UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS

EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGION CUSCO 2025

PRESENTADO POR:
Br. EDITH ANALY USCAMAYTA ASLLA
Br. MILAGROS YANINA PARI QUISPE

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓLOGO

ASESOR:
Ing. VICTOR VIDAL GARATE GONGORA

CUSCO – PERÚ

2026

Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el **Asesor** ING. VICTOR VIDAL GARATE GONGORA quien aplica el software de detección de similitud al trabajo de investigación/tesistitulada: EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGION CUSCO 2025

Presentado por: EDITH ANALY USCAMAYTA ASLLA DNI N° 76281010;
presentado por: MILAGROS YANINA PARI QUISPE DNI N°: 71174838
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO GEÓLOGO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del ***Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC*** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 10 **%.**

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 21 de OCTUBRE de 20.26

Firma
Post firma. Victor Vidal Garate Gongora
Nro. de DNI. 29390015
ORCID del Asesor. 0000-0002-4296-6482

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 27259 : 641892614

Pari- Uscamayta

Evaluación Geológica para la Estabilidad de Taludes del KM 56 y 57 del Tramo Carretero Tungasuca- Livitaca, Región Cusco 2...

Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::27259:641892614

Fecha de entrega
20 oct 2026, 6:40 p.m. GMT-5

Fecha de descarga
20 oct 2026, 7:07 p.m. GMT-5

Nombre del archivo
TESIS_USCAMAYTA Y PARI.pdf

Tamaño del archivo
21.6 MB

232 páginas

58.251 palabras

304.054 caracteres

10% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

9% Fuentes de Internet
2% Publicaciones
7% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

***A mi madre, Honoria Aslla Peralta**, por su amor incondicional y sus oraciones que me sostuvieron en los momentos difíciles. Todo lo que soy y lo que he logrado te lo debo a ti.*

***A mi padre, Facundo Uscamayta Yahuaire**, por enseñarme el valor del trabajo y la perseverancia. Tu ejemplo de fortaleza y tu apoyo incondicional han sido mi guía.*

***A mi hermanito, Diver Jesús Uscamayta Aslla**, por ser mi alegría en lo días grises y el impulso para querer ser un mejor ejemplo para ti.*

***A toda mi familia y a mis amigos**, quienes, con su cariño, palabras de aliento y compañía hicieron este camino más llevadero. Gracias por estar siempre.*

Edith Analy Uscamayta Aslla

***A Dios**, dueño de mi vida y de mis sueños, que me sostuvo en los momentos más difíciles y me dio la sabiduría necesaria para culminar esta etapa, porque este triunfo es el reflejo de su fidelidad.*

***A mi madre, Rosa Quispe Chauca,** creyente fiel y ejemplo de amor a Dios. Sus oraciones fueron mi refugio y mi fuerza para llegar hasta aquí.*

***A mis hermanos, Lisbet, David, Jorge, Maribel, Milagros S., Siomara, Gabriela y Suly**, por su apoyo emocional, sus palabras de aliento y por estar siempre a mi lado*

***A mi gata Esposa**, que sin saber leer estuvo siempre a mi lado, gracias por tu compañía leal, por tus maullidos de aliento y por recordarme que a veces la paz se encuentra en una mirada tierna.*

Milagros Yanina Pari Quispe

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, *por darme la fortaleza necesaria para alcanzar esta meta. Sin su guía y bendición, nada de esto habría sido posible.*

Edith Analy Uscamayta Aslla

A mi hermana Lisbet, *agradecerle de manera especial por su apoyo constante y sus palabras de aliento. Gracias por recordarme siempre lo capaz que soy.*

Milagros Yanina Pari Quispe

De manera especial, agradecemos a ***nuestro asesor*** *Mgt. Victor Vidal Garate Góngora, por su orientación, paciencia y valioso aporte durante el desarrollo de este trabajo. Su guía fue fundamental para culminar con éxito esta investigación.*

A mis padres, Honoria y Facundo*, por su amor incondicional, su sacrificio y su confianza en mí. Gracias por estar siempre a mi lado, impulsándome a ser mejor persona y profesional. Este logro es tan suyo como mío.*

A mis padres, Rosa y Julio, *por su esfuerzo incansable y por enseñarme con su ejemplo el valor del trabajo y la perseverancia. Gracias por ser mi mayor bendición.*

A mis mejores amigas, Analy y Mayra*, que con su presencia constante y su cariño incondicional me recordaron que nunca estuve sola en este camino. Gracias por escucharme, por apoyarme y por creer en mí.*

A los docentes de nuestra facultad*, quienes compartieron sus conocimientos y experiencias, contribuyendo a nuestra formación académica y personal.*

Edith Analy Uscamayta Aslla y Milagros Yanina Pari Quispe

INDICE

INTRODUCCIÓN 14
CAPITULO 1: ASPECTOS GENERALES 16
1.1. Planteamiento del problema 16
1.2. Formulación del problema 17
1.2.1. Problema general 17
1.2.2. Problemas específicos 17
1.3. Justificación 18
1.3.1. Conveniencia 18
1.3.2. Relevancia Social 18
1.3.3. Implicancias prácticas 18
1.3.4. Valor teórico 19
1.3.5. Utilidad metodológica 19
1.4. Objetivos de investigación 19
1.4.1. Objetivo general 19
1.4.2. Objetivos específicos 19
1.5. Delimitación del estudio 20
1.5.1. Delimitación espacial 20
1.5.1.1. Ubicación política. 20
1.5.1.2. Ubicación geográfica. 20
1.5.1.3. Accesibilidad. 21
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO 22
2.1. Antecedentes de estudios 22
2.1.1. Antecedentes internacionales 22
2.1.2. Antecedentes nacionales 24
2.1.3. Antecedentes locales 27
2.2. Bases teóricas 29
2.2.1. Talud 29
2.2.2. Evaluación geotécnica 30

2.2.3. Estabilidad de taludes 30
2.2.3.1. Factores que influyen en la estabilidad de taludes. 31
2.2.3.2. Parámetros necesarios en el cálculo del equilibrio. 32
2.2.3.2.1. Para taludes en suelo. 32
2.2.3.2.2. Para taludes en roca. 34
2.2.4. Estudio de mecánica de suelos 36
2.2.4.1. Propiedades físico mecánica de los suelos. 37
2.2.5. Estudio de mecánica de rocas 38
2.2.5.1. Macizos rocosos. 39
2.2.5.2. Caracterización de la roca intacta. 39
2.2.5.3. Caracterización de las discontinuidades. 40
2.2.5.3.1. Tipos de discontinuidades. 40
2.2.6. Clasificación geomecánica del macizo rocoso 41
2.2.6.1. Índice de designación de la calidad de la roca (RQD). 41
2.2.6.2. Clasificación de Bieniawski (RMR). 43
2.2.6.3. Clasificacion SMR. 45
2.2.6.4. Clasificación GSI. 48
2.2.7. Clasificación de movimientos en masa. 49
2.2.7.1. Deslizamientos. 50
2.2.7.2. Flujos. 51
2.2.7.3. Desprendimientos y vuelcos. 54
2.2.7.4. Avalanchas rocosas y de derrubios. 55
2.2.7.5. Desplazamientos laterales. 56
2.2.8. Aspectos hidrogeológicos 56
2.2.9. Criterios de resistencia 58
2.2.9.1. Criterio de resistencia de Hoek – Brown. 58
2.2.9.2 Criterio de resistencia de Mohr – Coulomb. 60
2.2.10. Mecanismos de rotura en taludes 61
2.2.10.1. Rotura planar. 62
2.2.10.2. Rotura en cuña. 63
2.2.10.3. Rotura circular. 65

2.2.10.4. Rotura por vuelco. 65
2.2.11. Métodos de análisis de estabilidad de taludes 67
2.2.11.1. Método de Equilibrio Limite (LEM). 67
2.2.11.1.1. Análisis de estabilidad por falla planar. 68
2.2.11.1.2. Análisis de estabilidad por falla en cuña. 71
2.2.11.1.3. Análisis de estabilidad falla por vuelco. 74
2.2.11.1.4. Análisis de estabilidad por falla circular. 75
2.2.11.2. Métodos de análisis en deformaciones (Métodos Numéricos). 80
2.2.11.3. Análisis estático. 80
2.2.11.4. Análisis pseudoestático. 81
2.2.12. Métodos empíricos 81
2.2.13. Normas y reglamentaciones 82
2.2.14. Medidas de estabilización de taludes 83
2.2.14.1 Corrección geométrica. 83
2.2.14.2. Drenajes. 84
2.2.14.3. Elementos estructurales resistentes. 85
2.2.14.4. Corrección superficial. 86
2.3. Hipótesis 87
2.3.1. Hipótesis general 87
2.3.2. Hipótesis especificas 87
2.4. Variables 88
2.4.1. Identificación de variables 88
2.4.2. Matriz de operacionalización de variables 89
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA 90
3.1. Tipo de investigación 90
3.2. Enfoque de la investigación 90
3.3. Alcance de la investigación 90
3.4. Diseño de investigación 91
3.5. Población 91
3.6. Muestra 92
3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos 92

3.7.1. Técnicas de recolección de datos 92
3.7.2. Instrumentos de recolección de datos 93
CAPITULO 4: RESULTADOS 94
4.1 Marco geológico 94
4.1.1. Geología regional 94
4.1.1.1. Grupo Tacaza. 94
4.1.1.2. Grupo Puno. 95
4.1.1.3. Formación quechua grande. 97
4.1.2. Estratigrafía 97
4.2. Marco geomorfológico 99
4.2.1. Unidades geomorfológicas 99
4.2.1.1. Complejo Volcánico (Co-v). 100
4.2.1.2. Montaña en roca Volcano – Sedimentaria (RM- rvs). 100
4.2.1.3. Montaña en roca sedimentaria (RM-rs). 100
4.2.1.4. Vertiente con depósito de deslizamiento (V-dd). 100
4.2.1.5. Vertiente o piedemonte coluvio – deluvial (V-cd). 100
4.2.1.6. Terraza indiferenciada (Ti). 101
4.2.1.7. Domo Volcánico (Do-v). 101
4.3. Geología estructural, geodinámica y sismicidad 103
4.3.1. Geología estructural 103
4.3.2. Geodinámica interna 105
4.3.2.1. Sismicidad. 105
4.3.2.2. Peligro sísmico. 108
4.3.3. Geodinámica externa 109
4.4. Hidrología 110
4.4.1. Información hidrometeorológica 110
4.4.1.1. Estaciones meteorológicas de Yanaoca y Livitaca. 111
4.4.1.2. Precipitación promedio de la zona de estudio. 111
4.4.1.3. Temperatura mínima de la zona de estudio. 114
4.4.1.4. Temperatura máxima de la zona de estudio. 114
4.4.2. Infiltración en los taludes 115

4.5. Estudio geotécnico 121
4.5.1. Trabajos de campo 122
4.5.2. Trabajos de laboratorio 127
4.5.3. Evaluación de los taludes 128
4.5.3.1. Talud N° 01 Tramo Km 56+500 – Km 56+700 129
4.5.3.2. Talud N° 02 Tramo Km 56+700 – Km 56+800 135
4.5.3.3. Talud N° 03 tramo Km 56+800 – 57+000. 141
4.5.3.4. Talud N° 04 tramo Km 56+900 – 57+000. 147
4.5.4. Estudio de Soluciones 153
4.5.4.1. Condicionantes. 154
4.5.4.2. Alternativas. 155
4.5.4.3. Solución adoptada. 163
4.5.4.4. Desarrollo de la alternativa adoptada. 164
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN 166
CONCLUSIONES 168
RECOMENDACIONES 170
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 172
ANEXOS 176

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Nomenclatura de talud y ladera. 30
Figura 2 Clasificación geomecánica del sistema GSI. 49
Figura 3 Tipos de movimientos de ladera. 51
Figura 4 Partes de un deslizamiento. 51
Figura 5 Tipos de flujo. 54
Figura 6 Desprendimientos y vuelcos en frentes rocosos y suelos. 55
Figura 7 Avalanchas en rocas y derrubios. 55
Figura 8 Desplazamientos laterales en suelo y roca. 56
Figura 9 Caminos realizados por el agua en un talud. 57
Figura 10 Criterio de resistencia de Mohr Coulomb. 61
Figura 11 Principales tipos de falla de bloques en taludes. 62
Figura 12 Condiciones para falla planar. 63
Figura 13 Condiciones geométricas para la falla en cuña. 64
Figura 14 Condiciones típicas de deslizamiento circular. 65
Figura 15 Condiciones cinemáticas para el deslizamiento flexural previo al vuelco. 66
Figura 16 Métodos de cálculo de estabilidad de taludes. 67
Figura 17 Geometrías de una falla planar en taludes. 68
Figura 18 Esquema de las posibles distribuciones de presión de agua subterránea. 70
Figura 19 Modelo de análisis de fuerzas para el cálculo del FS de una cuña. 71
Figura 20 Modelo geométrico para el análisis de estabilidad de una cuña considerando presión de agua y resistencia al corte. 72
Figura 21 Condiciones cinemáticas para el deslizamiento flexural previo al vuelco. 74
Figura 22 Esquema del modelo de falla circular. 76
Figura 23 Parámetros geométricos y esquema de esfuerzos en una rebanada para el método de Fellenius. 77
Figura 24 Modelo geométrico y de fuerzas para el método de Janbu simplificado. 78
Figura 25 Esquema de un talud con bermas. 84
Figura 26 Sistemas de drenaje en un talud. 84
Figura 27 Esquema de un anclaje. 85

Figura 28 Tipos de muros de contención. 86
Figura 29 Tabla estratigráfica. 97
Figura 30 Caracterización geológica superficial del talud. 98
Figura 31 Caracterización geológica del talud. 98
Figura 32 Conglomerados del Grupo Puno, progresiva 59+100. 99
Figura 33 Material coluvial con fragmentos de roca. 99
Figura 34 Unidades geomorfológicas reconocidas en la zona de estudio. 101
Figura 35 Reconocimiento de las Unidades Geomorfológicas al sureste de la zona de estudio. 102
Figura 36 Bolón en matriz de depósito coluvio-deluvial. 102
Figura 37 Mapa estructural del cuadrángulo de Livitaca 29s. 104
Figura 38 Zonificación sísmica del Perú según la Norma Técnica E.030. 106
Figura 39 Distribución sísmica en la Región del Cusco, IGP. 108
Figura 40 Probabilidad diaria de precipitación en Yanaoca y Livitaca. 111
Figura 41 Comportamiento histórico de la precipitación en la estación meteorológica durante el periodo 1972-2016. 113
Figura 42 Comportamiento histórico de la precipitación en la estación meteorológica de Combapata durante el periodo1972-2016. 113
Figura 43 Evidencia de escorrentía superficial y concentración de flujo hídrico en el tramo carretero. 121
Figura 44 Toma de datos estructurales in situ sobre talud de arenisca. 122
Figura 45 Toma de datos estructurales con brújula Brunton. 123
Figura 46 Muestreo de roca arenisca fracturada con martillo geológico. 124
Figura 47 Puntos de obtención de muestras en los taludes del tramo carretero Tungasuca-Livitaca. 127
Figura 48 Ejecución de ensayos de laboratorio para la caracterización geotécnica del material. 128
Figura 49 Fotografía del Talud N° 01 del tramo carretero Tungasuca - Livitaca. 130
Figura 50 Modelo del Talud N° 01 en el software Slide para la condición drenada y estática. 132
Figura 51 Modelo del Talud N° 01 en el software Slide para la condición no drenada-pseudoestática. 133

Figura 52 Modelo de estabilidad del Talud N° 01 con la solución de corrección. 134
Figura 53 Fotografía del Talud N° 02 del tramo carretero Tungasuca - Livitaca. 136
Figura 54 Modelo del Talud N° 02 en el software Slide para la condición drenada-estática.... 138
Figura 55 Modelo del Talud N° 02 en el software Slide para la condición no drenada-pseudoestática. 139
Figura 56 Modelo del Talud N° 02 en el software GEO5 para la condición drenada-pseudoestática. 140
Figura 57 Fotografía del Talud N° 03 del tramo carretero Tungasuca - Livitaca. 142
Figura 58 Modelo del Talud N° 03 en el software Slide para la condición drenada-estática..... 144
Figura 59 Modelo del Talud N° 03 en el software Slide para la condición no drenada-pseudoestática. 145
Figura 60 Modelo del Talud N° 03 en el software GEO5 para la condición drenada pseudoestática. 146
Figura 61 Fotografía del Talud N° 04 del tramo carretero Tungasuca - Livitaca. 148
Figura 62 Modelo del Talud N° 04 en el software Slide para la condición no drenada-pseudoestática. 151
Figura 63 Modelo del Talud N° 04 en el software GEO5 para la condición drenada-pseudoestática. 152

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ubicación política de la zona de estudio..... 20
Tabla 2 Coordenadas de la zona de estudio. 20
Tabla 3 Accesibilidad a la zona de estudio 21
Tabla 4 Factores influyentes en la estabilidad de taludes. 31
Tabla 5 Clasificación de la resistencia a compresión simple de la roca. 39
Tabla 6 Tipo de discontinuidades en un macizo rocoso. 40
Tabla 7 Calidad de la roca según el porcentaje del RQD 42
Tabla 8 Clasificación geomecánica de Macizos rocosos (RMR) según Bieniawski. 44
Tabla 9 Factores de ajuste de juntas..... 46
Tabla 10 Factor de ajuste por método de excavación F_4..... 46
Tabla 11 Clasificación y caracterización de taludes según el índice SMR..... 47
Tabla 12 Clasificación de la calidad del macizo rocoso según el GSI. 48
Tabla 13 Valores referenciales de relación horizontal: vertical para taludes en corte..... 83
Tabla 14 Cuadro de valores de la zona sísmica para el área de estudio (Tungasuca - Livitaca). 107
Tabla 15 Registro de eventos sísmicos de la zona de estudio (Tungasuca - Livitaca). 109
Tabla 16 Precipitación mensual (mm) de la estación Pomacanchi. 112
Tabla 17 Promedio de temperaturas mínimas de la estación Pomacanchi. 114
Tabla 18 Promedio de temperaturas máximas de la estación Pomacanchi. 115
Tabla 19 Temperatura media mensual multianual (°C). 116
Tabla 20 Temperatura media mensual, índice térmico, ETP y ETm en Pomacanchi..... 117
Tabla 21 Coeficientes de escorrentía método racional. 118
Tabla 22 Balance hídrico mensual e infiltración estimada. 119
Tabla 23 Formato de registro utilizado en campo..... 124
Tabla 24 Parámetros de discontinuidades registrados en campo del talud para la clasificación RMR..... 126

Tabla 25 Resultados de los ensayos de laboratorio..... 128
Tabla 26 Tabla de coordenadas UTM del talud N° 01. 129
Tabla 27 Datos geométricos del talud N° 01. 130
Tabla 28 Propiedades del material obtenidos de ensayos de laboratorio, Talud N° 01. 130
Tabla 29 Propiedades de los materiales (Software RocData) que componen el Talud N° 01.. 131
Tabla 30 Factores de seguridad del Talud N° 01 obtenido mediante el software Slide (condición drenada-estática). 132
Tabla 31 Factores de seguridad del Talud N° 01 obtenido mediante el software Slide (condición no drenada-pseudoestática). 133
Tabla 32 Factores de seguridad del Talud N° 01 aplicando las soluciones en GEO5. 135
Tabla 33 Tabla de coordenadas UTM del talud N° 02. 135
Tabla 34 Datos geométricos del talud N° 02. 136
Tabla 35 Propiedades del material obtenidos de ensayos de laboratorio, Talud N° 02. 137
Tabla 36 Propiedades de los materiales (Software RocData) que componen el Talud N° 02.. 137
Tabla 37 Factores de seguridad del Talud N° 02 obtenido mediante el software Slide (condición drenada-estática). 138
Tabla 38 Factores de seguridad del Talud N° 02 obtenido mediante el software Slide (condición no drenada-pseudoestática). 139
Tabla 39 Factores de seguridad del Talud N° 02 aplicando las soluciones en GEO5. 140
Tabla 40 Tabla de coordenadas UTM del talud N° 03. 141
Tabla 41 Datos geométricos del talud N° 03. 142
Tabla 42 Propiedades del material obtenidos de ensayos de laboratorio, Talud N° 03. 142
Tabla 43 Propiedades de los materiales (Software RocData) que componen el Talud N° 03.. 143
Tabla 44 Factores de seguridad del Talud N° 03 obtenido mediante el software Slide (condición drenada-estática). 144
Tabla 45 Factores de seguridad del Talud N° 03 obtenido mediante el software Slide (condición no drenada-pseudoestática). 145
Tabla 46 Factores de seguridad del Talud N° 03 aplicando las soluciones en GEO5. 146
Tabla 47 Tabla de coordenadas UTM del talud N° 04. 147
Tabla 48 Datos geométricos del talud N° 04. 148
Tabla 49 RQD estimado mediante la relación Priest y Hudson. 149

Tabla 50 Propiedades del material (Software RocData) que componen el Talud N° 04..... 151
Tabla 51 Factores de seguridad del Talud N° 04 obtenido mediante el software Slide (condición no drenada-pseudoestática)..... 152
Tabla 52 Factores de seguridad del Talud N° 04 aplicando las soluciones en GEO5..... 153
Tabla 53 Valoración multicriterio de No realizar ninguna acción..... 156
Tabla 54 Valoración multicriterio de la alternativa Corrección de la geometría del talud..... 157
Tabla 55 Valoración multicriterio de la alternativa Muros de contención..... 159
Tabla 56 Valoración multicriterio de la alternativa Drenajes..... 160
Tabla 57 Valoración multicriterio de la alternativa Elementos estructurales resistentes..... 162
Tabla 58 Valoración multicriterio de las alternativas de estabilización para los taludes del tramo carretero Tungasuca - Livitaca..... 163

RESUMEN

La inestabilidad de taludes en carreteras altoandinas constituye un problema recurrente que afecta la transitabilidad durante la temporada de lluvias. Este estudio aborda el caso del tramo carretero Tungasuca – Livitaca ubicado en la región de Cusco, cuyos cortes viales están conformados por depósitos coluvio-deluviales superficiales y areniscas fracturadas. El objetivo principal fue evaluar la estabilidad de los taludes mediante una caracterización geotécnica y proponer soluciones de estabilización técnicamente viables.

