones del nivel freático, brindando estabilidad y garantizando la permanencia de las obras que se ejecuten en la superficie del terreno, así como mejorar la aireación del suelo en favor de las coberturas vegetales.
- d) **Zanjas de coronación:** Construir zanjas de coronación impermeabilizadas en la cabecera del deslizamiento, con la finalidad de coleccionar las aguas de lluvia y drenarlas hacia una quebrada alterna o por canales de derivación, evitando que se infiltren en las grietas y escarpes (Ver Item 7).
- e) **Drenaje de desvío:** Construcción de zanjas de desvío en los flancos del deslizamiento, con la finalidad de coleccionar y derivar las aguas de lluvia hacia la parte externa del deslizamiento, de manera que no se vea afectado el deslizamiento propiamente dicho.
- f) **Drenaje tipo espina de pez:** Construir drenajes tipo espina de pez con canales revestidos. Un primer canal en la parte superior, con la finalidad de interceptar el escurrimiento en la zona de mayor pendiente; el segundo canal en la parte media con la finalidad de evitar la infiltración de las aguas en el cuerpo del deslizamiento, ~~esto podría detener en parte la deformación del terreno~~. Los canales revestidos deben desembocar a un canal longitudinal con la finalidad de conducir el agua de escorrentía hacia el río Tantara.
- g) **Subdrenajes longitudinales:** Construir subdrenajes longitudinales tipos A, C y D (Figura 24), para captar las aguas subterráneas, reduciendo el nivel freático y evitando la sobresaturación del terreno (Ver Item 7).
- h) **Obras flexibles:** En la parte baja o base del deslizamiento es necesario construir obras flexibles como gaviones impermeabilizados, que se amolden a la deformación producida por el deslizamiento.
- i) **Canalización del río Tantara:** Se debe de canalizar el río Tantara construyendo muros de gaviones para controlar el socavamiento causado en la margen izquierda, fortaleciendo así la base del deslizamiento y previniendo derrumbes.

- j) Reducción del talud y reforestación:** Se debe de reducir el talud del pie del deslizamiento mediante banqueteo y luego se deberá reforestar utilizando plantas nativas.
- k) Control de cárcavas:** Se deberá construir diques escalonados de madera o enrocado en las cárcavas para controlar su avance. Ya colmatados estos diques se procederá a repoblar con árboles y/o arbustos nativos (queuñas o chachacomo).
- l) Entubado de canal:** Entubar con tubería flexible el agua del canal, debido a que el canal presenta deformaciones, agrietamientos y fugas. Se deberá de utilizar el canal de concreto como base donde reposará la tubería, evitando así que se siga infiltrando el agua en el subsuelo.
- m) Capacitación y concientización:** Se deberá capacitar y concientizar mediante talleres o charlas a los habitantes del distrito de Aurahuá sobre los peligros a los que están expuestos. La Municipalidad deberá señalar o delimitar las zonas de peligro.
- n) Riego:** Se recomienda el uso de técnicas modernas de riego, como el riego por aspersión o goteo, para evitar la infiltración y saturación del subsuelo. Dejando de lado el riego por gravedad o inundación.
- o) Construcción de viviendas:** Mejorar el método de construcción de las viviendas y entidades públicas, utilizando técnicas modernas recomendadas por SENCICO y/o universidades como la UNMSM, UNI y PUCP.

9. REFERENCIAS

- CRUDEN, D. M., VARNES, D. J., (1996) Landslide types and processes, en Turner, K., y Schuster, R. L., ed., Landslides investigation and mitigation: Washington D. C, National Academy Press, Transportation Research Board Special Report 247, p. 36-75.
- Delgado, F., Zerathe, S., Schwartz, S., Mathieux, B., & Benavente, C. (2022). Inventory of large landslides along the Central Western Andes (ca. 15°–20° S): Landslide distribution patterns and insights on controlling factors. *Journal of South American Earth Sciences*, 116, 103824.
- Froude, M. J., & Petley, D. N. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(8), 2161-2181
- Grupo GEMMA (PMA: GCA, 2007), Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las comunidades Andinas, Canada, 404 p.
- Ingemmet. (2021) Deslizamiento de Aurahuá. INGEMMET, Opinión técnica, 22p.
- Luza, C.; Sosa, N. & Núñez, S. (2015). Deslizamiento de Aurahuá. Informe Técnico N° A6697, INGEMMET. 19 p.
- SUAREZ, J. (1998). Deslizamiento y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Bucaramanga, Colombia. 548 p.
- Thollard, F., Clesse, D., Doin, M. P., Donadieu, J., Durand, P., Grandin, R., ... & Specht, B. (2021). Flatsim: The form@ ter large-scale multi-temporal sentinel-1 interferometry service. *Remote Sensing*, 13(18), 3734.
- VARNES, D.J. (1978), Slope movements types and processes, en Schuster R.L., y Krizek R.J., ed, Landslides analysis and control: Washington D.C, National Academy Press, Transportation Research Borrard Special Report 176, p. 9-33.
- Vílchez, M. & Ochoa, M. (2014) –Zonas críticas por peligros geológicos en la Región Huancavelica, informe inédito. Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 58 p.
- Vílchez, M.; Ochoa, M. & Pari, W. (2019) - Peligro geológico en la región Huancavelica. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica,69, 225 p.,9 mapas.