El trabajo se desarrolló en cuatro etapas, primero se realizó una campaña de campo que incluyó el mapeo geológico, mapeo geomecánico de discontinuidades, la toma de muestras de suelo y roca, y la ejecución de ensayos in situ y de laboratorio. Con esos datos se determinaron los parámetros de resistencia del coluvión y de la arenisca. En la segunda etapa se efectuó un balance hídrico mensual empleando los registros de precipitación y temperatura de la estación Pomacanchi, con el fin de estimar la infiltración durante la estación lluviosa y definir el nivel freático crítico. En la tercera etapa se modelaron los taludes en los programas Slide y GEO5, considerando escenarios estáticos y pseudoestáticos con coeficiente sísmico de 0.125 y finalmente se implementaron los modelos de las soluciones de estabilización. Tras la intervención los taludes superaron los valores de factores de seguridad mínimos exigidos de 1.25. Se concluye que la combinación de la caracterización geotécnica, balance hídrico y el modelado permite diagnosticar con precisión los mecanismos de falla y validar soluciones de estabilización adaptadas a las condiciones reales del tramo carretero.

Palabras clave: Estabilidad de taludes, Depósitos coluvio-deluviales, Arenisca fracturada, Factor de seguridad, Carretera altoandina.

ABSTRACT

Slope instability along high-Andean roads is a recurring problem that affects trafficability during the rainy season. This study addresses the case of the Tungasuca – Livitaca road section, located in the Cusco region, where road cuts are composed of superficial colluvial-deluvial deposits and fractured sandstones. The main objective was to evaluate slope stability through a geotechnical characterization and to propose technically viable stabilization solutions.

The work was developed in four stages. First, a field campaign was carried out, including geological mapping, geomechanical mapping of discontinuities, sampling of soil and rock, and in situ and laboratory testing. With these data, the strength parameters of the colluvium and sandstone were determined. In the second stage, a monthly water balance was performed using precipitation and temperature records from the Pomacanchi station, in order to estimate infiltration during the rainy season and define the critical water table. In the third stage, the slopes were modeled in Slide and GEO5, considering static and pseudo-static scenarios with a seismic coefficient of 0.125, and finally the stabilization solution models were implemented. After the intervention, the slopes exceeded the minimum required factors of safety of 1.25. It is concluded that the combination of geotechnical characterization, water balance, and numerical modeling allows accurate diagnosis of failure mechanisms and validation of stabilization solutions adapted to the real conditions of the road section.

Keywords: Slope stability, Colluvial-deluvial deposits, Fractured sandstone, Factor of safety, High-Andean road.

INTRODUCCIÓN

La estabilidad de taludes es un aspecto importante de la infraestructura vial, como también es un factor fundamental para el desarrollo económico de los pobladores de las distintas comunidades. En el Perú existen numerosos tramos carreteros que atraviesan zonas montañosas con pendientes pronunciadas lo que los hace vulnerables a deslizamientos y procesos de inestabilidad.

La presente investigación corresponde a la evaluación geotécnica para la estabilidad de taludes del tramo carretero Tungasuca – Livitaca específicamente entre los kilómetros 56 y 57, el cual es un sector importante para la interconexión de comunidades, sin embargo, presenta varios problemas con respecto a la estabilidad de los taludes que afecta la vía de circulación de vehículos de servicio de transporte y carga. Estas condiciones demandan estudios especializados que permitan evaluar el comportamiento de los taludes y establecer lineamientos técnicos que garanticen su estabilidad.

El documento que se tiene se ha organizado en capítulos que buscan conducirlo desde los fundamentos hasta los resultados. El primer capítulo, dedicado a los aspectos generales, sitúa el problema en su contexto geográfico y vial, formulación de objetivos y delimita el alcance de la investigación. El segundo capítulo desarrolla el marco teórico, donde se revisan los conceptos esenciales de estabilidad de taludes, los métodos de clasificación geomecánica, los criterios de rotura, mecanismos de falla y las normativas, así como las hipótesis y variables de la investigación. El tercer capítulo describe la metodología empleada desde los trabajos de campo, los ensayos de laboratorio hasta el procesamiento de datos, la población y muestra de la investigación, y la construcción de los modelos en Slide, RocData y GEO5. El cuarto capítulo siendo el más extenso reúne los resultados de la investigación, en él se presentan la caracterización geológica,

geomorfología, estructural, geodinámica, hidrología y geotecnia del tramo, se analizan los factores de seguridad de cada talud en condiciones actuales y se validan las soluciones propuestas. El capítulo 5, discusión de resultados, contrasta los resultados con los antecedentes señalando coincidencias o diferencias y cuáles son las implicancias en el estudio.

Finalmente, se presentan las conclusiones, las cuales sintetizan los principales resultados en función de los objetivos planteados, así como las recomendaciones dirigidas a las futuras investigaciones. De esta manera, se espera que el presente trabajo constituya un aporte significativo para la ingeniería de estabilidad de taludes.

CAPITULO 1: ASPECTOS GENERALES

1.1. Planteamiento del problema

La estabilidad de taludes es la condición en la que una pendiente natural o artificial se mantiene en equilibrio sin que se genere movimientos en masa que afecte la seguridad de las personas, materiales, infraestructura o ecosistema (Wyllie & Mah, 2004).

A nivel mundial, los deslizamientos de terreno son fenómenos que ocurren por diferentes condiciones como precipitaciones y sismos, lo cual ha tenido un fuerte impacto en los ámbitos social, económico y ambiental (Castillo et al., 2020). En Latinoamérica y especialmente en las zonas altoandinas, esta problemática es frecuente por la compleja geología y las condiciones climáticas que plantean el ascenso de la temperatura y las precipitaciones que alteran el ciclo hidrológico (ONU, 2023). El Perú presenta áreas propensas a desastres, principalmente las que se encuentran en la vertiente de la cordillera de los Andes. El fenómeno del cambio climático aumenta la amenaza de desastres hidrometeorológicos, las constantes precipitaciones y las condiciones topográficas producen deslizamientos de suelos y rocas. Este peligro plasma un riesgo para los pobladores y genera congestiones de tránsito (Peña et al., 2023).

La inestabilidad de taludes se origina de acuerdo a factores internos y externos tales como; litologías débiles, presencia de discontinuidades, meteorización de materiales, precipitaciones intensas, cortes inadecuados en la carretera, falta de drenaje y sobrecarga vehicular (Wyllie & Mah, 2004).

En la región Cusco, provincias de Canas y Chumbivilcas, el tramo carretero Tungasuca – Livitaca presenta problemas de inestabilidad en los kilómetros 56 y 57, donde se ha registrado inestabilidad de taludes a causa de los deslizamientos que afectan la transitabilidad vehicular, que ponen en riesgo a los pobladores y generan sobrecostos en el mantenimiento de la carretera. Por

ello, es necesario llevar a cabo una evaluación geotécnica de la estabilidad de taludes en los km 56 y 57 del tramo carretero Tungasuca – Livitaca, aplicando softwares especializados como Rocscience y GEO5, con la finalidad de determinar los factores de seguridad de los taludes y proponer medidas de estabilización. Esta investigación permitirá aportar soluciones técnicas para garantizar una mejor funcionalidad de la carretera, reducir los riesgos de deslizamiento y contribuir a la seguridad y desarrollo económico de las provincias.

La repercusión de no considerar este problema implica el obstáculo del tránsito vehicular, riesgos de accidentes a causa de los deslizamientos y de los malos cortes del talud, aislamiento de comunidades a falta de conexión por carretera y mayores costos de reparación. De no ejecutar los estudios geotécnicos específicos, la situación podría empeorar, aumentando la continuidad de deslizamientos y afectando seriamente la seguridad en la carretera y la economía local.

1.2.Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cómo influye la evaluación geotécnica para determinar la estabilidad de los taludes en los kilómetros 56 y 57 del tramo carretero Tungasuca – Livitaca, región Cusco 2025?

1.2.2. Problemas específicos

P1. ¿Cuáles son las características geológicas y geotécnicas que influyen en la estabilidad de los taludes en los kilómetros 56 y 57 del tramo carretero Tungasuca – Livitaca, región Cusco 2025?

P2. ¿Cuál es la relación de las condiciones hidrológicas y la estabilidad de los taludes en el tramo carretero Tungasuca – Livitaca, región Cusco 2025?

P3. ¿De qué manera el modelado de la estabilidad de los taludes, mediante la determinación del factor de seguridad, permite proponer un diseño conceptual de medidas de protección y estabilización en el tramo carretero Tungasuca – Livitaca en los kilómetros 56 y 57, región Cusco 2025?

1.3. Justificación

1.3.1. Conveniencia

Esta investigación es de conveniencia porque permite conocer las condiciones geotécnicas que actúan en la estabilidad de taludes en el tramo carretero Tungasuca – Livitaca, esta vía es importante debido a que conecta localidades, es por donde se mueve la producción y transporte. Así mismo permitirá identificar los sectores críticos y priorizar intervenciones.

1.3.2. Relevancia Social

La presente investigación es de relevancia social, debido a que los resultados beneficiarán directamente a los usuarios del tramo carretero Tungasuca – Livitaca, al estabilizar los taludes críticos se reducen las interrupciones temporales del tránsito, garantizando que los pobladores trasladen sus productos, lleguen a sus centros de trabajo, y que las ambulancias transiten de manera efectiva.

1.3.3. Implicancias prácticas

El presente trabajo ayudará a resolver los problemas de inestabilidad de taludes que afectan la seguridad y la operatividad de la carretera. Asimismo, el uso de softwares especializados como Rocscience y GEO5 permitirá implementar procedimientos modernos de análisis que faciliten la toma de decisiones y saber con exactitud qué medidas correctivas funcionará. Además, la metodología empleada podrá aplicarse en otros tramos con problemas similares ahorrando tiempo y recursos en futuras investigaciones.

1.3.4. Valor teórico

Esta tesis es de valor teórico, debido a que contribuye al conocimiento geotécnico local, genera una base de datos de parámetros de resistencia y valida metodologías de evaluación en condiciones geológicas similares. Así mismo llena el vacío en conocimiento sobre la estabilidad de taludes en el tramo carretero Tungasuca-Livitaca, donde no existe antecedentes de estudios.

1.3.5. Utilidad metodológica

La investigación es metodológicamente práctica porque integra modelado computacional geotécnico (Rocsciencie y GEO5) que en conjunto con trabajos de campo, laboratorio y gabinete; constituyen una metodología actual en estudios de estabilidad de taludes en carreteras. Lo cual genera una guía práctica para que otros tesistas o profesionales sepan que parámetros considerar y como interpretar los factores de seguridad.

1.4. Objetivos de investigación

1.4.1. Objetivo general

Realizar una evaluación geotécnica para la estabilidad de taludes en los kilómetros 56 y 57 del tramo carretero Tungasuca – Livitaca, región Cusco 2025.

1.4.2. Objetivos específicos

O1. Caracterizar las condiciones geológicas y geotécnicas que influyen para la estabilidad de los taludes en los kilómetros 56 y 57 del tramo carretero Tungasuca – Livitaca, región Cusco 2025.

O2. Evaluar las condiciones hidrológicas para la estabilidad de los taludes en los kilómetros 56 y 57 del tramo carretero Tungasuca – Livitaca, región Cusco 2025.

O3. Modelar la estabilidad de los taludes determinando los factores de seguridad y proponer un diseño conceptual de medidas de protección y estabilización en los kilómetros 56 y 57 del tramo carretero Tungasuca – Livitaca, región Cusco 2025.

1.5. Delimitación del estudio

1.5.1. Delimitación espacial

La investigación se desarrolla a cabo en el tramo carretero Tungasuca – Livitaca, específicamente en los kilómetros 56 y 57, de la región de Cusco.

1.5.1.1. Ubicación política.

Tabla 1

Ubicación política de la zona de estudio.

Departamento	Cusco
Provincias	Canas - Chumbivilcas
Distritos	Tungasuca - Livitaca

1.5.1.2. Ubicación geográfica.

Geográficamente el tramo en estudio está comprendido en las siguientes coordenadas:

Tabla 2

Coordenadas de la zona de estudio.

Carretera Tungasuca - Livitaca	**Coordenadas UTM**	
	Este (m)	**Norte (m)**
Punto inicial	227854.82	8425842.90
Punto final	227563.10	8425862.68

Nota. Adaptado de Google Earth.

1.5.1.3. Accesibilidad.

El tramo carretero Tungasuca – Livitaca se ubica en la región de Cusco, provincias de Canas y Chumbivilcas. La ruta de acceso desde la ciudad de Cusco es la siguiente:

Tabla 3

Accesibilidad a la zona de estudio

Origen	Destino	Tipo de vía	Tiempo (horas)	Estado
Cusco	Tungasuca	Asfaltada	2	Bueno
Tungasuca	Tambo Ausanta	Afirmada	2.10	Regular
		Total	4.10	

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudios

2.1.1. Antecedentes internacionales

A1. Wu et al., (2025) "NUMERICAL SIMULATION STUDY OF RAINFALL-INDUCED SATURATED-UNSATURATED LANDSLIDE INSTABILITY AND FAILURE" (ESTUDIO DE SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA INESTABILIDAD Y FALLA DE DESLIZAMIENTOS DE TIERRA SATURADOS-NO SATURADOS INDUCIDOS POR LA LLUVIA), este artículo tiene como objetivo estudiar el impacto de la lluvia en el mecanismo de inestabilidad y la estabilidad de taludes, utilizando un modelo numérico aplicando un análisis acoplado de flujo saturado-no saturado y deformación. Obteniendo como resultado que la lluvia intensa genera una zona de saturación transitoria que asciende desde el interior del talud, formando una superficie de deslizamiento continua y provocando la inestabilidad del suelo en la parte superior del talud, los patrones de lluvia influyen en la presión de poros, desplazamiento y el factor de seguridad; y concluye que el estudio permite entender como la infiltración reduce la succión matricial y eleva la presión de poros hasta generar un plano de falla.

Este artículo es relevante, debido a su aporte del estudio del impacto de la lluvia, siendo este el mecanismo detonante de la inestabilidad de taludes en suelo, en condiciones saturadas y no saturadas. Por lo que constituye un mecanismo que afecta en nuestra zona de estudio durante las lluvias intensas.

A2. Cevallos, (2023) "ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUD EN ROCA UBICADO EN LA PARROQUIA LA PILA PERTENECIENTE AL CANTÓN MONTECRISTI", tiene como objetivo analizar la estabilidad del talud de roca ubicado en la parroquia Pila y determinar el factor de seguridad, a través de métodos empíricos como la clasificación geomecánica RMR y SMR para

determinar el mecanismo de falla potencial que puede afectar la estabilidad del talud esto implica a recopilar información de la roca como el RQD. Se realizó una investigación de tipo no experimental combinando información de campo, bibliográfica y softwares especializados como Dips 6.0 el cual permite determinar el factor de seguridad mediante el análisis de los taludes en función de su probabilidad de falla previamente determinada en el análisis cinemático, posteriormente se aplicaron métodos analíticos de equilibrio límite para calcular el factor de seguridad en condiciones estáticas y pseudoestáticas, teniendo como resultado que el macizo rocoso está compuesto en su totalidad por lutitas y lodolitas de la formación Dos Bocas. El factor de seguridad fue de 0.738 en análisis estático y 0.523 en análisis pseudoestático, ambos por debajo del valor mínimo, concluyendo que el talud es inestable dado que el factor de seguridad del mismo se encuentra por debajo del valor mínimo establecido por la norma INEN-NEC-SE-GM 26-8. Por último, se propone como medida de remediación la reducción de su pendiente, esto con el objetivo de disminuir las amenazas de deslizamientos del mismo.

Este artículo resulta esencial, en virtud a que contribuye con la importancia de realizar estudios de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso como el RQD, RMR, GSI y las constantes de Hoek-Brown, siendo estos los parámetros que se utilizan para la clasificación del macizo rocoso, también es crucial determinar la geometría del talud para realizar el análisis de la estabilidad ya que Cevallos, (2023) recomienda la reducción de la pendiente como medida correctiva, lo que respalda nuestra propuesta de correción geométrica para estabilizar los taludes estudiados.

A3. Sequeira , (2023) “CONTEXTO DE INESTABILIDAD DE LADERAS EN LA RUTA NACIONAL 613 COTO BRUS, COSTA RICA”, este artículo tiene como objetivo evaluar las condiciones geológicas, geomorfológicas y de disparo por eventos extremos de precipitación y

sintetizar el contexto hidrometeorológico e hidroclimático, utilizando la metodología de inspección de campo, empleando descriptores del estado geomecánico del deslizamiento, corroboración de los materiales y georeferenciación con coordenadas CRTM-05, dando como resultado a escala geológica que los materiales son poco resistentes a la erosión y junto a la deformación de la falla esta textura de los suelos determina la inestabilidad y concentración de deslizamientos sobre todo en una unidad meteorizada a partir de mapas. Concluyendo que la combinación de lluvias extremas, suelos volcánicos meteorizados, alta disección del terreno y la influencia de estructuras geológicas configura un escenario de amenaza latente.

Este artículo aporta la importancia de evaluar las condiciones geológicas, geomorfológicas e hidrometeorológicas, ya que dichos estudios nos ayudan a determinar la concentración de deslizamientos, el tipo de suelo que existe en la zona y los mapas realizados nos brinda información e interpretación de la zona a estudiar para cualquier tipo de análisis durante el estudio.

2.1.2. Antecedentes nacionales

A1. Sackschewski, (2017) “SOLUCIONES PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DE LA CARRETERA CANTA-HUAYLLAY ENTRE LAS PROGRESIVAS DEL KM 102 AL KM 110”, menciona que el objetivo es evaluar la estabilidad de los taludes inestables y proponer soluciones de reconformación de la geometría como el control de filtraciones de agua que garanticen la estabilidad de los cortes viales. Utilizando observaciones geotécnicas de campo, ensayos in situ y de laboratorio, análisis de estabilidad mediante los métodos de Bishop simplificado y Spencer con el software Slide 6.0, empleando el criterio de rotura de Mohr-Coulomb para suelos y el de Hoek-Brown generalizado para macizos rocosos. Identificandose como resultados que la inestabilidad se debía a excavaciones inadecuadas para los materiales presentes, a la orientación de las discontinuidades y a la infiltración de agua. Concluyendo que la

reconformación geométrica de los taludes y el control de las filtraciones de agua constituyen soluciones adecuadas para garantizar la estabilidad a largo plazo en la carretera Canta-Huayllay.

Esta tesis es relevante ya que aporta con la solución de la reconformación de los taludes, lo que coincide con la propuesta planteada de esta investigación. Debido a que presenta un problema idéntico en una carretera altoandina donde se presenta taludes inestables en suelos coluvio-deluviales y rocas meteorizadas.

A2. Ocón , (2015) "EVALUACIÓN GEOTÉCNICA DE INESTABILIDAD DE TALUDES EN LA CARRETERA HUALGAYOC-APAN ALTO", menciona como objetivo evaluar la estabilidad de los taludes, mediante la caracterización geomecánica de los macizos rocosos y de los depósitos cuaternarios coluviales y aluviales, utilizando como metodología un cartografiado litomorfoestructural a lo largo de todo el tramo, para los taludes en roca se aplicó la caracterización geomecánica RMR, RQD y GSI, para los taludes en suelo se tomaron muestras y realizaron ensayos de laboratorio, los datos obtenidos fueron procesados en softwares Slide v6.0 y RocData v.4.0. llegando a los resultados de que las zonas críticas de inestabilidad estan controladas por un alto fracturamiento en los macizos rocosos y la presencia de depósitos coluviales saturados, obteniendo como detonantes principales las precipitaciones intensas y los cambios bruscos de temperatura. Concluyendo que la inestabilidad de los taludes están controladas por la litología, geomorfología y estructural, la combinación de caracterización geomecánica y modelamiento con Slide y RocData permitió determinar el factor de seguridad de cada talud.

Esta tesis es importante ya que contribuye al manejo de los softwares Slide y RocData, lo cual es crucial para nuestra investigación debido a que emplearemos los softwares mencionados además de GEO5, analizando la inestabilidad de taludes en carretera con areniscas fracturadas y depósitos coluviales.

A3. Cuentas, (2024) "ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN EL MACIZO ROCOSO QUELLORCO MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS, EQUILIBRIO LÍMITE, PROBABILÍSTICO Y PROPUESTA DE ESTABILIZACIÓN-PUNO", con el objetivo de analizar la estabilidad del cerro Quellorco y proponer métodos de estabilización que cumplan con el factor de seguridad mínimo requerido, utilizando una metodología de investigación cuantitativa no experimental, de nivel descriptivo-correlacional, dividiendo el trabajo en tres etapas: campo, laboratorio y gabinete. En la fase de campo, se definieron 4 estaciones geomecánicas para recolectar 264 datos de discontinuidades y muestras representativas. La caracterización geomecánica reveló valores variables de RMR (40-61), GSI (29-69) y RQD (27.75-92.00). Los análisis de estabilidad se analizaron en condiciones saturadas y no saturadas, tanto en condiciones estáticas y pseudoestáticas, aplicando el Método de Equilibrio Límite (MEL) y el Método de Elementos Finitos (MEF). Obteniendo como resultados en taludes inestables según el FS menor a 1.5, en las secciones 2, 5, 6, 7 y 8 para condiciones de análisis saturado-pseudoestatico, considerando una saturación del 75% y carga sísmica horizontal de 0.12. En el caso del análisis por MEF los valores del FS fueron muy similares a los presentados por el análisis de MEL, en conclusión se planteó como una de las soluciones a su estabilidad la modificación de su geometría, realizando un descabezamiento del talud de 10 metros y un incremento de material en el pie del talud, además, la construcción de cunetas de coronación que ayudaran a mantener un nivel freático bajo, implementando estas acciones, refleja valores mayores a 1.5 en las condiciones más conservadoras y se sugiere evitar la construcción de viviendas sobre la cabecera del talud puesto que la carga de la construcción podría afectar la estabilidad.

Esta tesis es importante ya que proporciona una solución de corrección de la geometría del talud combinada con drenaje superficial, basada en equilibrio límite y elementos finitos. Lo que permite validar la solución de nuestra investigación y contrastar los resultados.

2.1.3. Antecedentes locales

A1. Alpaca & Cahuana, (2022) "ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DEL TALUD DEL TRAMO 23+710 CARRETERA YAURISQUE-RANRACCASA-PARURO Y PROPUESTA DE ESTABILIZACIÓN, CUSCO"; tuvo como objetivo analizar la estabilidad del talud ubicado en la progresiva 23+710; de la Carretera Yaurisque-Ranraccasa y plantear una propuesta de estabilización que garantice el factor de seguridad mínimo exigido por la normativa nacional CE.020, utilizando como metodología el equilibrio límite la cual se basa en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable donde las fuerzas resistentes y desestabilizadoras están uniformemente a lo largo de la superficie de falla del talud; mediante el uso del software Geo5 en su presentación "Estabilidad de Taludes", obteniendo como resultado un valor máximo del factor de seguridad (FS) para las secciones de análisis de 1.35, determinándose así; que el talud de estudió es inestable de acuerdo al factor seguridad (FS) mínimo de 1.5 requerido por la normativa nacional CE.020 "Estabilización de suelos y taludes", en conclusión la reducción de la pendiente del talud conjuntamente con muros de gaviones y drenaje, constituyen una solución técnicamente viable para alcanzar el factor de seguridad exigido por la normativa.

Esta tesis es relevante porque, aporta el empleo del software Geo5 para el análisis de estabilidad y propone como solución la reducción de la pendiente y un sistema de drenaje. Lo cual es pertinente la nuestra investigación de la utilización del software GEO5, así como la solución propuesta.

A2. Quispe & Rodríguez, (2021) "EVALUACIÓN DE ESTABILIDAD DE TALUDES A TRAVÉS DE ELEMENTOS FINITOS EN LA CARRETERA INTEROCEÁNICA SUR DE MARCAPATA, QUISPICANCHIS, CUSCO, 2021", menciona como objetivo evaluar la estabilidad de los taludes mediante el método de elementos finitos, con el fin de detectar peligros, zonificar el riesgo y conocer el estado de los cortes viales, utilizando la metodología de investigación de tipo aplicativo, enfoque cuantitativo y diseño experimental. Para lo cual se emplearon perfiles topográficos generados a partir de curvas de nivel, estratigrafía de suelos y rocas. Obteniendo como resultados que aproximadamente un 4% de la superficie estudiada presenta deslizamientos activos, el factor de seguridad global fue de 1.8, superior al valor normativo de 1.5. Concluyendo que los taludes son estables, recomendando implementar un programa de mantenimiento periódico para disminuir los riesgos y las pérdidas ocasionados por los deslizamientos puntuales.

Esta tesis resulta pertinente por la razón de que proporciona el método de estudio de elementos finitos, lo que permite contrastar nuestros resultados con métodos de equilibrio límite de esa manera enriquecer la discusión.

A3. Loayza & Pachacutec, (2025) "EVALUACIÓN GEOLÓGICO, GEOTÉCNICO E HIDROLÓGICO PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL TRAMO DE LA LÍNEA FERREA QUEBRADA POMATALES, DISTRITO DE HUAROCONDO, PROVINCIA DE ANTA, DEPARTAMENTO DEL CUSCO", tiene como objetivo identificar y analizar las propiedades físicas y geomecánicas que condicionan la estabilidad de los taludes, utilizando un metodología de investigación del tipo hipotético, descriptivo y explicativa, desarrollada en tres etapas (campo, gabinete y análisis final), en campo se identificaron las estructuras geológicas y geomorfológicas y muestreo de suelos y rocas. Lo ensayos de laboratorio se elaboraron según las

normas ASTM y AASHTO, además se realizó un análisis hidrológico e hidrogeológico de la microcuenca. Teniendo como resultado que la litología predominante esta compuesta por andesitas, riolitas, yesos, limos y arcillas de la Formación Maras, materiales porosos que favorecen la infiltración y saturación del suelo, se observaron fallas geológicas que controlan estructuralmente la inestabilidad. Concluyendo que los factores de seguridad obtenidos confirmarón la inestabilidad de los taludes agudizada por la ocurrencia de deslizamientos, desprendimientos y movimientos de masa intensificados por factores climáticos, litológicos y antrópicos.

Esta tesis es de gran utilidad debido a que contribuye con la metodología de estudio en un contexto geológico con materiales susceptibles a la saturación, además integra el análisis hidrológico como factor detonante. Nuestra investigación integra precisamente estos estudios además de la validación correctiva concreta como reducción de la pendiente y drenajes, aplicable a los taludes en suelos coluviales.

2.2. Bases teóricas

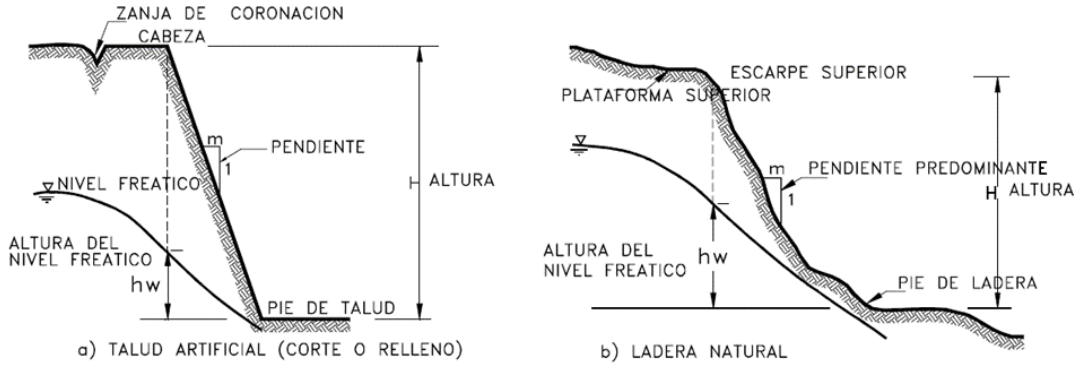
2.2.1. Talud

Un talud o ladera es un área de macizo rocoso o suelo que posee una pendiente o cambios de altura significativos. Una ladera es una superficie inclinada por procesos naturales a lo largo del tiempo, mientras que el talud es una pendiente construida por el hombre tal y como lo menciona (Suarez, 2017).

Por su parte De Matteis (2003) entiende por talud como toda superficie que presenta cierta inclinación respecto de la horizontal y que para analizarla exige integrar la mecánica de suelos, mecánica de rocas y el conocimiento geológico del terreno, para identificar con claridad los factores críticos que condicionan su estabilidad.

Figura 1

Nomenclatura de talud y ladera.



Nota. Adaptado de Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales, (Suarez, 2017).

2.2.2. Evaluación geotécnica

La evaluación geotécnica consiste en el estudio detallado de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos y las rocas. Esto conlleva a determinar los parámetros clave como la capacidad de soporte, cohesión, el ángulo de fricción interna y la rugosidad, ya que de estos depende la medida de respuesta del material ante los factores externos. También se sostiene que la evaluación proporciona información necesaria para entender cómo se comporta el terreno y como este puede favorecer o desfavorecer la estabilidad del talud (Suarez, 2017).

2.2.3. Estabilidad de taludes

La estabilidad de taludes se refiere a la capacidad que tiene una masa de suelo o roca para mantenerse en su lugar sin experimentar desplazamientos. Por lo que la ingeniería geotécnica, involucra evaluar los factores que influyen para que el talud conserve su posición y geometría. Entre los aspectos más determinantes se menciona el fracturamiento de rocas, tectónica del macizo, la presencia del agua, la baja resistencia de los materiales y la tendencia del medio a deformarse,

todo ello puede reducir la estabilidad de un talud si no se controla adecuadamente (Mucuta et al., 2020).

2.2.3.1. Factores que influyen en la estabilidad de taludes.

Los factores que influyen en la estabilidad de taludes son geológicos, geotécnicos, hidrológicos y geomorfológicos. Los geológicos tienen que ver con la historia del terreno y su origen. Los geotécnicos apuntan a propiedades como la resistencia al corte, la cohesión, el ángulo de fricción y la deformabilidad de los materiales. Los factores hidrológicos que en zonas altoandinas sueles ser los desencadenantes de las fallas, se incluye la infiltración por precipitaciones pluviales, el aumento de presiones en poros y grietas. Por último, la geomorfología ayuda a entender el relieve, la pendiente natural, la altura del talud y los procesos erosivos que se observa en el paisaje. Estos factores no actúan por separado, sino se combinan y muchas veces se potencian entre sí, por ello el análisis de estabilidad de taludes debe exigir un estudio integral (Mucuta et al., 2020).

Tabla 4

Factores influyentes en la estabilidad de taludes.

Factores condicionantes	Factores desencadenantes
Factores geométricos	Sobrecargas estáticas
Factores geológicos	Cargas dinámicas
Factores hidrogeológicos	Cambios en las condiciones hidrogeológicas
Factores geotécnicos	Factores climáticos
Factores geomorfológicos	Variaciones en la geometría
	Reducción de parámetros resistentes

Nota. Adaptado de Ingeniería geológica, (Gonzales de Vallejo, 2002).

2.2.3.2. Parámetros necesarios en el cálculo del equilibrio.

Para el análisis de estabilidad es necesario del conocimiento sobre las propiedades mecánicas del material, para poder anticipar como responderá el talud ante distintos esfuerzos, es necesario contar con datos que reflejen la realidad del terreno. Estos datos surgen a partir de ensayos de laboratorio ejecutados sobre muestras recolectadas in situ. A continuación, se enlista las propiedades que por su relevancia fueron consideradas como base para el desarrollo de esta tesis.

2.2.3.2.1. Para taludes en suelo.

Para análisis de estabilidad en taludes conformados por suelos, lo primero es entender que los materiales se caracterizan por su resistencia al corte, propiedad que se opone al deslizamiento. Los modelos más utilizados para describir su comportamiento son el criterio de Mohr-Coulomb y el análisis con resistencia residual.

Parámetros de resistencia al corte:

a) **Cohesión:** Es la resistencia propia del material, resultado de las fuerzas de atracción molecular y entre sus partículas, que le permite mantenerse unido sin la necesidad de estar sometido a una presión (Bowles , 1982).
b) **Ángulo de fricción interna:** Representa la resistencia al corte de un suelo, generada primordialmente por la fricción y roce entre sus partículas individuales cuando son sometidas a un esfuerzo cortante, siendo esta resistencia directamente proporcional al esfuerzo normal que actúa sobre el plano de falla (Das & Sivakugan, 2018).
c) **Resistencia a la compresión simple:** Se define como la carga axial máxima por unidad de área que una muestra de suelo cohesivo puede soportar cuando es sometida a compresión longitudinal. Es una forma rápida de estimar la resistencia al corte no drenado de arcillas y

otros suelos finos saturados, bajo el supuesto de que su ángulo de fricción interna es cero (Das & Sivakugan, 2018).

Parámetros de estado y deformación:

a) **Peso unitario:** Representa el peso por unidad de volumen de un suelo, en consecuencia, este valor es fundamental porque define la magnitud de las fuerzas gravitacionales que tienden a desestabilizar el talud. De hecho, en los métodos de equilibrio límite, el peso unitario se utiliza para calcular el peso de cada dovela o masa de suelo potencialmente inestable (Das & Sivakugan, 2018).
b) **Permeabilidad:** Indica la facilidad con la que el agua puede fluir a través de sus vacíos interconectados bajo un gradiente hidráulico, parámetro decisivo para determinar la distribución de las presiones de agua en el suelo (Das & Sivakugan, 2018).
c) **Módulo de elasticidad (módulo de Young) y Modulo de Poisson:** Describen el comportamiento de deformación de un suelo bajo carga. El módulo de elasticidad, representa la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación axial resultante, indicando la rigidez del material. Por su parte, el módulo de Poisson cuantifica la relación entre la deformación lateral y la deformación axial durante la carga, caracterizando la capacidad del suelo para expandirse lateralmente (Das & Sivakugan, 2018).

Parámetros de presión de agua:

a) **Presión intersticial o poros:** Es la presión que ejerce el agua contenida en los vacíos del suelo y, de acuerdo con el principio de esfuerzos efectivos de Terzaghi, al aumentar esta presión los esfuerzos efectivos entre las partículas sólidas disminuyen, reduciéndose la resistencia al corte del material. Este fenómeno explica por qué, en temporadas de lluvia,

un talud estable puede fallar sin previo aviso, ya que el agua infiltrada va debilitando la estructura interna del suelo (Das & Sivakugan, 2018).

$$\tau = c' + (\sigma - u).tg(\varphi')$$

Donde:

τ: resistencia al corte

c': cohesión

σ: esfuerzo normal

u: presión de poros

φ': ángulo de fricción interna

2.2.3.2.2. Para taludes en roca.

La estabilidad en macizos rocosos, está controlada por la estructura geológica y las discontinuidades. Son estas fracturas, juntas, fallas o planos de estratificación las que realmente gobiernan el comportamiento del talud, porque por ellas circula el agua, se concentran los esfuerzos y se definen los modos de falla.

Parámetros:

a) **Ángulo de fricción:** Representa la resistencia al corte a lo largo de una discontinuidad, la cual se genera primordialmente por el rozamiento y el encaje mecánico entre las superficies de contacto (Wyllie & Mah, 2004).

b) **Cohesión de la discontinuidad:** Se refiere al componente de la resistencia al corte que es independiente del esfuerzo normal aplicado, actuando como una fuerza cementante aparente a lo largo de un plano de discontinuidad. En la práctica, cuando se trabaja con

discontinuidades abiertas, persistentes o sin relleno, muchos análisis optan por asumir este valor como cero (Wyllie & Mah, 2004).

c) **Rugosidad:** Se refiere a las irregularidades onduladas o asperezas presente en las caras de una discontinuidad en un macizo rocoso. Cuando un bloque intenta deslizarse, la rugosidad obliga a que las superficies se separen ligeramente, generando un fenómeno de dilatancia que incrementa la resistencia al corte (Wyllie & Mah, 2004).

d) **Resistencia a la compresión de la roca intacta:** Es la carga axial máxima por unidad de área que una roca, sin considerar las fracturas, puede soportar cuando es sometida a compresión uniaxial hasta romperse. Este parámetro representa la resistencia máxima de la matriz rocosa, excluyendo la influencia de las discontinuidades (Wyllie & Mah, 2004).

e) **Relleno:** Se relaciona con el material de alteración que ocupa total o parcialmente el espacio entre las paredes de una fractura en un macizo rocoso. La presencia de relleno, es un factor determinante, ya que modifica sustancialmente las propiedades de resistencia al corte de la discontinuidad (Wyllie & Mah, 2004).

Parámetros geométricos del macizo rocoso:

a) **Orientación de las discontinuidades:** Señala la dirección espacial y la inclinación de los planos de debilidad estructural en un macizo rocoso, como juntas, fallas o planos de estratificación. En el análisis de estabilidad de taludes, la relación geométrica entre la orientación de las caras del talud y la orientación de las discontinuidades es el factor de control primario que determina los modos de falla potenciales (Wyllie & Mah, 2004).

b) **Espaciamiento y persistencia de las discontinuidades:** Controlan el tamaño y la forma de los bloques. El espaciamiento define la distancia perpendicular promedio entre discontinuidades adyacentes de una misma familia. Por su parte la persistencia se refiere a

la extensión de área o longitud de traza de una discontinuidad en un plano, la combinación de un espaciamiento pequeño y una persistencia alta genera las condiciones más desfavorables (Wyllie & Mah, 2004).

Parámetros de la roca intacta:

a) **Resistencia a la compresión simple:** Se refiere a como la carga axial máxima por unidad de área de una roca sin defectos estructurales significativos, puede soportar cuando sea sometida a compresión uniaxial hasta la falla. Para la estabilidad de taludes este parámetro permite estimar la resistencia al corte de las discontinuidades, ya que controla la resistencia de las asperezas y que influye directamente en la resistencia del macizo rocoso (Wyllie & Mah, 2004).

b) **Peso unitario de la roca:** Representa el peso por unidad de volumen del macizo rocoso, considerando tanto la matriz como los espacios vacíos (fracturas). En la estabilidad de taludes es fundamental para calcular las fuerzas gravitacionales impulsoras que generan los esfuerzos de corte a lo largo de las discontinuidades potencialmente inestables (Wyllie & Mah, 2004).

2.2.4. Estudio de mecánica de suelos

El estudio de mecánica de suelos que conforman el talud es la base de cómo se construye el análisis de estabilidad. Con el propósito de recopilar datos mediante procedimientos de campo y laboratorio, aquellos parámetros que definen el comportamiento geotécnico del terreno, en especial los vinculados a la resistencia al corte. Entonces se entiende como un proceso que va acotando progresivamente las propiedades del material, desde la exploración hasta la obtención de los datos para realizar los modelos de estabilidad (Moreno et al., 2019).

2.2.4.1. Propiedades físico mecánica de los suelos.

a) Análisis Granulométrico

Es la clasificación de los suelos para usos de ingeniería para cualquier tipo de obra de construcción sobre el suelo, con el objetivo principal de clasificar las partículas de suelo de acuerdo a su tamaño, para culminar clasificado a través de los sistemas AASHTO o SUCS (Bowles , 1982).

b) Límites de consistencia

Los límites nacen a partir de la plasticidad del suelo, que es la propiedad de un material de soportar deformaciones rápidas, sin variación volumétrica apreciable y sin agrietarse (Bowles , 1982).

- Limite líquido (LL), estado donde se encuentra la frontera entre los estados semilíquidos y plástico.
- Limite plástico (LP), estado donde se encuentra la frontera entre los estados plástico y semisólido.
- Índice de plasticidad (IP), indica la magnitud de humedad en el cual el suelo posee consistencia plástica. Un IP alto indica a un suelo muy arcilloso y a diferencia de un IP bajo característico de un suelo poco arcilloso.

  La diferencia entre los valores de LL y LP es llamada como el índice de plasticidad (IP).

c) Clasificación de los suelos

Los suelos se pueden clasificar de acuerdo a su comportamiento, tamaño y composición, hay dos sistemas de clasificación de suelos de uso común para ingeniería.

- El Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS), este sistema discrimina el suelo en función de sus propiedades físicas más relevantes: el tamaño de las partículas y la plasticidad. En primer lugar, distingue entre suelos de partículas gruesas y suelos de partículas finas, tomando como límite el tamiz N° 200 (0.075mm). A partir de ahí, se le asigna una letra: G para grava, S para arena, M para limo inorgánico, C para arcilla, y O para suelos orgánicos. La segunda letra complementa el grado de graduación (W para bien graduado y P para mal graduado), o la plasticidad (L baja plasticidad y H alta plasticidad) (Bowles , 1982).
- El sistema de clasificación AASHTO, tiene un carácter más general orientado a evaluar la idoneidad del suelo como material en infraestructuras viales. Divide los suelos en siete grupos principales (A-1 a A-7) ordenados de mejor a peor comportamiento para su uso en carreteras. Los grupos A-1, A-2 y A-3 corresponden a materiales granulares de buena calidad, mientras que los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7 agrupan suelos finos con menor capacidad de soporte (MTC, 2018).

2.2.5. Estudio de mecánica de rocas

El estudio de mecánica de rocas se enfoca en entender cómo se comportan los materiales rocosos frente a distintos esfuerzos que actúan sobre ellos. Abarca desde el conocimiento de las características de la matriz y las discontinuidades, hasta la aplicación de ese conocimiento para anticipar el comportamiento mecánico del macizo frente a fuerzas internas como el agua subterránea y externas como las excavaciones (Gonzales de Vallejo, 2002).

2.2.5.1. Macizos rocosos.

Cuando se estudia un macizo rocoso, no solo se analiza la roca intacta como si fuera homogéneo. En realidad, su comportamiento se define también por los planos de debilidad que lo cruzan como fracturas, diaclasas, fallas o planos de estratificación. Entonces para el estudio serio de una masa rocosa se considera obligatoriamente la matriz en su estado continuo y las discontinuidades (Gonzales de Vallejo, 2002).

2.2.5.2. Caracterización de la roca intacta.

La roca intacta en el contexto de un macizo rocoso se refiere al material que queda entre discontinuidades, es decir que no está interrumpida por fracturas, juntas ni planos de estratificación. Su comportamiento suele ser anisotrópica, es decir, que sus propiedades varían según la dirección que se analice, además es heterogénea porque su composición mineralógica es diferente. Caracterizar mecánicamente la roca intacta implica apoyarse en su densidad, resistencia y la capacidad de deformación (Gonzales de Vallejo, 2002).

Tabla 5

Clasificación de la resistencia a compresión simple de la roca.

Descripción	Resistencia a compresión simple (Mpa)
Extremadamente blanda	<1
Muy blanda	1-5
Blanda	2-25
Moderadamente dura	25-50
Dura	50-100
Muy dura	100-250
Extremadamente dura	>250

Nota. Adaptado de The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring, (ISRM, 2007).

2.2.5.3. Caracterización de las discontinuidades.

Para comprender cómo se comporta mecánicamente un macizo rocoso es indispensable prestarles atención a las discontinuidades. Según ISRM (2007) definió aquellas superficies de fragilidad que rompen la continuidad de una roca, en la práctica, presentan una resistencia a la tracción que es nula o despreciable. Dado que los macizos en su estado natural presenta una cantidad significativa de discontinuidades.

2.2.5.3.1. Tipos de discontinuidades.

Para la caracterización geotécnica de un macizo rocoso, siguiendo los estándares internacionales de la Sociedad Internacional de mecánica de Rocas, las discontinuidades pueden agruparse en dos categorías principales según su persistencia y generación.

Tabla 6

Tipo de discontinuidades en un macizo rocoso.

Categoría	Tipo de Discontinuidad	Descripción Breve
Sistemáticas	Planos de Estratificación / Laminación	Superficies que separan diferentes capas o estratos sedimentarios.
	Diaclasas o Juntas	Fracturas en la roca a lo largo de las cuales no ha habido desplazamiento visible.
	Planos de Esquistosidad / Clivaje	Superficies de separación planares resultantes de metamorfismo o deformación.
Singulares	Fallas	Fracturas donde los bloques rocosos han sufrido un desplazamiento relativo significativo.
	Diques	Cuerpos tabulares de roca ígnea que cortan las estructuras preexistentes.
	Discordancias	Superficies de erosión o no depositación que separan rocas de diferentes edades.
	Ejes de Pliegues	Estructuras singulares a escala del macizo que definen la geometría de los pliegues.

Nota. Adatado de The complete ISRM suggested methods for rock charcterization,testing and monitoring, (Ulusay & Hudson, 2007).

2.2.6. Clasificación geomecánica del macizo rocoso

Actualmente constituye una metodología sistemática cuyo objetivo es categorizar y caracterizar un macizo rocoso a partir de parámetros geotécnicos. Su finalidad principal es proporcionar una estimación de la calidad del macizo rocoso y establecer correlaciones con su comportamiento mecánico, lo que resulta fundamental para el diseño y construcción de obras como taludes, obras subterráneas y cimentaciones en roca (ISRM, 2007).

Los sistemas más reconocidos se basan en la asignación de un índice de calidad o una clase geomecánica, que se determina mediante la evaluación de parámetros como la resistencia de la roca intacta, orientación, condición de las discontinuidades, la presencia de agua y las condiciones de esfuerzos in situ. Estos sistemas son utilizados a nivel mundial entre las clasificaciones más importantes para taludes esta la clasificación de calidad de la roca (RQD), clasificación de Hoek – Brown (GSI), clasificación de Bieniawski (RMR), y la clasificación SMR.

2.2.6.1. Índice de designación de la calidad de la roca (RQD).

Este es un indicador cuantitativo para la caracterización geotécnica del macizo rocoso. Constituye una de las herramientas más utilizadas y sencillas para obtener una aproximación a la calidad del macizo rocoso y el grado del fracturamiento, siendo desarrollado por Deere (1968).

Su cálculo se define como el porcentaje acumulado de los fragmentos de testigo de roca intacta que superan una longitud de 10 centimetros, matemáticamente se expresa como:

$$RQD(\%) = \frac{\Sigma\ longitud\ de\ los\ trozos\ de\ testigos > 10\ cm}{longitud\ total}\ x\ 100$$

La escala del RQD proporciona una clasificación cualitativa del macizo rocoso, la siguiente tabla relaciona la calidad del macizo rocoso con el porcentaje RQD.

Tabla 7

Calidad de la roca según el porcentaje del RQD

RQD (%)	Calidad
<25	Muy mala
25 - 50	Mala
50 - 75	Media
75 - 90	Buena
90 - 100	Muy buena

Nota. Adaptado de Geological considerations, (Deere, 1968) .

Para la determinación del RQD, cuando no se dispone de testigos es posible emplear métodos de estimación basado en el conteo de discontinuidades. Palmstrom (1982) propuso una metodología que utiliza el conteo de discontinuidades volumétricos, el cual registra el número de discontinuidades que intersectan un metro cúbico de roca en afloramientos o socavones exploratorios. La relación establecida es:

$$RQD = 115 - 3.3J_v$$

Donde:

J_v: conteo de discontinuidades volumétrico, número de discontinuidades interceptando un volumen de $1m^3$.

De forma paralela Priest & Hudson (1976) propusieron una forma alternativa de estimar el RQD. Su método se apoya en mapeos estructurales por línea de detalle, que determinan el número medio de discontinuidades por metro lineal. Su modelo corresponde a la ecuación:

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$$

Donde: λ es el número medio de discontinuidades por metro lineal.

2.2.6.2. Clasificación de Bieniawski (RMR).

El Rock Mass Rating (RMR) es uno de los sistemas más influyentes y ampliamente adoptado en el ámbito de la ingeniería geotécnica. Desarrollado por Bieniawski en 1973 y mejorado en 1989, este sistema ofrece una valoración ordenada y confiable de la calidad del macizo y ofrece recomendaciones preliminares para el diseño de soporte en taludes.

La clasificación RMR sintetiza cinco parámetros geomecánicos fundamentales para calcular un índice de calidad.

- Resistencia a compresión simple de la roca intacta.
- Índice de calidad de la roca (RQD).
- Espaciamiento de las discontinuidades.
- Condición de las discontinuidades.
- Condiciones hidrológicas.

Tabla 8

Clasificación geomecánica de Macizos rocosos (RMR) según Bieniawski.

Parámetro		Valores						
Resistencia de la roca intacta	Ensayo de carga puntual (Mpa)	> 10	4-10	2-4	1-2	Compresión simple (Mpa)		
	Compresión simple (Mpa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	Valor	15	12	7	4	2	1	0
Índice de Calidad de la Roca (RQD)	RQD (%)	90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Valor	20	17	13	8	3		
Espaciamiento de las discontinuidades	(m)	>2	0.6-2	0.2-0.6	0.06-0.2	<0.06		
	Valor	20	15	10	8	5		
Condición de las discontinuidades	Persistencia (m)	<1	1-3	3-10	10-20	>20		
	Valor	6	4	2	1	0		
	Apertura (mm)	Ninguno	<0.1	0.1-1	1-5	>5		
	Valor	6	5	3	1	0		
	Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeram. Rugosa	Ondulada	Lisa		
	Valor	6	5	3	1	0		
	Relleno	Ninguno	Duro	Duro	Blando	Blando		
	Valor	6	4	2	2	0		
	Alteración	Inalterada	Ligeram. Alterada	Moderad. Alterada	Muy alterada	Descompuesta		
	Valor	6	5	3	1	0		
Condiciones del agua	Relación Pagua/Pprinc.	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
	Condiciones generales	Seco	Ligeram. Humedo	Húmedo	Goteado	Fluyendo		
	Valor	15	10	7	4	0		

Nota. Adaptado de Engineering Rock Mass Clasifications de Bieniawski, (Bieniawski, 1989).

Esta es la tabla para calcular el RMR básico, que es la suma de las puntuaciones o valoraciones de los 5 parámetros. El valor final clasifica al macizo en muy bueno (81-100), bueno (61-80), regular (41-60), pobre (21-40) o muy pobre (0-20).

2.2.6.3. Clasificacion SMR.

Fue desarrollado específicamente para la evaluación de la estabilidad de taludes en roca, el SMR constituye una adaptación del sistema RMR de Bieniawski, con el que guarda una relación directa (Romana, 1995). El SMR desarrollado por Romana (1995), su cálculo se fundamenta en el índice RMR básico que refleja las propiedades intrínsecas del macizo rocoso al cual se le aplican una serie de factores de ajuste. Estos factores consideran la orientación de las discontinuidades, su relación angular con el talud y la influencia del método de excavación empleado, permitiendo una caracterización integral de la estabilidad del talud (Ramírez & Alejano, 2004).

El cálculo del SMR se basa en una ecuación que íntegra la calidad básica del macizo rocoso con factores geométricos:

$$SMR = RMR_b + (F_1 x\ F_2\ x\ F_3) + F_4$$

Donde:

RMR_b: es el índice RMR básico de Bieniawski.

F_1: depende del paralelismo entre la dirección del buzamiento de la discontinuidad y el buzamiento de la pendiente.

$$F_1 = \left[1 - sen(\alpha_j - \alpha_s)\right]^2$$

F_2: relacionado con la probabilidad de resistencia al corte de la discontinuidad. En caso de fallo por derrumbe este parámetro adopta el valor de 1.0.

$$F_2 = Tan^2 \beta_j$$

F_3: refleja la relación entre los buzamientos de la junta y el talud.

F_4: es un factor de ajuste que depende del método de excavación utilizado en la formación del talud, reconociendo que técnicas de voladura pueden inducir daños y reducir la estabilidad.

Tabla 9

Factores de ajuste de juntas.

Factor	Tipo de Falla	Muy Favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy Desfavorable
F₁	Planar & Cuña αs-αj	>30°	30°-20°	20°-10°	10°-5°	<5°
	Volteo αs-αj-180°					
	P/C/V	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
F₂	Planar & Cuña βj	<20°	20°-30°	30°-35°	35°-45°	>45°
	P/C	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
	Volteo			1.00		
F₃	Planar & Cuña βj - βs	>10°	10°-0°	0°	0°-(-10°)	<-10°
	Volteo βj + βs	<110°	110°-120°	>120°	-	-
	P/C/V	0	-6	-25	-50	-60

Nota. Adaptado de "El índice SMR para la clasificación de taludes rocosos", (Romana, 1995). P: Falla Planar, C: Falla en cuña, αs: Dirección del talud, αj: Dirección de las juntas, βs: Buzamiento del talud, βj: Buzamiento de las juntas.

Tabla 10

Factor de ajuste por método de excavación F₄.

Método de Excavación	Símbolo	Valor de F₄
Talud Natural	-	15
Excavación Mecánica (Precorte)	PS	10
Voladura suave o Línea de Precorte	SB	8
Voladura Convencional	RB	0
Voladura Deficiente	DB	-8

Nota. Adaptado de El índice SMR para la clasificación de taludes rocosos, (por Romana), 1995.

De acuerdo a Romana (1995), los taludes en roca se pueden agrupar en cinco categorías bien diferenciadas, cada una refleja un nivel distinto de calidad del macizo y, al mismo tiempo, anticipa los modos de falla más probables. Debido a su metodología, esta clasificación se ha consolidado como una herramienta de predimensionamiento indispensable en la fase de diseño preliminar de taludes para proyectos de obras civiles. La siguiente tabla sintetiza esta clasificación, detallando las clases de estabilidad en función del índice de SMR obtenido.

Tabla 11

Clasificación y caracterización de taludes según el índice SMR.

Clase SMR	Rango	Calidad del Talud	Estabilidad	Probabilidad de Falla	Tipo de Falla Esperada	Recomendación de Tratamiento
V	0 - 20	Muy Mala	Totalmente inestable	Muy Alta (≥ 0.9)	Grandes roturas por planos continuos o rotura masiva.	Re-excavación del talud o soporte estructural mayor (ej. anclajes pesados).
IV	21 - 40	Mala	Inestable	Alta (≈ 0.6)	Falla a lo largo de juntas o grandes cuñas.	Corrección de la geometría y sostenimiento sistemático (ej. anclajes, pernos).
III	41 - 60	Regular	Parcialmente estable	Media (≈ 0.4)	Algunas juntas o cuñas de tamaño medio.	Sostenimiento sistemático localizado (pernos, malla).
II	61 - 80	Buena	Estable	Baja (≈ 0.2)	Algunos bloques sueltos o pequeñas cuñas.	Sostenimiento ocasional (eliminación de bloques inestables, bulones puntuales).
I	81 - 100	Muy Buena	Totalmente estable	Muy Baja (≈ 0)	Ninguna falla significativa.	Ninguno requerido o protección superficial contra erosión.

Nota. Adaptado de El índice SMR para la clasificación de taludes rocosos, (Romana, 1995). El tratamiento recomendado debe ser verificado con análisis geotécnicos.

2.2.6.4. Clasificación GSI.

El Índice de Resistencia Geológica no depende de mediciones numéricas detalladas, sino de una evaluación visual y cualitativa del macizo, se observa que tan fracturado esta y en qué estado están las superficies de las discontinuidades. Su objetivo principal es estimar los parámetros de resistencia global del macizo como la cohesión y ángulo de fricción (Hoek & Brown, 2019).

Tabla 12

Clasificación de la calidad del macizo rocoso según el GSI.

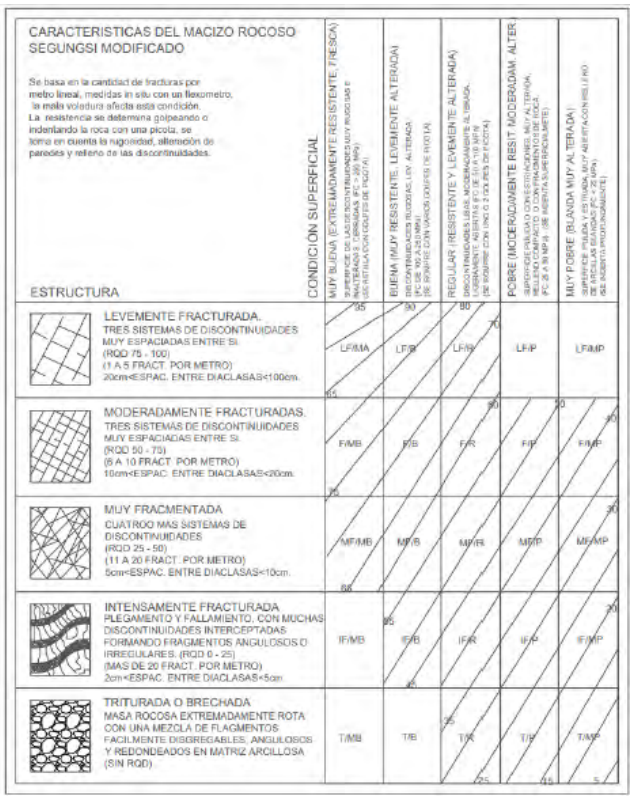
Clase de Calidad	Rango de GSI	Descripción de la Calidad	Estructura y Comportamiento Geotécnico Característico
I - Excelente / Muy Buena	80 - 100	Roca de excelente calidad	Macizo rocoso intacto o masivo. Estructura de bloques muy grandes. Comportamiento elástico, con resistencia controlada por las propiedades de la roca intacta. Muy favorable para excavaciones.
II - Buena	60 - 80	Roca de buena a muy buena calidad	Macizo con estructura de bloques grandes. Las discontinuidades están espaciadas y son rugosas. La resistencia es ligeramente inferior a la de la roca intacta. Comportamiento estable en la mayoría de las excavaciones.
III - Regular / Media	40 - 60	Calidad media del macizo rocoso	Estructura de bloques intermedios a pequeños. Las discontinuidades están moderadamente alteradas. Comportamiento que requiere soporte sistemático. La resistencia del macizo es significativamente menor que la de la roca intacta.
IV - Mala	20 - 40	Macizo rocoso de mala calidad	Estructura pobre, desintegrada o laminada. Bloques angulares formados por múltiples familias de discontinuidades. Comportamiento plástico. Requiere soporte pesado y rápido. La resistencia es una fracción mínima de la roca intacta.
V - Muy Mala / Extremadamente Mala	0 - 20	Macizo rocoso de muy mala calidad	Estructura similar a un suelo, fuertemente cizallada o meteorizada. Comportamiento similar a un suelo granular o cohesivo. La excavación puede ser mecánicamente inestable. Requiere técnicas de sostenimiento especiales.

Nota. Adaptado de “Practical estimates of rock mass strength”, (Hoek & Brown, 1997).

De esto modo, la metodología logra cuantificar dos aspectos determinantes para la estabilidad y el comportamiento geomecánico: el grado y tipo de fragmentación, así como las condiciones de las superficies de discontinuidad.

Figura 2

Clasificación geomecánica del sistema GSI.



Nota. Adaptado de “Practical estimates of rock mass strength”, (Hoek & Brown, 1997).

2.2.7. Clasificación de movimientos en masa.

Para entender por qué un talud falla y cómo puede prevenirse, antes hay que ponerle nombre al tipo de rotura que se está dando. En geotecnia, los movimientos de masa se clasifican según el tipo de desplazamiento que experimenta el terreno. El sistema más difundido es el de Cruden & Varnes (1996).

2.2.7.1. Deslizamientos.

Se producen cuando una masa de suelo o roca se desplaza respecto al sustrato a lo largo de una superficie de rotura bien definida, donde la resistencia al corte ha sido superada. La masa suele moverse en bloque, con una velocidad variable, con frecuencia son procesos rápidos que pueden involucrar grandes volúmenes de material (Gonzales de Vallejo, 2002).

Deslizamientos rotacionales

Cuando la superficie de rotura es curva, se habla de un deslizamiento rotacional. Es la falla típica de suelos cohesivos, como los depósitos coluvio-deluviales que cubren los taludes del tramo carretero en estudio. Cuando inicia la inestabilidad, la masa empieza a rotar y puede fragmentarse en varios bloques que se deslizan entre sí, dejando escalones visibles y grietas de tracción visibles (Gonzales de Vallejo, 2002).

Deslizamientos traslacionales

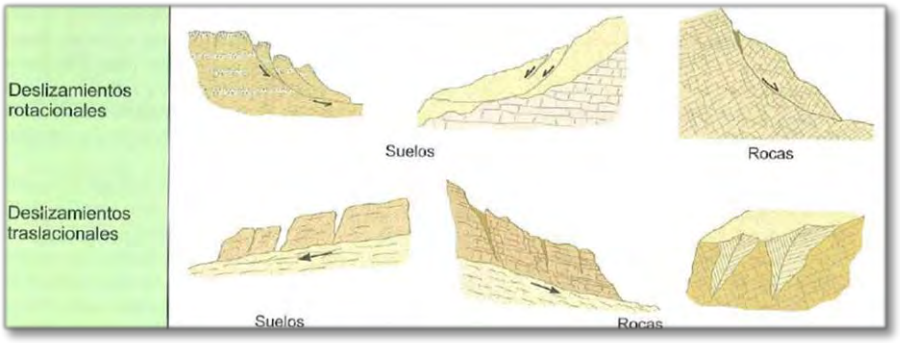
Cuando la rotura se produce a favor de un plano preexistente como un contacto de materiales, una superficie de estratificación o una capa arcillosa delgada entre estratos, el deslizamiento será traslacional. No suelen ser muy profundos, pero sí pueden extenderse lateralmente y recorrer grandes distancias (Gonzales de Vallejo, 2002).

Deslizamiento traslacional con rotura en cuña

Se genera en macizos rocosos cuando dos familias de discontinuidades se intersecan, formando un bloque triangular que desliza a favor de la línea de intersección de ambos planos. Para que este mecanismo sea viable, los planos deben aflorar en la cara del talud y cumplir condiciones cinemáticas específicas (Gonzales de Vallejo, 2002).

Figura 3

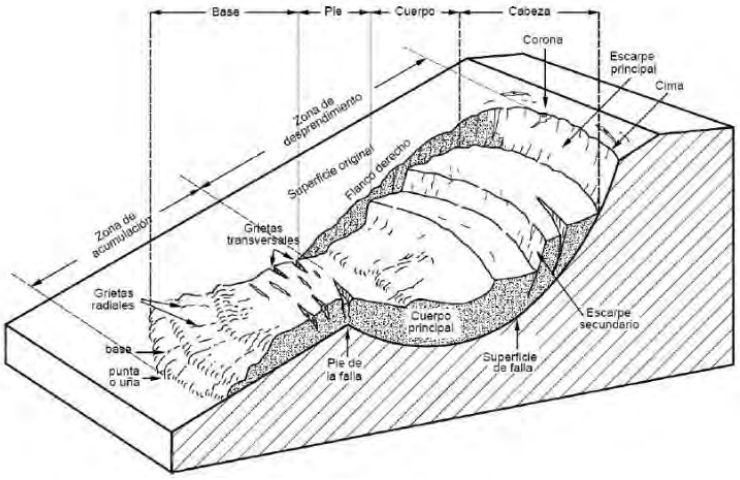
Tipos de movimientos de ladera.



Nota. Adaptado de Ingeniería geológica, (Gonzales de Vallejo, 2002).

Figura 4

Partes de un deslizamiento.



Nota. Adaptado de deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales, (Suarez, 2017).

2.2.7.2. Flujos.

Los flujos se comportan de manera distinta a los deslizamientos, aquí el agua juega un papel importante, los derrubios o incluso los fragmentos de roca pierden su estructura original y empiezan a deformarse de forma continua. No hay un plano de falla nítido que separe la masa en

movimiento del terreno estable, sino una mezcla que se desplaza. Estos movimientos también llamados coladas pueden presentarse en pendientes bajas, y suelen dejar un rastro de material disgregado y saturado de agua (Gonzales de Vallejo, 2002).

Flujo canalizado y no canalizado

De acuerdo al Proyecto Multinacional Andino (2007), el flujo canalizado ocurre cuando el material se concentra a lo largo de un cauce natural, es lo que comúnmente se observa en las torrenteras que bajan de las laderas y descargan directamente sobre la carretera. El flujo no canalizado es donde el material se esparce por la ladera sin seguir un curso defino, formando abanicos o mantos de detritos que pueden cubrir amplias superficies.

Coladas de barro

También conocidas como mudflow o earthflow, se produce en materiales predominantemente de finos y homogéneos, como los limos y arcillas que aparecen en la matriz de los depósitos coluviales. La causa que las desencadena suele ser la saturación por agua, que elimina la resistencia del material. Aunque normalmente son de pequeñas dimensiones y cuando las condiciones de humedad son extremas pueden volverse muy rápidas (Gonzales de Vallejo, 2002).

Golpes de arena y limo

Son flujos que se presentan en suelos como arenas secas, a menudo producidos por sismos que rompen los enlaces entre las partículas. Si el material está saturado o sumergido la masa pierde su cohesión y puede fluir con velocidades muy altas (Gonzales de Vallejo, 2002).

Flujos de derrubios

Son procesos frecuentes en laderas altoandinas donde el material suelto abunda y las lluvias intensas están presentes. Gonzales de Vallejo (2002), lo describe como movimientos complejos en los que se entremesclan fragmentos de roca, bloques, cantos y gravas dentro de una matriz más fina compuesta por arenas, limos y arcillas. Se caracteriza por que se desplaza de manera similar a un fluido viscoso, sin una rotur a definida y sucede por la saturación del terreno.

Reptación

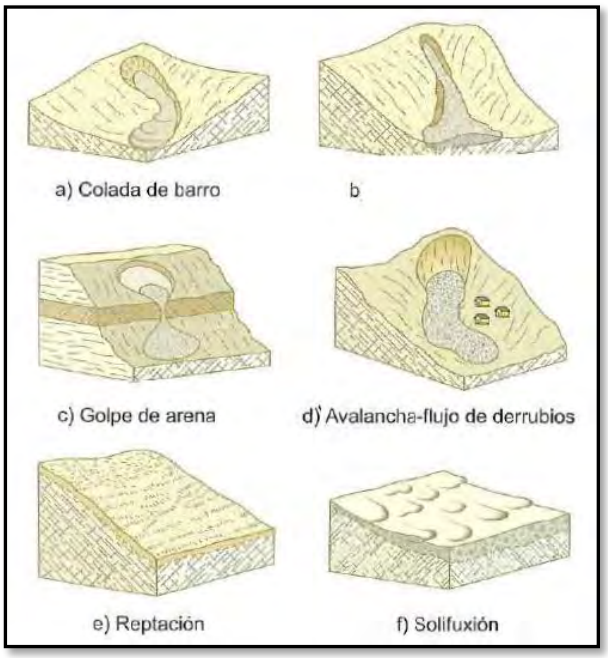
Se trata de un desplazamiento muy lento, que afecta solo a los primeros decímetros del suelo o del material alterado. Con el tiempo se manifiesta en forma de árboles inclinados, cercos torcidos, muros agrietados y postes desalineados (Gonzales de Vallejo, 2002).

Solifluxión

Este movimiento, consiste en un flujo lento y superficial de suelo y fragmentos rocosos que ocurre en zonas donde el terreno experimenta ciclos repetidos de congelamiento y descongelamiento. Es decir, durante los meses más fríos el agua contenida en el suelo se hiela y se expande el terreno; al descongelarse, el material pierde temporalmente su cohesión. Su velocidad es imperceptible a simple vista, sus efectos se acumulan con el tiempo y se traducen en laderas con ondulaciones, suelos escalonados y deformaciones continuas que afectan la estabilidad de los taludes (Gonzales de Vallejo, 2002).

Figura 5

Tipos de flujo.



Nota. Adaptado de Ingeniería geológica, (Gonzales de Vallejo, 2002).

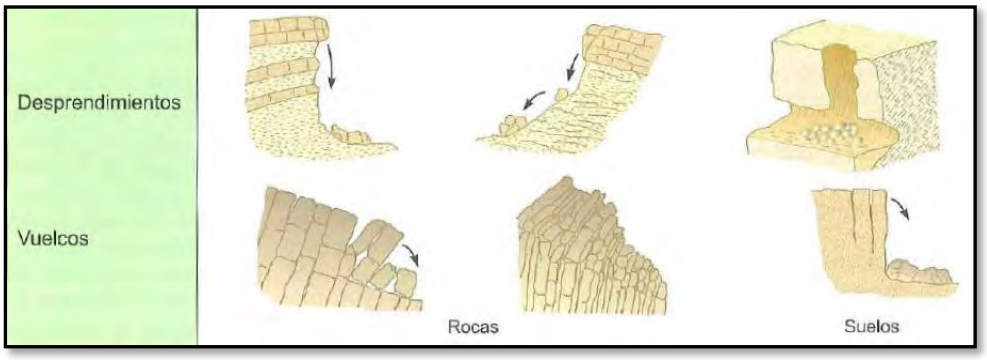
2.2.7.3. Desprendimientos y vuelcos.

Los desprendimientos son también conocidos como caídas libres, son movimientos súbitos y peligrosos que pueden afectar un talud rocoso. Se trata de bloques o fragmentos de roca que se independizan del macizo a favor de los planos de discontinuidad y caen a gran velocidad. Son típicos de frentes escarpados, acantilados y paredes rocosas donde varias familias de discontinuidades se intersectan (Gonzales de Vallejo, 2002).

Los vuelcos se producen cuando los estratos o los fragmentos de roca buzan en sentido contrario a la ladera, es decir, hacia el interior del talud. Gonzales de Vallejo (2002), explica que este mecanismo suele manifestarse en frentes rocosos verticalizados, y el volumen del material involucrado puede ser considerable.

Figura 6

Desprendimientos y vuelcos en frentes rocosos y suelos.



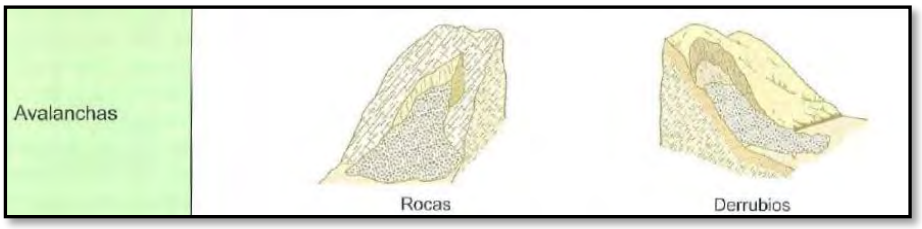
Nota. Adaptado de Ingeniería geológica, (Gonzales de Vallejo, 2002).

2.2.7.4. Avalanchas rocosas y de derrubios.

Las avalanchas son unos movimientos de ladera más destructivos que pueden ocurrir en zonas montañosas. Son extremadamente rápidos en los que grandes masas de roca o derrubios se desprenden de laderas escarpadas. Cuando el material que se moviliza no es exclusivamente rocoso, sino una mezcla heterogénea de fragmentos de distintos tamaños, se habla de derrubios (Gonzales de Vallejo, 2002, p.629).

Figura 7

Avalanchas en rocas y derrubios.



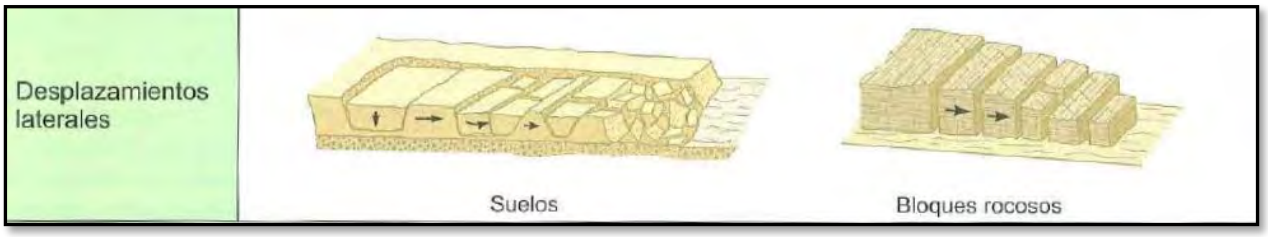
Nota. Adaptado de Ingeniería geológica, (Gonzales de Vallejo, 2002).

2.2.7.5. Desplazamientos laterales.

Son conocidos como extensión lateral, a diferencia de un deslizamiento común, donde la masa se mueve sobre una superficie de falla, en este caso un material rígido ya sea un bloque de roca o suelo muy cementado descansa sobre una capa inferior blanda y deformable. Cuando esa capa pierde resistencia, el material que esta encima empieza a desplazarse, abriéndose en bloques que se separan entre sí, suele ser lento, progresivo y desapercibido hasta que las grietas en el terreno delatan el movimiento (Gonzales de Vallejo, 2002).

Figura 8

Desplazamientos laterales en suelo y roca.



Nota. Adaptado de Ingeniería geológica, (Gonzales de Vallejo, 2002).

2.2.8. Aspectos hidrogeológicos

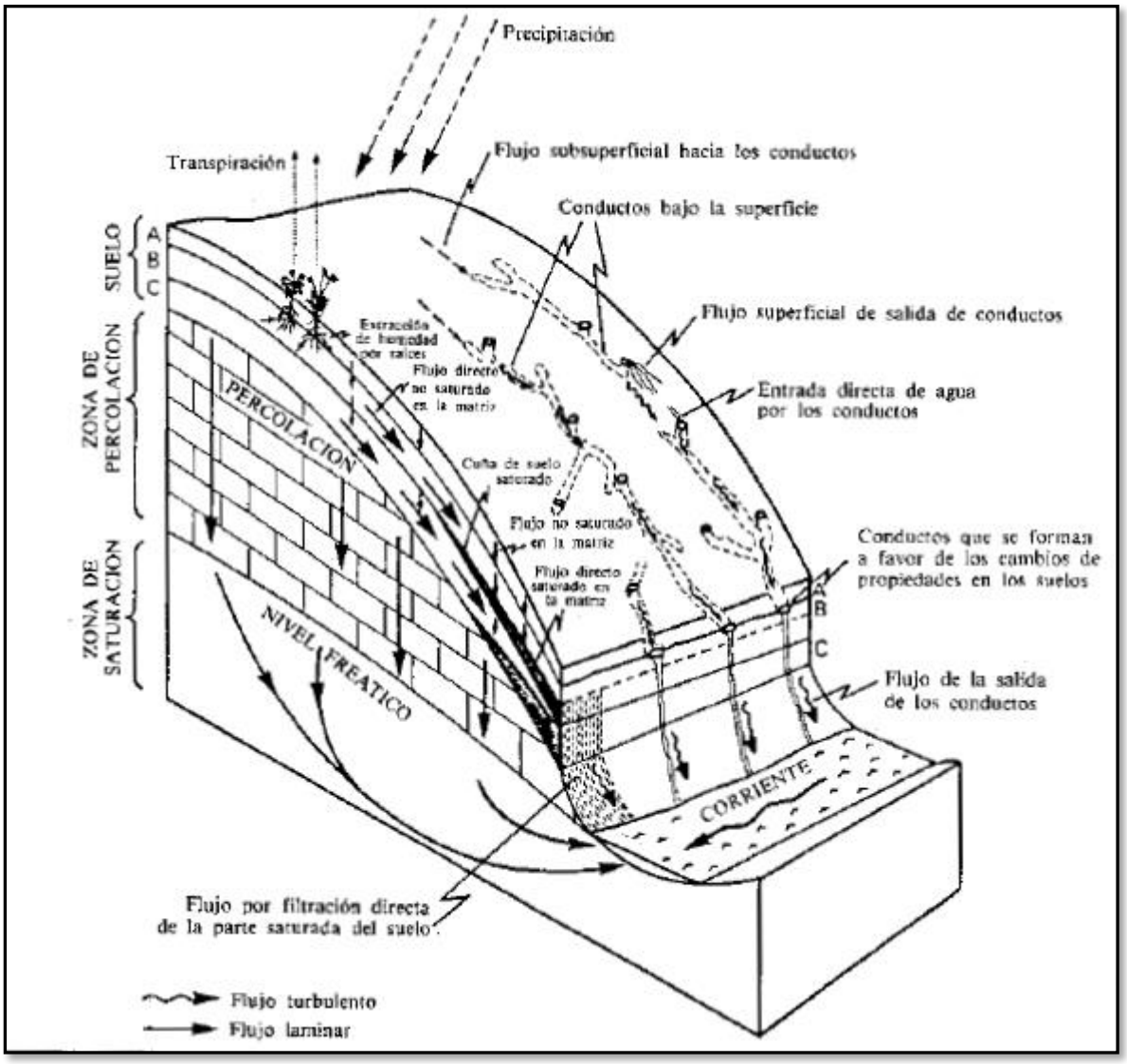
El agua con frecuencia es el principal responsable de que un talud que parecía estable termine fallando. Para realizar un estudio de estabilidad de un talud se debe entender donde se acumula el agua y que presiones ejerce en el suelo y las paredes de las discontinuidades (Instituto Geológico y Minero de España, 2006).

Cuando se excava un talud en una ladera, se altera el flujo natural del agua. La nueva superficie expuesta se convierte en una zona de descarga hacia la cual el agua circula por los poros y las fisuras. Si no se controla esa salida, el agua arrastra las partículas más finas del suelo, erosiona

los rellenos de las discontinuidades y sobre todo genera una presión intersticial que reduce la resistencia al corte (Gonzales de Vallejo, 2002).

Figura 9

Caminos realizados por el agua en un talud.



Nota. Adaptado de Manual de ingeniería de taludes, (Instituto Geológico y Minero de España , 2006).

2.2.9. Criterios de resistencia

Los criterios de resistencia del macizo rocoso son relaciones matemáticas que definen la resistencia al corte. Los criterios más utilizados a nivel mundial para estimar la resistencia a compresión simple y triaxial de macizos rocosos es la versión generalizada del Criterio de Hoek – Brown y Morh – Coulomb.

2.2.9.1. Criterio de resistencia de Hoek – Brown.

Este es un modelo de falla empírico y semiempírico para estimar la resistencia a la compresión triaxial y la envolvente de falla de macizos rocosos fracturados e isotrópicos. A diferencia de los criterios lineales de Mohr – Coulomb, este método es no lineal (Hoek & Brown, 2019).

La forma generalizada del criterio, que es la más utilizada en la práctica de la geotécnia se expresa matemáticamente mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci}\left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_1} + s\right)^{\alpha}$$

Donde:

σ_1 : tensión principal mayor efectiva en el momento de la falla.

σ_3 : tensión principal menor efectiva en el momento de la falla.

σ_{ci}: resistencia a compresión simple de la roca intacta (obtenida en laboratorio)

m y s: son constantes adimensionales que dependen de las propiedades del macizo rocoso, del tipo de roca y de la frecuencia; y características de las discontinuidades.

Para macizos rocosos sin alterar y que no están afectadas por voladuras (undisturbed):

$$m = m_i exp\left(\frac{RMR - 100}{28}\right)$$

$$s = exp\left(\frac{RMR - 100}{9}\right)$$

Para macizos rocosos alterados o afectados por voladuras (disturbed):

$$m = m_i exp\left(\frac{RMR - 100}{14}\right)$$

$$s = exp\left(\frac{RMR - 100}{6}\right)$$

α: constante adimensional que depende de las características del macizo rocoso y esta expresado por:

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}}\right)$$

La estimación del módulo de deformación del macizo rocoso es crucial para el análisis de deformabilidad, para lo cual se propuesto una ecuación que considera la influencia de la roca intacta y la estructura del macizo (Hoek & Diederichs, 2006):

$$E_m = E_i\left(0.02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\left(\frac{60+15D-GSI}{11}\right)}}\right)$$

Donde:

E_m: módulo de deformación del macizo rocoso.

E_i: módulo de elasticidad de la roca intacta.

D: factor de perturbación.

2.2.9.2 Criterio de resistencia de Mohr – Coulomb.

Este es un modelo de falla o ruptura ampliamente utilizado en la geotecnia y la mecánica de suelos para predecir la resistencia al corte de materiales geotécnicos como suelos, rocas y materiales granulares. Establece que la falla en un material ocurre cuando el esfuerzo cortante (τ) en un plano específico alcanza un valor crítico que depende del esfuerzo normal (σ) actuante sobre ese mismo plano (Das & Sivakugan, 2018).

El criterio sintetiza dos conceptos básicos:

- Círculo de Mohr: La envolvente de falla es la línea tangente a los círculos de Mohr que representan estados de esfuerzo en la condición de falla
- Ley de fricción de Coulomb: La resistencia al corte es una función lineal de la cohesión intrínseca del material y del esfuerzo normal a través del ángulo de fricción interna.

La combinación de estos conceptos da lugar a la ecuación fundamental:

$$\tau = c + \sigma\ tan(\varphi)$$

Donde:

τ: resistencia al corte o esfuerzo cortante en la falla

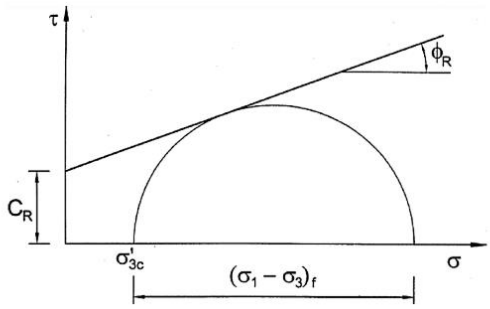
σ: esfuerzo normal total en el plano de la falla.

c: cohesión, representa la resistencia al corte del material bajo un esfuerzo normal nulo.

φ: ángulo de fricción interna, representa la fricción entre partículas y la trabazón granular, cuantifica el incremento de la resistencia al corte con el aumento del esfuerzo normal.

Figura 10

Criterio de resistencia de Mohr Coulomb.



Nota. Adaptado de ingeniería geológica, (Gonzales de Vallejo, 2002).

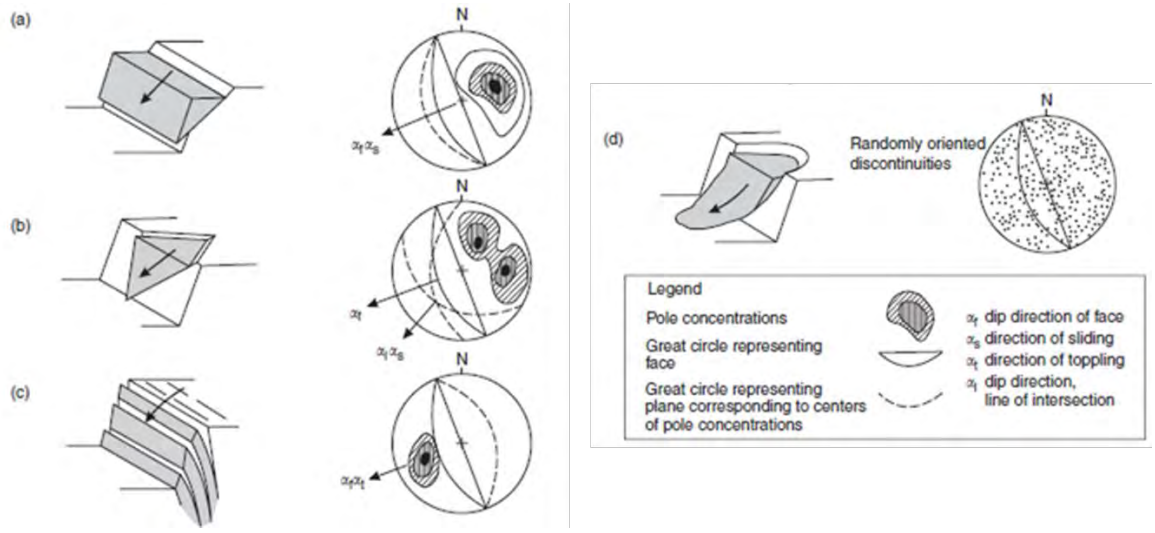
La Envolvente de falla $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$, la cohesión C_R, la resistencia a la compresión uniaxial σ_R y el esfuerzo de confinamiento σ_{3c}.

2.2.10. Mecanismos de rotura en taludes

Son los que describen la forma cinemática en que una masa de roca termina deslizándose. La identificación el mecanismo de rotura es el primer paso en el análisis de estabilidad. Estos mecanismos están controlados por la geología local, la estructura del macizo rocoso, las propiedades geotécnicas de los materiales y los agentes externos como la sismicidad e infiltración de agua (Cornforth, 2005). Como se sintetiza en la figura 13, la estructura geológica del macizo rocoso es el factor primordial que determina el mecanismo de rotura más probable (Wyllie & Mah, 2004).

Figura 11

Principales tipos de falla de bloques en taludes.



Nota. Adaptado de Rock slope engineering, (Wyllie & Mah, 2004). (a) Falla planar, controlada por una única familia de diaclasas; (b) Falla por cuña, gobernada por la intersección de dos planos de discontinuidad; (c) Falla por volcamiento, en rocas competentes con diaclasas de buzamiento interno; (d) Falla circular, típica de macizos rocosos muy fracturados o suelos.

2.2.10.1. Rotura planar.

La superficie de falla es plana e inclinada, ocurre cuando existe un plano de debilidad subparalelo a la superficie del talud como un estrato de arcilla, una fractura en la roca o una foliación. La masa deslizante se mueve como un bloque único (Turner & Schuster, 2012).

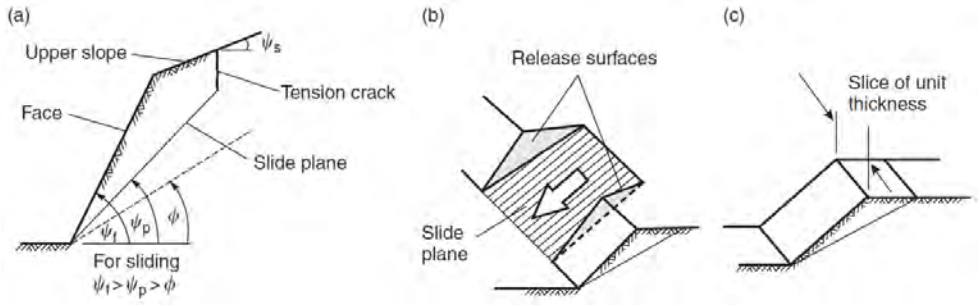
Para que una rotura planar sea cinemáticamente posible, debe cumplirse las siguientes condiciones en el macizo rocoso:

- Dirección de la discontinuidad: El rumbo del plano de discontinuidad debe ser paralelo o subparelelo ($\pm 20°$) al rumbo del talud.

- Buzamiento de la discontinuidad: El plano de discontinuidad debe buzar hacia el vacío, y su ángulo de buzamiento (ψp) debe ser menor que el del talud (ψf) pero mayor que el ángulo de fricción interna del plano (φ), obteniendo $\varphi < \psi p < \psi f$.
- Salida libre: El plano de discontinuidad debe intersectar la superficie del talud, creando una cara de salida libre para el bloque.

Figura 12

Condiciones para falla planar.



Nota. Adaptado de Rock slope engineering, (Wyllie & Mah, 2004). (a) Sección transversal mostrando los planos estructurales que definen la falla: la cara del talud, el plano de deslizamiento y la grieta de tracción. (b) Vistas en planta de las superficies de liberación laterales que delimitan los extremos del bloque fallado. (c) Modelo simplificado utilizado para el análisis de equilibrio límite.

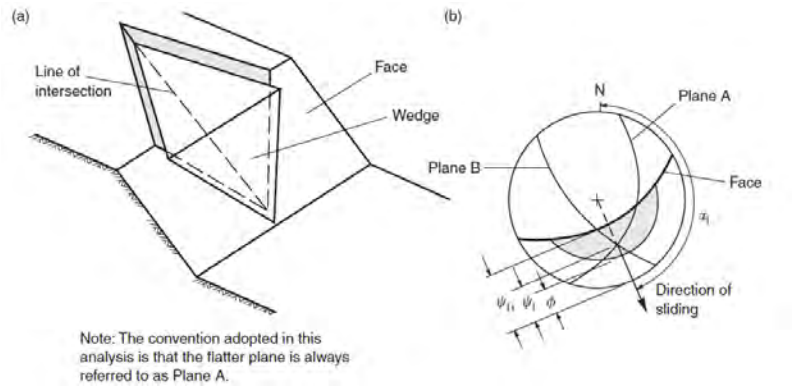
2.2.10.2. Rotura en cuña.

Esta rotura está delimitada por dos planos de discontinuidad que se intersectan cómo diaclasas, fallas o planos de estratificación, se desprende y desliza a lo largo de la línea de intersección de estos planos. La masa que se desplaza tiene la forma geométrica de una cuña y presenta tres condiciones esenciales (Wyllie & Mah, 2004).

- Dirección de la línea de intersección: La línea de intersección de los dos planos de discontinuidad debe buzar hacia el vacío. Es decir, su proyección debe estar contenida dentro del área del talud
- Buzamiento de la línea de intersección: El buzamiento de la línea de intersección (ψ_i) debe ser menor que el buzamiento del talud (ψf) pero mayor que el ángulo de fricción promedio de las discontinuidades (φ), obteniéndose $\varphi < \psi_i < \psi f$.
- Salida libre: La línea de intersección debe salir en la cara del talud permitiendo el movimiento de la cuña.

Figura 13

Condiciones geométricas para la falla en cuña.



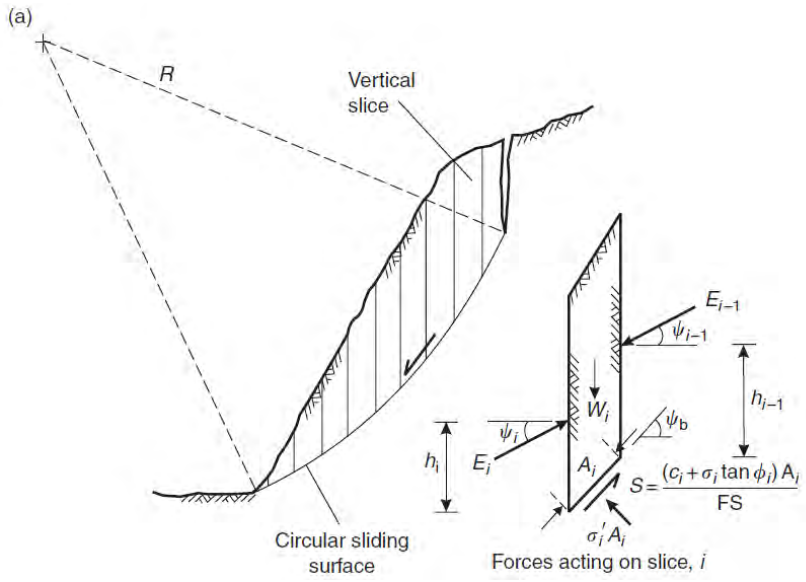
Nota. Adaptado de Rock slope engineering, (Wyllie & Mah, 2004). (a) Vista de la falla en cuña mostrando los planos de discontinuidad A y B, y la línea de intersección; (b) Estereograma mostrando la orientación de la línea de intersección y el rango de buzamiento (ψ_i).

2.2.10.3. Rotura circular.

Es un tipo de mecanismo de falla en el cual la superficie de deslizamiento tiene una forma curva, típicamente aproximada a un arco circular. A diferencia de las fallas planares o de cuña, este mecanismo no está controlado por discontinuidades preexistentes, sino que se desarrolla a través del mismo material, buscando el camino de menor resistencia (Wyllie & Mah, 2004).

Figura 14

Condiciones típicas de deslizamiento circular.



Nota. Adaptado de Rock slope engineering, (Wyllie & Mah, 2004). (a) Superficie de falla circular de gran radio en material homogéneo y débil, mostrando el diagrama de cuerpo libre de una dovela típica con las fuerzas actuantes: peso propio, fuerzas normales y cortantes entre dovelas (E_{i-1}, ψ_{i-1}), y resistencia al corte movilizada a lo largo de la superficie de falla S.

2.2.10.4. Rotura por vuelco.

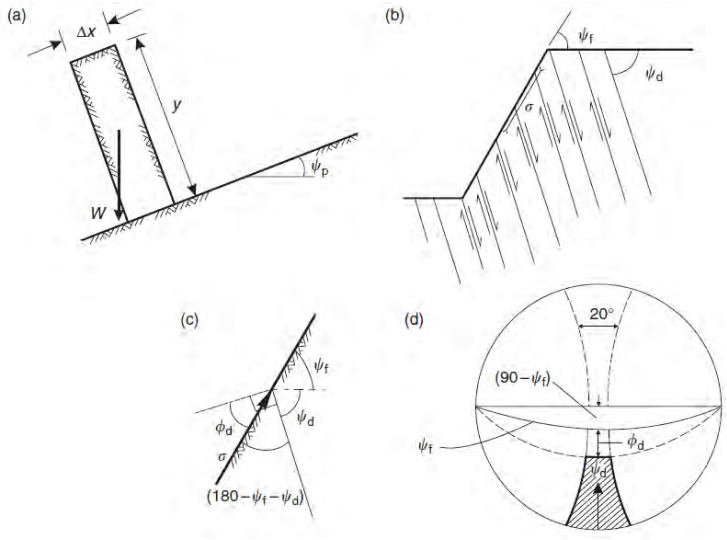
Como establecieron Wyllie & Mah (2004), el vuelco es un mecanismo de inestabilidad de los macizos rocosos diaclasados que implica la rotación de bloques de rocas alrededor de un punto fijo ubicado en su base. Este movimiento ocurre cuando el centro de gravedad de un bloque alto y

delgado se desplaza fuera de su base de apoyo, generando un movimiento de vuelco. Para que ocurra debe cumplirse condiciones como:

- Orientación de las discontinuidades: La familia principal de discontinuidades debe buzar hacia el interior del talud.
- Relación de aspecto: Los bloques deben ser altos y delgados, con una alta relación altura/ancho.
- Ángulo de las discontinuidades: El buzamiento de las discontinuidades (ψd) debe ser mayor que el ángulo de fricción de las juntas (φ) pero menor que el buzamiento del talud (ψf) para algunos tipos de vuelco.

Figura 15

Condiciones cinemáticas para el deslizamiento flexural previo al vuelco.



Nota. Adaptado de Rock slope engineering, (Wyllie & Mah, 2004). (a) Prueba de relación altura/ancho del bloque para vuelco; (b) Direcciones de esfuerzos y deslizamiento en el talud rocoso; (c) Condición para deslizamiento entre capas; (d) Prueba cinemática definida en proyección estereográfica de hemisferio inferior.

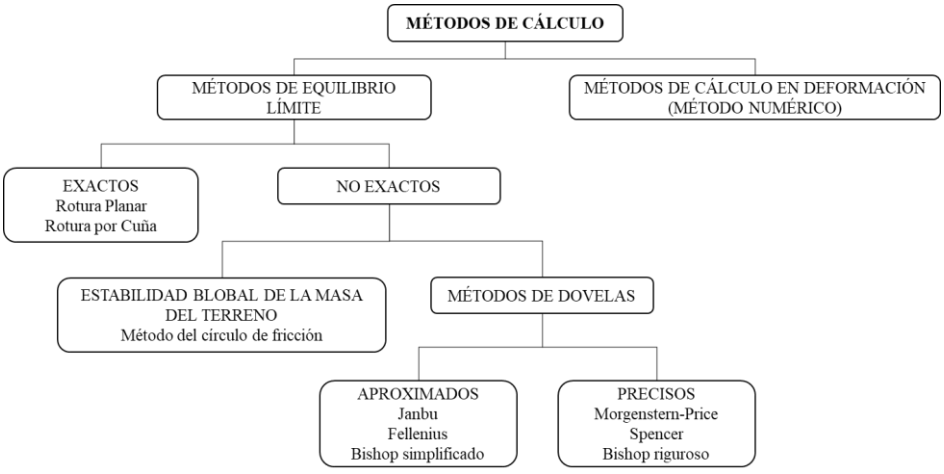
2.2.11. Métodos de análisis de estabilidad de taludes

La elección del método adecuado para evaluar la estabilidad de un talud es un proceso crítico que depende de múltiples factores. Entre los criterios técnicos más influyentes se encuentran la etapa de desarrollo del proyecto, las dimensiones geométricas del talud y las propiedades geomecánicas y estructurales del macizo rocoso (Suarez, 2017).

La selección de un método para evaluar la estabilidad de un talud es fundamental para la precisión de los resultados. Una clasificación estructural, distingue entre los enfoques basados en el equilibrio límite y aquellos que consideran el comportamiento tenso-deformacional del terreno (Duncan, 1996).

Figura 16

Métodos de cálculo de estabilidad de taludes.



Nota. Adaptado de Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales, (Suarez, 2017).

2.2.11.1. Método de Equilibrio Límite (LEM).

Este enfoque, se centra en evaluar el factor de seguridad (FS). El FS se define como la relación entre fuerzas o momentos resistentes y los actuantes a lo largo de una superficie de falla potencial predeterminada. Su razonamiento es de aplicar las leyes de la estática a una masa de

suelo que se considera rígida, bajo el supuesto de que la resistencia al corte del material se moviliza por completo y al mismo tiempo en cada punto de la superficie de rotura (Griffiths & Lane, 1999). El cual comprende dos metodologías principales de análisis:

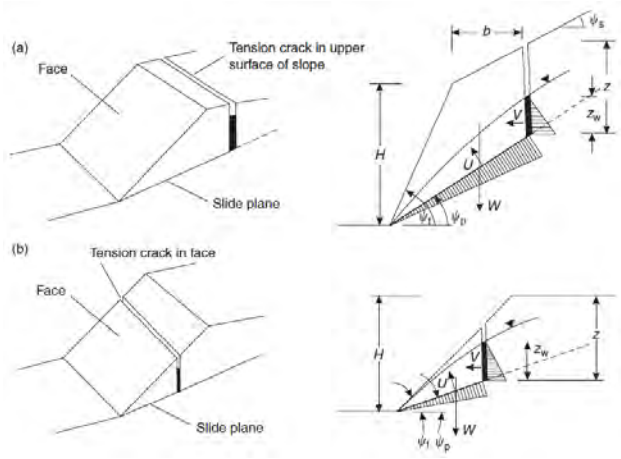
- La primera se basa en la evaluación del Factor de Seguridad (FS) para una superficie de rotura predefinida, como fallas de tipo planar, en cuña, por vuelco o circular.
- La segunda metodología consiste en la determinación automática de la superficie de falla crítica y el cálculo simultaneo de su Factor de Seguridad correspondiente.

2.2.11.1.1. Análisis de estabilidad por falla planar.

El mecanismo de falla planar ocurre cuando un volumen de roca, considerado como una unidad sólida, se desplaza a lo largo de una discontinuidad de buzamiento que posee una geometría aproximada lineal.

Figura 17

Geometrías de una falla planar en taludes.



Nota. Adaptado de Rock slope engineering, (Wyllie & Mah, 2004). Rotura planar con grietas: (a) Con grieta de tracción en la corona del talud; (b) Con grieta de tracción en el frente del talud.

El análisis de estabilidad para este tipo de falla se realiza comúnmente mediante el método de equilibrio límite. El factor de seguridad (FS) se define como la relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas actuantes a lo largo del plano de falla. La formulación para un plano de falla de buzamiento ψp, sin soporte en el pie y considerando la presión de agua (u).

$$FS = \left(\frac{c \times A + (W cos\psi p - u - V sen\psi p) tan\varphi}{W sen\psi p + V cos\psi p}\right)$$

$$A = \frac{h + b tan\psi p - z}{sen\psi p}$$

$$u = \frac{1}{2}\gamma_w z_w \frac{(H + b tan\psi_s)}{sen\psi p}$$

$$V = \frac{1}{2}\gamma_w z_w^2$$

Para la grieta de tensión en el caso (a):

$$W = \gamma_r \left[\left(1 - \frac{tan\psi_p}{tan\psi_f}\right)\left(bH + \frac{H^2}{2ta\psi_f}\right) + \frac{1}{2}b^2\left(tan\psi_s - tan\psi_p\right)\right]$$

Para la grieta de tensión en el caso (b):

$$W = \frac{1}{2}\gamma_r H^2 \left[\frac{\left(1 - \frac{z}{H}\right)^2 \left(\frac{tan\psi_f}{tan\psi_p} - 1\right)}{tan\psi_p}\right]$$

Donde:

c: cohesión a lo largo del plano de discontinuidad.

φ: ángulo de fricción interna del plano de discontinuidad.

W: peso del bloque deslizante.

A: área del plano de deslizamiento.

u: fuerza de presión de agua resultante en el plano de discontinuidad.

V: fuerza de agua en la grieta de tracción.

γ_w: peso unitario del agua.

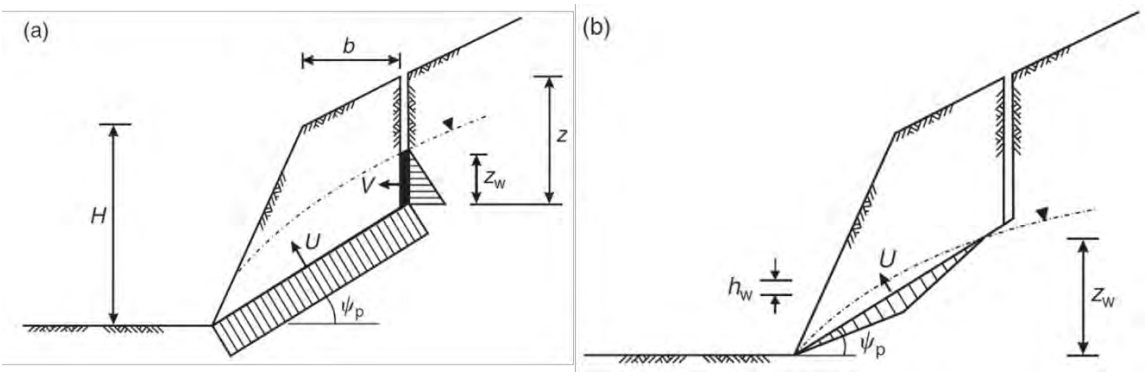
γ_r: peso unitario de la roca.

z: profundidad de la grieta de tracción.

Para casos donde se considera el nivel de agua subterránea:

Figura 18

Esquema de las posibles distribuciones de presión de agua subterránea.



Nota. Adaptado de Rock slope engineering, (Wyllie & Mah, 2004). En una falla planar: (a) Presión uniforme sobre el plano de deslizamiento, causada por el bloqueo del drenaje en el pie del talud; (b) Distribución triangular de presión, correspondiente a un nivel freático por debajo de la base de la grieta de tracción.

$$u = \frac{1}{2}\frac{Z_W}{sen\psi_p} h_w \gamma_w$$

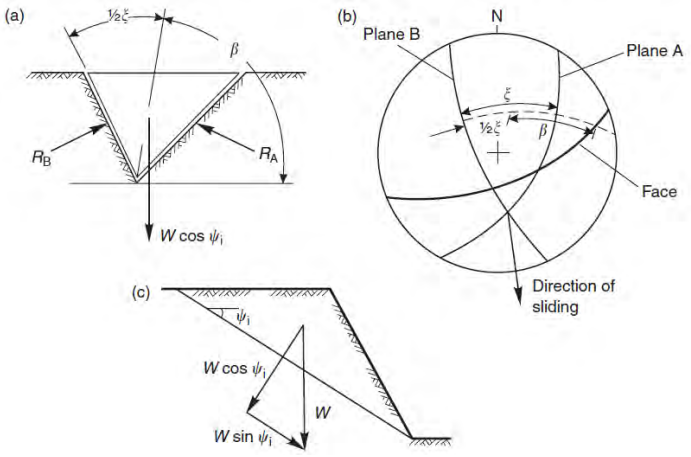
2.2.11.1.2. Análisis de estabilidad por falla en cuña.

Wyllie & Mah (2004), establecen que el análisis de una posible ruptura en cuña requiere de los siguientes elementos de verificación:

- Una representación isométrica del mecanismo de falla en forma de cuña.
- Un estereograma donde se refleje la orientación de la línea de intersección de las discontinuidades, junto con el intervalo de buzamiento (ψ_i) en el cual el deslizamiento es cinemáticamente posible.
- Una vista del talud en proyección ortogonal a la línea de intersección.
- Un diagrama estereográfico que defina el rango de rumbo (α_i) de la línea de intersección que permite la formación de la cuña inestable.

Figura 19

Modelo de análisis de fuerzas para el cálculo del FS de una cuña.



Nota. Adaptado de Rock slope engineering, (Wyllie & Mah, 2004). (a) Vista frontal de la cuña definiendo los ángulos (β y ξ) y las reacciones normales (R_A y R_B) en los planos de deslizamiento; (b) Proyección estereográfica para la medición de los ángulos (β y ξ). Sección transversal de la cuña mostrando la descomposición de la fuerza del peso (w) en sus componentes.

$$FS = \frac{(R_A + R_B tan\phi)}{W sen\psi_i}$$

$$R_A sen\left(\beta - \frac{1}{2}\xi\right) = R_B sen\left(\beta + \frac{1}{2}\xi\right)$$

$$R_A cos\left(\beta - \frac{1}{2}\xi\right) + R_B cos\left(\beta + \frac{1}{2}\xi\right) = W cos\psi_i$$

$$R_A + R_B = \frac{W cos\psi_i sen\beta}{sen\frac{\xi}{2}}$$

$$FS = \frac{sen\beta}{sen\frac{\xi}{2}} \frac{tan\phi}{tan\psi_i}$$

Donde:

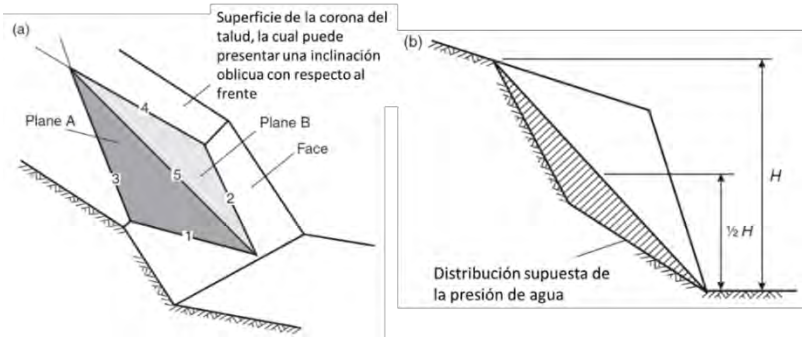
$R_A\ y\ R_B$: son las reacciones normales.

$\beta\ y\ \xi$: son ángulos definidos en la imagen.

Para el caso donde se considera la fricción, cohesión y la presión del agua:

Figura 20

Modelo geométrico para el análisis de estabilidad de una cuña considerando presión de agua y resistencia al corte.



Nota. Adaptado de Rock slope engineering, (Wyllie & Mah, 2004).

$$FS = \frac{3}{\gamma_r H}(c_A X + c_B Y) + \left(A - \frac{\gamma_w}{2\gamma_r} X\right) tan\phi_A + \left(B - \frac{\gamma_w}{2\gamma_r} Y\right) tan\phi_B$$

Donde:

$c_A \; y \; c_B$: son las resistencias cohesivas.

ϕ_A y ϕ_B : son los ángulos de fricción de los planos A y B respectivamente.

γ_r: es el peso unitario de la roca.

γ_w: es el peso unitario del agua.

Y los valores de A, B, X e Y se calculan de la siguiente manera:

$$X = \frac{sen\theta_{24}}{sen\theta_{45} cos\theta_{2.na}}$$

$$Y = \frac{sen\theta_{13}}{sen\theta_{35} cos\theta_{1.nb}}$$

$$A = \frac{cos\psi_a - cos\psi_b cos\theta_{na.nb}}{sen\psi_5 sen^2\theta_{na.nb}}$$

$$B = \frac{cos\psi_b - cos\psi_a cos\theta_{na.nb}}{sen\psi_5 sen^2\theta_{na.nb}}$$

Donde:

ψ_a y ψ_b : son los buzamientos de los planos A y B.

ψ_5: buzamiento de la línea de intersección.

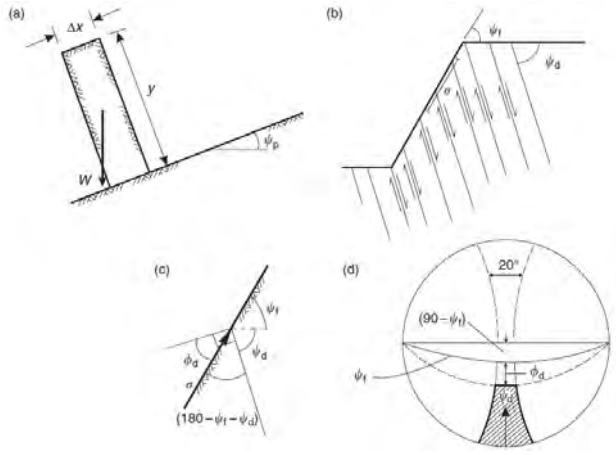
2.2.11.1.3. Análisis de estabilidad falla por vuelco.

De acuerdo con Wyllie & Mah (2004), la ocurrencia de una falla por vuelco esta sujeta al cumplimiento de cuatro condiciones:

- La existencia de una condición de deslizamiento entre capas o estratos de roca.
- La alineación entre las direcciones de los esfuerzos actuantes en el macizo rocoso y las direcciones potenciales de movimiento en el talud.
- La verificación de la relación altura/ancho del bloque, que determina su susceptibilidad al colapso por volcamiento.
- Una evaluación cinemática, representada en una proyección estereográfica de hemisferio inferior, que confirme la viabilidad del mecanismo de vuelco.

Figura 21

Condiciones cinemáticas para el deslizamiento flexural previo al vuelco.



Nota. Adaptado de Rock slope engineering, (Wyllie & Mah, 2004). (a) Prueba de relación altura/ancho del bloque para vuelco; (b) Direcciones de esfuerzos y deslizamiento en el talud rocoso; (c) Condición para deslizamiento entre capas; (d) Prueba cinemática definida en proyección estereográfica de hemisferio inferior.

Condiciones para el deslizamiento:

$$(180 - \psi_f - \psi_d) \geq (90 - \phi_d)$$

$$\psi_d \geq (90 - \psi_f) + \phi_d$$

Condiciones de forma de bloque:

Estable:

$$\psi_d < \phi_p$$

Volcamiento:

$$\frac{\Delta x}{y} < tan\psi_p$$

Condición cinemática de alineamiento de bloque para el vuelco:

$$|(\alpha_f - \alpha_d)| < 10^0$$

De acuerdo con Wyllie & Mah (2004), la evaluación de la estabilidad contra el volcamiento se cuantifica mediante el FS. Este índice se calcula como la relación entre la resistencia al corte disponible y la requerida, expresada mediante la siguiente ecuación:

$$FS = \frac{tan\phi_{disponible}}{tan\phi_{requerido}}$$

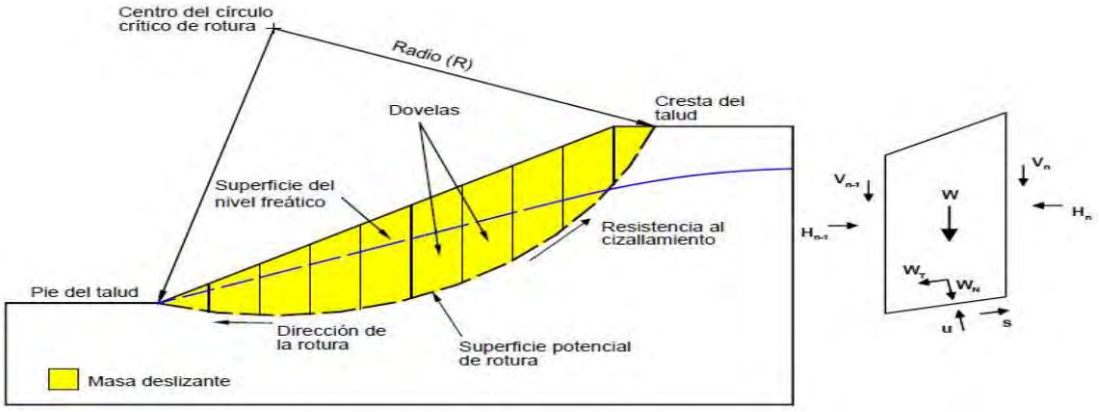
2.2.11.1.4. Análisis de estabilidad por falla circular.

Se basa en el análisis de equilibrio límite, donde se considera un volumen de suelo o roca que se mueve a lo largo de una superficie de falla circular. El FS se define universalmente como

la relación entre las fuerzas o momentos que se resisten al movimiento y aquellos que lo provocan (Das & Sivakugan, 2018).

Figura 22

Esquema del modelo de falla circular.



Nota. Adaptado de Factibilidad Técnica y Ambiental para el Diseño de Sitio de una Planta de Concreto, (Hernández, 2010).

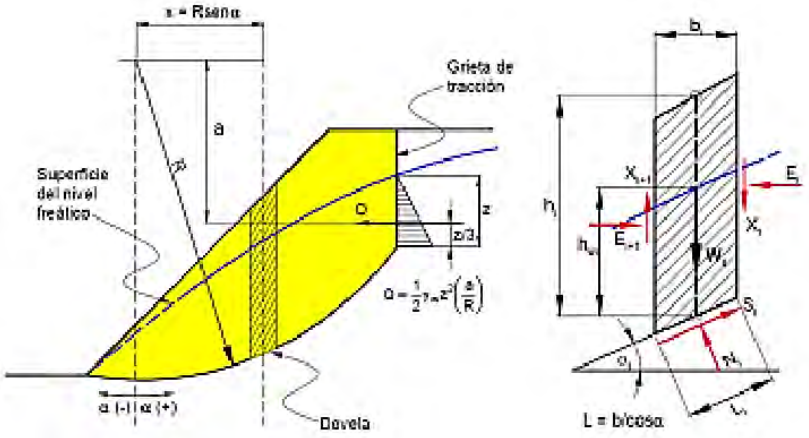
El diagrama detalla la geometría general y el método de las dovelas, ilustrando las fuerzas y parámetros considerados en el análisis, como el peso de la dovela, la presión de poros y las fuerzas interactivas entre dovelas adyacentes.

Método de Fellenius

Es el método de las dovelas ordinario, es un procedimiento de equilibrio límite desarrollado para evaluar la estabilidad de taludes mediante superficies de falla circular. Su principal característica es que ignora las fuerzas laterales entre dovelas, lo que permite una aplicación directa, aunque con ciertas limitaciones en precisión (Das & Sivakugan, 2018).

Figura 23

Parámetros geométricos y esquema de esfuerzos en una rebanada para el método de Fellenius.



Nota. Adaptado de Principles of Geotechnical Engineering, (Das & Sivakugan, 2018).

Se muestra las fuerzas actuantes sobre una dovela típica, la línea de saturación y la geometría general del círculo de falla de radio R.

El FS, en este caso se determina por la ecuación:

$$FS = \frac{\Sigma_{i=1}^{n}[c'L_i + (W_i cos\alpha_i - u_i L_i)tan\phi']}{\Sigma_{i=1}^{n} W_i sen\alpha_i + \frac{1}{2}\gamma_w Z^2 \left(\frac{a}{R}\right)}$$

Método de Bishop simplificado

Constituye una evolución significativa del método de Fellenius dentro del marco de los métodos de equilibrio límite para el análisis de estabilidad de taludes con superficies de falla circular, Bishop incorporó las fuerzas verticales que actúan entre las dovelas manteniendo a las fuerzas horizontales como despreciables o en equilibrio. Esta suposición permitió ganar bastante precisión, razón por la cual se consolido como uno de los procedimientos más utilizados en la práctica geotécnica (Bishop, 1955).

El FS se define mediante la expresión:

$$FS = \frac{\Sigma_{i=1}^{n}\left[\frac{c'b_i + (W_i - u_i b_i)tan\phi'}{M_i(\alpha_i)}\right]}{\Sigma_{i=1}^{n} W_i sen\alpha_i + \frac{1}{2}\gamma_w Z^2\left(\frac{a}{R}\right)}$$

Donde $M_i(\alpha_i)$ representa un factor de corrección definido como:

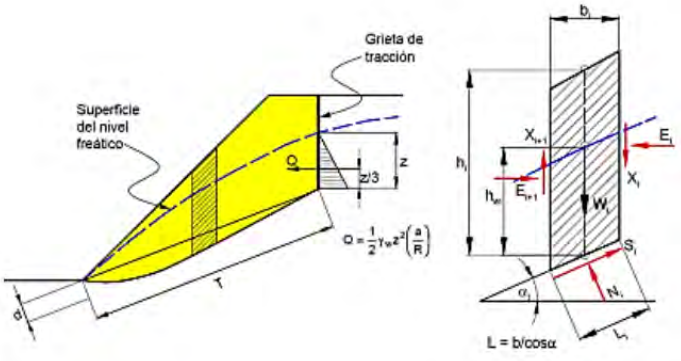
$$M_i(\alpha_i) = cos\alpha_i\left(1 + \frac{tan\alpha_i tan\phi}{FS}\right)$$

Método de Janbu simplificado

A diferencia de los métodos convencionales que se limitan a superficies cilíndricas, ese enfoque permite modelar mecanismos de falla más complejos y realistas, particularmente en taludes con estratificación marcada o variaciones significativas en la resistencia del suelo (Jambu, 1954).

Figura 24

Modelo geométrico y de fuerzas para el método de Janbu simplificado.



Nota. Adaptado de Estabilidad de taludes, (Catanzariti, 2016).

La figura incorpora elementos clave del análisis, como la presencia de una grieta de tracción en la corona y la superficie del nivel freático.

$$FS = \frac{f_0 \Sigma_{i=1}^{n} \left[\frac{(c' + (\gamma h_i - \gamma w h_{wi}) tan\phi)(1 + tan^2 \alpha_i) b_i}{N_i(\alpha_i)} \right]}{\Sigma_{i=1}^{n} W_i tan\alpha_i + \frac{1}{2} \gamma_w Z^2}$$

$$N_i(\alpha_i) = \left(1 + \frac{tan\alpha_i tan\phi'}{FS}\right)$$

$$f_0 = 1 + k\left(\frac{d}{T} - 1.4\left(\frac{d}{T}\right)^2\right)$$

$$k = 0.31 \; si \; c' = 0; k = 0.50 \; si \; c' > 0 \; y \; \phi' > 0$$

Donde:

γ: es el peso específico del terreno.

h_w: es la altura del nivel de agua.

Z: es la altura del nivel de agua en la grieta de tracción.

B: es el ancho de la dovela.

W: es el peso de cada dovela.

L: es la longitud de la base de la dovela.

γ_w: es el peso específico del agua.

h: es la altura de la dovela en la parte media.

ϕ': es el ángulo de fricción interno.

c': es la cohesión en terminos de tensiones efectivas.

α: es el ángulo positivo o negativo de la base de la dovela.

2.2.11.2. Métodos de análisis en deformaciones (Métodos Numéricos).

Estos métodos incorporan las leyes constitutivas (comportamiento esfuerzo-deformación) de los materiales, lo que permite modelar no solo el estado de falla incipiente, sino también la evolución de los desplazamientos y la redistribución de esfuerzos dentro del talud. Técnicas como el Método de los elementos finitos (MEF), el Método de los elementos diferenciados (MED) o el Método de los elementos de Contorno (MEC) se enmarcan en esta categoría. Su aplicación computacionalmente es más demandante, para analizar problemas complejos que involucran estructuras de soporte, secuencias de excavación, y comportamiento de suelos y rocas donde las deformaciones son un parámetro crítico de diseño (Zienkiewicz et al., 2013).

Los métodos numéricos se clasifican en dos grandes grupos según el dominio de análisis: los métodos de dominio, que modelan el comportamiento completo del material, y los métodos de contorno, que se concentran en las condiciones de borde y solo requieren discretizar los límites del sistema:

- Método de Elementos Finitos (MEF)
- Método de Diferencias Finitas (MDF)
- Método de Elementos Discretos (MED)

2.2.11.3. Análisis estático.

El análisis estático busca determinar sin un talud se mantiene en equilibrio bajo la acción de la gravedad y las presiones de aguas internas, sin considerar los sismos. Para ello, los métodos de equilibrio límite como el de Bishop simplificado o Fellenius comparan las fuerzas resistentes con las desestabilizadoras a lo largo de una superficie de falla, expresando el resultado como factor de seguridad (Das & Sivakugan, 2018). En estos análisis, el agua es importante porque aumenta la presión de poros, reduce los esfuerzos efectivos y por lo tanto se reduce la resistencia al corte

(Gonzales de Vallejo, 2002). En el Perú, la Norma CE.020 exige un factor de seguridad mínimo de 1.5 para condiciones estáticas (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018).

2.2.11.4. Análisis pseudoestático.

El análisis pseudoestático considera el efecto sísmico en la evaluación de un talud, calculada como el producto del peso de la masa inestable por un coeficiente sísmico. Este coeficiente representa una parte de la aceleración máxima esperada en la zona de estudio, definida por la Norma E.030 de Diseño Sismorresistente. En el Perú, la Norma CE.020 establece que el coeficiente sísmico horizontal equivale a la mitad de dicha aceleración máxima y fija un factor de seguridad mínimo de 1.25 para condiciones pseudoestáticas (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018).

2.2.12. Métodos empíricos

Los métodos empíricos constituyen un enfoque fundamental, donde la información cuantitativa detallada suele ser escasa. Estas metodologías se basan en la correlación estadística entre parámetros observables del macizo rocoso y su comportamiento de estabilidad documentado en casos históricos. Su principal utilidad radica en proporcionar un diseño preliminar robusto y rápido para la configuración de las pendientes del talud (Hoek & Brown, 2019).

Una de las aplicaciones más extendidas de este enfoque es el uso de clasificaciones geotécnicas, como los sistemas RMR y SMR, los cuales permiten estimar parámetros de diseño a partir de las características geológicas cualitativas y cuantitativas (Romana, 1985).

Si bien su valor en la fase de reconocimiento es incuestionable, es crucial reconocer sus limitaciones inherentes. Los métodos empíricos ofrecen resultados específicos para el contexto

geológico y las condiciones hidrogeológicas a partir de las cuales fueron calibrados, lo que puede restringir su extrapolación a sitios con característicass diferentes (Suarez, 2017).

En consecuencia, estos métodos no deben considerarse como una solución definitiva, sino como una herramienta que establece una línea base. Sus resultados deben ser necesariamnete validados y refinados mediante análisis más sofisticados, como los de equilibrio límite o númerico, a medida que se dispone de información más detallada del sitio.

2.2.13. Normas y reglamentaciones

En el Perú, la estabilidad de taludes se rige por la Norma Técnica CE.020 Suelos y Taludes, que establecen los factores de seguridad mínimos de 1.5 para condiciones estáticas y 1.25 para condiciones pseudoestáticas (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018). Para el análisis sísmico, esta norma se complementa con la E.030 Diseño Sismorresistente, que divide en zonas el país y define las aceleraciones máximas con las que se calcula el coeficiente sísmico horizontal.

En el ámbito específico de carreteras el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2018) en el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras DG-2018 actualizado mediante la Resolución Directoral N° 03-2018-MTC/14, dedica una sección a la estabilidad de taludes en cortes y terraplenes, lo cual complementa sus disposiciones con criterios geométricos, recomendaciones de banquetas y sistemas de drenaje aplicables en carreteras.

Tabla 13

Valores referenciales de relación horizontal: vertical para taludes en corte

Tipo de material	Relación H:V (Horizontal:Vertical)	Inclinación aproximada del talud
Roca sana y competente	1:4 a 1:2 (0.25:1 a 0.5:1)	75° - 63°
Roca fracturada o meteorizada	1:1 (1:1)	45°
Suelos granulares densos o cohesivos firmes	1.5:1 a 1:1 (0.67:1 a 1:1)	34° - 45°
Suelos cohesivos blandos o sueltos	2:1 a 3:1 (0.5:1 a 0.33:1)	26° - 18°

Nota. Adaptado de Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG-2018, (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018).

2.2.14. Medidas de estabilización de taludes

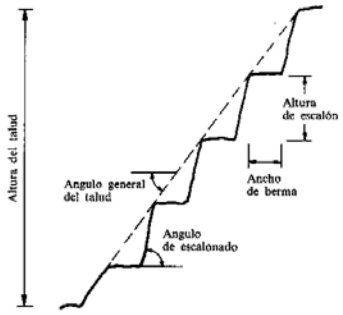
Al realizar excavaciones de taludes para obras civiles en condiciones topográficas difíciles y con pendientes altas, es recomendable la aplicación de medidas de estabilización o corrección. La aplicación de estas medidas servirá para alcanzar un factor de seguridad predeterminado o estabilizar fenómenos de rotura, por lo que se tiene que valorar aspectos de tipo constructivo o económico para determinar la solución ideal (Instituto Geológico y Minero de España, 2006).

2.2.14.1 Corrección geométrica.

Cuando las condiciones lo permiten, la manera más directa de mejorar la estabilidad consiste en modificar la forma del talud. Suarez (2017), menciona que al reducir la altura del corte o tender su pendiente, se disminuye la componente gravitacional y al mismo tiempo se redistribuyen los esfuerzos internos. Si le añadimos banquetas o bermas intermedias, el talud deja de ser una única superficie inclinada y vendría a ser una sucesión de escalones. Wyllie & Mah (2004), añaden que, en macizos rocosos fracturados las banquetas interrumpen la continuidad de las juntas que podrían formar cuñas o planos de deslizamientos.

Figura 25

Esquema de un talud con bermas.



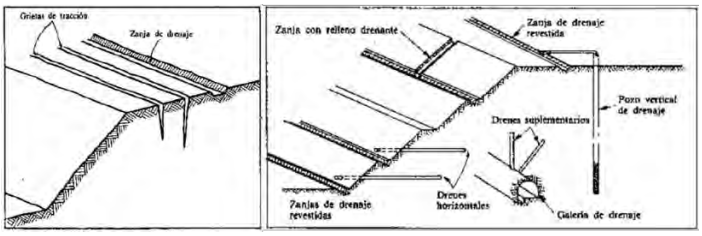
Nota. Adaptado de Manual de ingeniería de taludes, (Instituto Geológico y Minero de España, 2006).

2.2.14.2. Drenajes.

Si el agua es el principal detonante de la inestabilidad de un talud, el drenaje vendría a ser una medida de primer orden. Abramson et al. (2002) distinguen dos tipos: el drenaje superficial, que intercepta el agua antes de que se infiltre, y el drenaje subterráneo, que evacúa el agua que ya ha entrado en el terreno. Las cunetas de coronación, los canales de bajada y las zanjas revestidas son ejemplos clásicos de un drenaje superficial; los subdrenes horizontales, las pantallas drenantes son ejemplos de un drenaje subterráneo.

Figura 26

Sistemas de drenaje en un talud.



Nota. Adaptado de Manual de ingeniería de taludes, (Instituto Geológico y Minero de España, 2006).

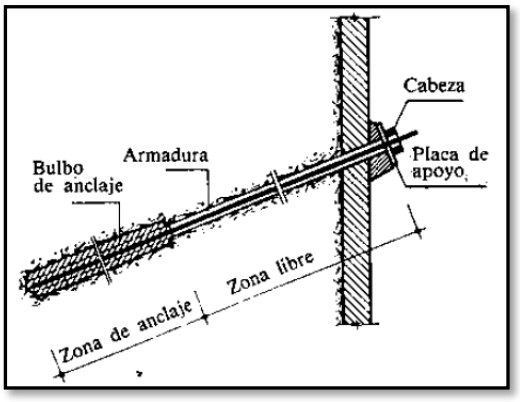
2.2.14.3. Elementos estructurales resistentes.

Anclajes

Los anclajes son elementos de acero de alta resistencia que se introducen en el terreno para sujetar la masa inestable a una zona más profunda y estable. Funcionan transfiriendo la carga mediante un bulbo, mientras que la zona libre del anclaje se tensa contra una placa en la superficie del talud, comprimiendo el macizo aumentando así su resistencia al corte (Wyllie & Mah, 2004).

Figura 27

Esquema de un anclaje.



Nota. Adaptado de Manual de ingeniería de taludes, (Instituto Geológico y Minero de España, 2006).

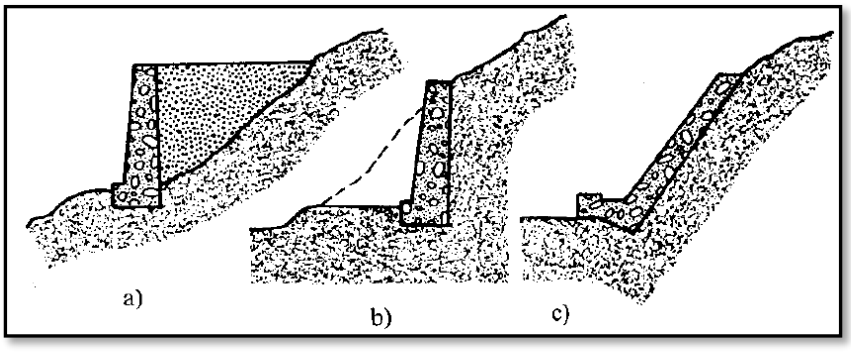
Muros de contención

Cuando no hay espacio suficiente para tender la pendiente del talud, o cuando no se puede contener el empuje del terreno de forma inmediata, los muros de contención se convierten en una alternativa principal. Son estructuras verticales o inclinadas que soportan el empuje y lo transmiten hacia la cimentación (Suarez, 2017).

Existen varios tipos de muros, cada una con su lógica de funcionamiento. Los muros de gaviones, hechos con cestas de malla rellenos de fragmentos de roca que resisten el empuje simplemente por su propio peso, son flexibles porque drenan el agua sin necesidad de sistemas adicionales y son las que con más frecuencia se ve en carreteras de montaña (Abramson et al., 2002). Los muros en voladizo, construidos en hórmigon armado, aprovechan la forma de T o L para que una parte del relleno que sostienen contribuya a su estabilidad. Para desniveles mayores, se recurre a muros anclados o pantallas, que combinan el refuerzo del terreno con anclajes tensados hacia el interior del talud, una solución potente pero más costosa.

Figura 28

Tipos de muros de contención.



Nota. Adaptado de Manual de ingeniería de taludes, (Instituto Geológico y Minero de España, 2006). (a) Sostenimiento. (b) Contención. (c) Revestimiento.

2.2.14.4. Corrección superficial.

Siembra de taludes

Las medidas de corrección superficial más empleadas son los recubrimientos con especies nativas. Los geotextiles, actúan como un escudo inmediato debido a que amortiguan el impacto de las gotas de lluvia, reducen la velocidad del agua y retienen las partículas finas. Si a ese

recubrimiento se le suma la vegetación como los pastos altoandinos, las raíces van ocupando los poros del suelo y se eleva la resistencia al corte superficial. (Wyllie & Mah, 2004).

Shotcrete

En frentes rocosos, la corrección superficial por shotcrete que es una capa de mortero u hormigón que se lanza a presión sobre la cara del talud, sellando las fisuras y evitando que el agua y el aire alteren la matriz de la roca, comúnmente se le combina con mallas de acero y pernos que sujetan los bloques sueltos (Wyllie & Mah, 2004). Esta solución es efectiva para controlar la caída de fragmentos de roca; sin embargo, demandan equipos especializados, generan un impacto visual considerable y en climas húmedos agresivos como el de la sierra requieren un mantenimiento constante para evitar agrietamientos por ciclos de hielo y deshielo (Abramson et al., 2002).

2.3. Hipótesis

2.3.1. Hipótesis general

La estabilidad de los taludes ubicados en el km 56 y 57 del tramo carretero Tungasuca – Livitaca se relaciona de manera directa con la caracterización geotécnica de los materiales, la identificación de los factores condicionantes de inestabilidad y la aplicación de métodos de análisis de estabilidad, lo que permite determinar medidas de mitigación adecuadas.

2.3.2. Hipótesis especificas

H1. Las características geológicas y geotécnicas que controlan la estabilidad de los taludes del km 56 y 57 del tramo carretero Tungasuca – Livitaca son la baja cohesión y la alta susceptibilidad a la saturación de los depósitos coluvio-deluviales, el fracturamiento intenso de las areniscas.

H2. Las condiciones hidrológicas, como las lluvias intensas y prolongadas que caracteriza las zonas altoandinas, reducen la estabilidad de los taludes del tramo carretero Tungasuca - Livitaca, al incrementar las presiones de poros en los depósitos coluvio-deluviales y en las discontinuidades de la arenisca fracturada, lo que disminuye los esfuerzos efectivos y con ello el factor de seguridad hasta valores que están por debajo del mínimo exigido por la normativa peruana.

H3. El modelado de la estabilidad con Slide y GEO5, al determinar los factores de seguridad, demuestra que la corrección geométrica combinada con drenajes eleva el factor de seguridad por encima de los mínimos normativos, y la alternativa de geotextil con vegetación nativa contribuye al control de erosión superficial en los taludes del tramo carretero Tungasuca – Livitaca.

2.4. Variables

2.4.1. Identificación de variables

- **Estabilidad de taludes:** Tipo de material (suelo/roca), cohesión, ángulo de fricción, meteorización; Geometría del talud; Identificación de falla, grietas y Erosión superficial.
- **Condiciones geotécnicas:** Características litológicas, estructurales, hidrogeológicas y morfométricas del terreno que influyen directamente en la estabilidad del talud.

2.4.2. Matriz de operacionalización de variables

EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA-LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025								
Variable	**Definición**	**Dimensiones**	**Indicadores**	**Índices**	**Instrumento**	**Herramienta**	**Ítems**
Dependiente							
Estabilidad de taludes	Capacidad de un talud natural o artifial para mantener su estructura sin presentar deslizamientos o fallas, determinada mediante la evaluación geotécnica de sus materiales, geometría y condiciones hidrogeológicas.	Condición geotécnica del terreno	Tipo de material (suelo/roca)	Ensayos de laboratorio	Fichas geotécnicas de campo y laboratorio	Expedientes técnicos y registros de laboratorio	Laboratorio de Mecánica de Suelos y Rocas
			Cohesión, ángulo de fricción	Clasificación geomecánica (RMR, SMR)		Ensayos de laboratorio (granulometría, corte directo)	
		Factores de estabilidad	Geometría del talud (altura, pendiente, ancho de base)	Valores obtenidos por equilibrio límite y modelamiento numérico	Software de análisis geotécnico	Software Rocscience (Slide, Geo 5)	Ensayos y modelamiento, cálculos propios
			Presencia de agua, drenaje, condiciones hidrogeológicas		Modelos de estabilidad		
		Evaluación geotécnico	Identificación de zonas críticas	Mapeo geomecánico	Cuaderno de campo, mapas topograficos	Cartografía geológica y geotécnica	INGEMMET
			Nivel de susceptibilidad al deslizamiento	Cartografía geotécnica			
		Dimensión física y de control	Identificación de fallas, grietas	Ventanas estructurales	Cuaderno de campo	Dips	INGEMMET, campo propio
			Erosión superficial, control de drenaje	Obras de drenaje, sostenimiento o bioingeniería	Informe técnico	Matriz de jerarquización de alternativas	MTC – CENEPRED
Independiente							
Condiciones geotécnicas del talud	Características litológicas, estructurales, hidrogeológicas y morfométricas del terreno que influyen directamente en la estabilidad del talud.	Geología	Litología	Descripción geológica y estratigráfica	Levantamiento topográfico	Brújulas, martillos para rocas, lupas y cuaderno de campo.	INGEMMET – MTC
			Estratigrafía		Software Arcgis y Qgis		
		Geomorfología	Altura del talud, pendiente	Ángulo de inclinación (%)	Inspección de campo	ArcGIS/ QGIS	INGEMMET
		Factores climáticos	Precipitaciones pluviales, Variaciones de temperatura	Cantidad de precipitación (mm/mes)/Rango térmico (°C)	Estaciones pluviométricas, Registros meteorológicos	Base de datos climática	SENAMHI
		Hidrológia	Infiltración, permeabilidad	Densidad y patrón de drenaje	Cartografía hidrológica	Cartografía digital – SIG	SENAMHI

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1. Tipo de investigación

El presente estudio se clasifica como una investigación aplicada, la cual, según Vasquez et al., (2023) la investigación aplicada se origina a partir de la necesidad de solucionar problemas prácticos y mejorar las condiciones de vida de las personas en diferentes campos y sectores, en este estudio aplicaremos las diferentes teorías y métodos existentes para resolver un problema práctico y real de infraestructura vial, proponer soluciones técnicas y ejecutables como modificación de su geometría, drenajes u obras de contención.

3.2. Enfoque de la investigación

La presente investigación es de enfoque mixto, según Hérnandez et al.,(2014) permite combinar el análisis detallado, la interpretación, cuantificar y generalizar los hallazgos a través de datos numéricos y no numéricos integrando procedimientos cuantitativos, este es un enfoque que utiliza la recolección de datos para demostrar la hipótesis teniendo en cuenta la medición numérica y el análisis estadístico; cualitativo, es un enfoque en el que se utiliza la recopilación de datos no numéricos para mejorar las preguntas de investigación. En este estudio mediremos variables físicas mecánicas y geométricas, utilizando datos numéricos como la cohesión, ángulo de fricción, presión de poros, coordenadas topográficas, etc. Y también se utlizará datos no numéricos como mapas, fotografías, descripciones visuales de la zona.

3.3. Alcance de la investigación

El presente proyecto de investigación tiene un alcance descriptivo-explicativo, según Hérnandez et al., (2014) mencionan que estos niveles tienen como principal función determinar las propiedades, características, perfiles, objeto o cualquier fenómeno que se propone analizar, se recopilan datos de la variable de estudio y se evalúa, permite la posibilidad de predecir y explica

por qué ocurre un evento y en qué condiciones se manifiestan teniendo la base teórica correcta con antecedentes amplios. Este estudio en el nivel descriptivo, se caracterizará detalladamente las propiedades físicas, mecánicas e hidrológicas de los taludes de roca y suelo, así como su geometría. También alcanza un nivel explicativo al analizar las relaciones entre las variables descritas, mediante el método de equilibrio límite y el modelado numérico y se explica el por qué el Factor de seguridad se encuentra por debajo o por encima del límite de las normativas y finalmente de acuerdo a los resultados obtenidos se formularán recomendaciones para mitigar el problema.

3.4. Diseño de investigación

El presente estudio corresponde a un diseño no experimental-transversal, según Hérnandez et al., (2014) mencionan que es no experimental porque este estudio observa los fenómenos tal y como se dan en su contexto natural si manipularlos para analizarlos. También es transversal porque este estudio recolecta datos en un solo momento, en un tiempo único, su propósito es describir variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado. Por lo que la investigación se observará y medirá las condiciones naturales del talud sin manipularlas o alterarlas premeditadamente, se realizará toma de muestras, recolección de datos y ensayos de laboratorio en un periodo específico reflejando el estado actual de los taludes.

3.5. Población

La población de la presente investigación está constituida por el sistema geotécnico principalmente por todos los taludes que representan problemas de inestabilidad o desprendimiento a lo largo del tramo carretero Tungasuca - Livitaca, específicamente en los kilómetros 56 y 57, de la zona 19 L, sistema de coordenadas UTM WGS84.

3.6. Muestra

Se empleó un muestreo no probabilístico, es la técnica que permite seleccionar muestras con una clara intención o por un criterio preestablecido. Las muestras que se seleccionan buscan, desde luego, una representatividad de la población, pero puede tener falencias, según la situación. Está constituido específicamente por los taludes ubicados en los km 56 y 57 ya que representan los puntos más críticos que ponen en desventaja la transitabilidad de la vía.

3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para el desarrollo de la presente investigación se aplicó las siguientes técnicas de recolección de datos.

3.7.1. Técnicas de recolección de datos

Técnicas de campo:

- Levantamiento topográfico.
- Inspección geotécnica visual para identificar elementos de inestabilidad.
- Muestreo de suelos realizando calicatas.
- Muestreo de rocas, realizando ventanas estructurales para identificar diaclasas, fallas, pliegues, contactos y alteraciones que puedan presentar el macizo rocoso.
- Monitoreo de variables hidrológicas y de desplazamiento.

Técnicas de laboratorio:

- Ensayos de mecánica de suelos, para determinar los parámetros físicos de los materiales.
- Análisis mineralógico para determinar los componentes y el potencial expansivo.

Técnicas de gabinete:

- Procesamiento de datos de los ensayos realizados en laboratorio.
- Modelación numérica mediante software especializado para el análisis de estabilidad.
- Elaboración de mapas.

3.7.2. Instrumentos de recolección de datos

Instrumentos de campo:

- Rugosímetro para obtener el valor de la rugosidad del macizo rocoso.
- Picota, brújula, GPS, lupa, cámara de alta resolución, tableros, cuaderno de campo.

Instrumentos de laboratorio:

- Equipos de límites de Atterberg para la clasificación de suelos.
- Equipos de granulometría para la clasificación del suelo y roca.
- Equipo de Corte directo para obtener el ángulo de fricción y la cohesión del suelo

Instrumentos de análisis:

- Software Geo5 y Slide para análisis de equilibrio límite de taludes.
- ArcGis para elaboración de mapas base.
- Rocscience para analizar e interpretar los datos geológicos.

CAPITULO 4: RESULTADOS

4.1 Marco geológico

4.1.1. Geología regional

La zona de estudio se encuentra en la Cordillera Oriental del sur del Perú, dentro del ámbito geológico de la región del Cusco, las unidades han sido afectadas por plegamientos y fracturas intensas producto de la orogenia andina que condicionan la estabilidad de laderas naturales y cortes de carretera. Así mismo fue estudiado por el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) en el cuadrángulo de Livitaca (hojas 29s y 29t) donde se ubica el tramo carretero donde se encuentran los taludes.

En base a la cartografía geológica del INGEMMET, el levantamiento en campo y la revisión de cuadrángulos geológicos de la región, se identificó tres unidades litoestratigráficas que afloran a lo largo del tramo carretero y donde se constituyen los taludes.

4.1.1.1. Grupo Tacaza.

El grupo Tacaza es una secuencia vulcano-sedimentaria del Paleógeno-Neógeno que aflora en la cordillera occidental del sur del Perú. Su edad abarca desde Oligoceno superior hasta el Mioceno inferior.

En el tramo carretero Tungasuca – Livitaca, el Grupo Tacaza está constituido por una sucesión de flujos andesíticos porfiríticos intercalados con bancos de areniscas tobáceas de grano medio a grueso y limolitas gris violáceas. En el cuadrángulo de Cusco hoja 28s, el Grupo Tacaza se correlaciona temporalmente con el Grupo San Jerónimo y la Formación Anta, de acuerdo al INGEMMET confirman que la Formación Anta constituye la contraparte de Tacaza.

4.1.1.2. Grupo Puno.

Es una unidad sedimentaria clástica del paleógeno que aflora en el sur de Cusco. Litológicamente es una secuencia de conglomerados polimícticos con clastos de cuarcita, volcánicos y caliza en una matriz areno-arcillosa de tonalidades rojizas de grano fino a medio. Su edad abarca desde el Eoceno al Oligoceno.

El Grupo Puno en correlación con el cuadrángulo de Cusco estaría representada por las formaciones Quilque, Puquin y el Grupo San Jerónimo, compuestas por areniscas feldespáticas y conglomerados rojizos que cronológicamente es equivalente al Grupo Puno.

Así mismo el Grupo Puno en el área de Livitaca y Cusco ha sido dividido en cuatro formaciones: Santa Ana, Pirque, Coñamuro y Yanacocha.

Formación Santa Ana

Esta unidad corresponde a la parte inferior del Grupo Puno considerando la secuencia estratigráfica. Morfológicamente se puede apreciar desde colinas bajas y valles amplios de fondo plano, hasta zonas escarpadas. sus relaciones estratigráficas están condicionadas por una discordancia angular en la basa al Grupo Chitapampa y en el techo es concordante con la Formación Pirque.

Litológicamente este compuesto por areniscas, conglomerados, arcilitas y piroclastitas donde sus características tanto texturales y estructurales varias dependiendo del lugar.

Formación Pirque

Esta unidad ha sido reconocida en varios afloramientos, sus relaciones estratigráficas son concordante con la Formación Santa Ana por la base y a la Formación Coñamuro. La Formación Pirque es una secuencia conformada por limolitas, areniscas, areniscas conglomeradicos.

Esta unidad representa un cambio significativo por las condiciones de sedimentación ya que se muestra un grado alto de selección durante el transporte.

Formación Coñamuro

Esta unidad tiene como lugar típico de afloramientos al oriente de Santa Lucia, que se sitúa al flanco derecho de Apurímac este corresponde al cuadrángulo de Livitaca. Es concordante en la base con la Formación Pirque y en el techo con la Formación Yanacocha.

Siendo que la Formación Coñamuro es generalmente conglomerádica con una coloración rojiza, pero por ciertos tramos presenta una coloración gris, amarillenta o algo verdosa.

Formación Yanacocha

Esta unidad como parte superior del Grupo Puno sus principales afloramientos se hallan al Oeste Suroeste del pueblo de Pomacanchi donde se observa exposiciones a lo largo del trayecto a la laguna de Yanacocha.

Sus relaciones estratigráficas solo han sido observadas en la base ya que está expuesta directamente, siendo así que sobreyace a la Formación Coñamuro. Litológicamente integra limoarcillas, limolitas, areniscas y derrames volcánicos.

4.1.1.3. Formación quechua grande.

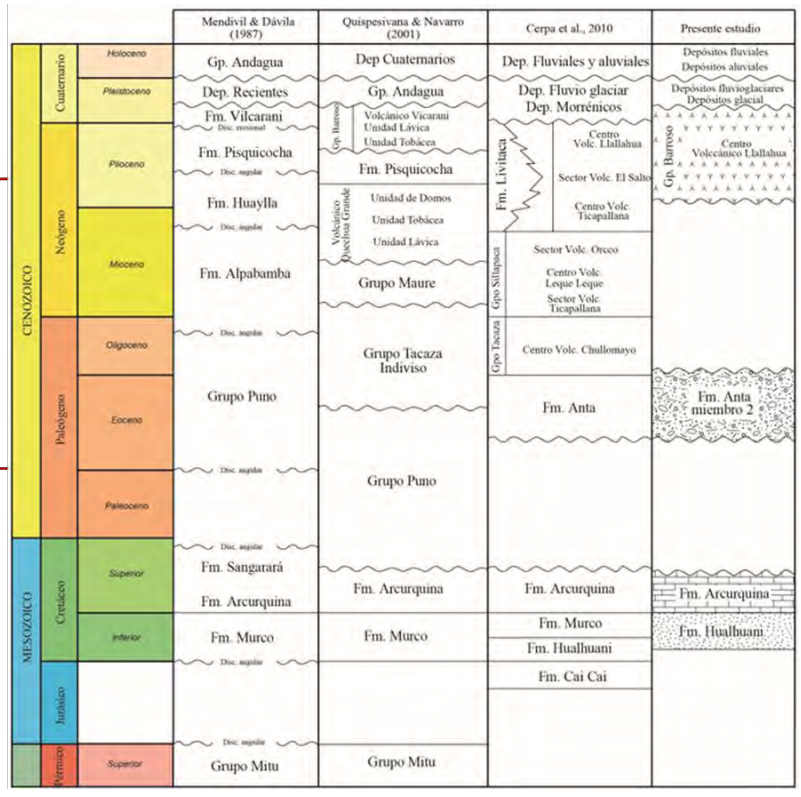
Esta formación corresponde al neógeno tardío-cuaternario temprano y está compuesta por depósitos piroclásticos generados por el vulcanismo de la Cordillera Occidental. Su litología son tobas de composición riolítica a dacítica, de color blanquecino a gris claro, con textura porosa. Su espesor es variable de unos pocos metros hasta decenas de metros.

Como se puede observar en el anexo 5, la geología de la zona a nivel regional está caracterizada por una predominancia de materiales de la Formación Quechua Grande, Grupo Tacaza y Grupo Puno.

4.1.2. Estratigrafía

Figura 29

Tabla estratigráfica.

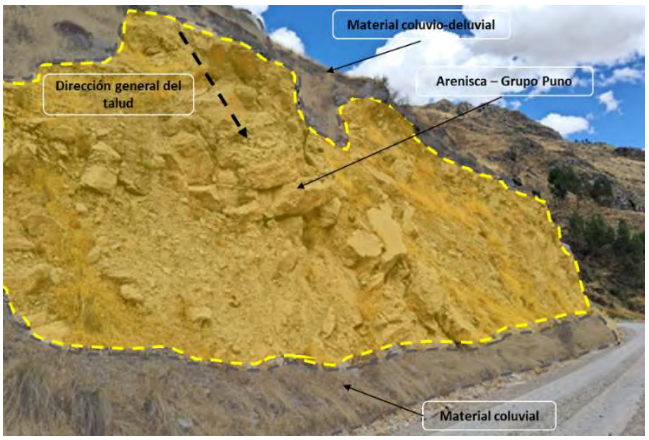


Nota. Adaptado de Geología del cuadrángulo de Livitaca, por INGEMMET 2025.

Columna litoestratigráfica donde se muestra la evolución del Cenozoico conformado por el Grupo Puno: Secuencia sedimentaria continental basal que abarca desde el Paleoceno hasta el Eoceno/Oligoceno, Grupo Tacaza: Unidad volcánica y volcanoclástica del Oligoceno-Mioceno, Volcánico Quechua Grande: Unidad compuesta por domos, tobas y lavas del Mioceno medio.

Figura 30

Caracterización geológica superficial del talud.



Nota. Se identifica la distribución de las areniscas del Grupo Puno, material coluvio-deluvial, durante la inspección visual del talud.

Figura 31

Caracterización geológica del talud.

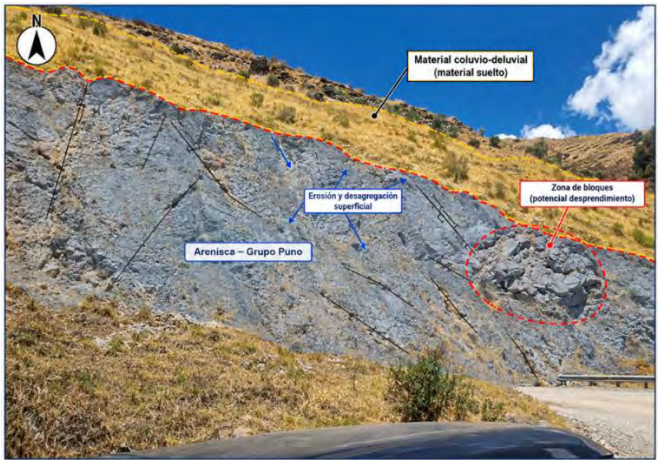


Figura 32

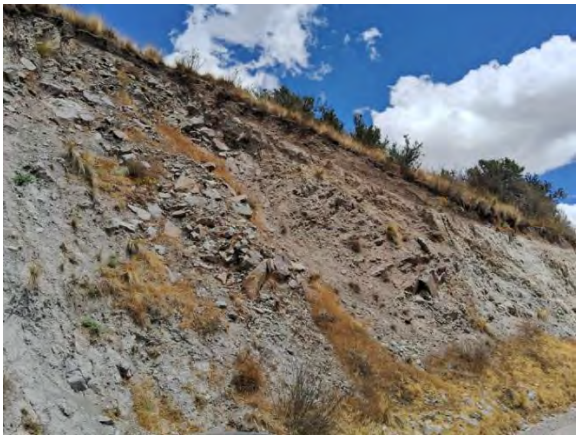
Conglomerados del Grupo Puno, progresiva 59+100.



Nota. Se observa presencia de conglomerados con clastos mayores a 1.5 cm perteneciente al Grupo Puno. Fotografía tomada durante la campaña de campo en setiembre de 2025.

Figura 33

Material coluvial con fragmentos de roca.



Nota. Se aprecia procesos de erosión por escorrentía pluvial superficial.

4.2. Marco geomorfológico

4.2.1. Unidades geomorfológicas

4.2.1.1. Complejo Volcánico (Co-v).

Presenta un relieve de origen volcánico por acumulación de lavas andesíticas a dacíticas, depósitos piroclásticos, con pendientes pronunciadas con domos de lava debido a procesos poseruptivos de erosión y remoción en masa.

4.2.1.2. Montaña en roca Volcano – Sedimentaria (RM- rvs).

Relieve montañoso que presenta pendientes mayores a 25° sobre secuencias volcano sedimentarias que incluyen tobas y niveles sedimentarios intercalados. Con crestas alineadas según la estratificación. Con ocurrencia de deslizamientos y caídas de rocas que están asociadas a los niveles de incompetencia de las tobas alteradas.

4.2.1.3. Montaña en roca sedimentaria (RM-rs).

Relieve montañoso con pendientes mayores a 25°, sobre secuencias sedimentarias estratificadas que presentan areniscas, lutitas, limolitas y conglomerados. Donde existe deslizamientos rotacionales asociados a los niveles incompetentes de lutitas intercalados con areniscas.

4.2.1.4. Vertiente con depósito de deslizamiento (V-dd).

Geoforma de ladera erosiva, originada por el movimiento de masas de roca, suelo o escombros debido a la gravedad, esta unidad corresponde a un sector de vertiente que ha sido modificado por un evento de deslizamiento que ahora alberga material depositado en el pie de la ladera. Morfológicamente es un relieve irregular.

4.2.1.5. Vertiente o piedemonte coluvio – deluvial (V-cd).

Presenta una acumulación mixta de materiales coluviales debido a la gravedad o movimientos en masa, y deluviales por escorrentía superficial, al pie de montañas en roca

sedimentaria. Así mismo, constituye un depósito heterogéneo compuesto por gravas arcillosas con arenas y limos. Siendo con pendientes moderadas que varían entre 8° y 15°. Esta unidad es susceptible a reactivación por lluvias intensas.

4.2.1.6. Terraza indiferenciada (Ti).

De nivel escalonado y origen fluvial, donde la superficie es plana a ligeramente inclinada, separada del cauce por una escarpa de 2 a 4 metros de altura con pendientes de 0° a 5°. Depósito cuaternario no consolidado de gravas y arenas.

4.2.1.7. Domo Volcánico (Do-v).

De elevación topográficas y origen volcánico, de forma semiesférica generada por extrusión lenta del magma en superficie. Morfológicamente se expresa como un relieve positivo con pendientes fuertes que varían de 20° a 35°.

Figura 34

Unidades geomorfológicas reconocidas en la zona de estudio.



Nota. Delimitación de las unidades geomorfológicas, en la margen izquierda se observa el dominio de Montaña en Roca Sedimentaria con control estructural de estratos. Las laderas bajas estas dominadas por una Vertiente coluvio – deluvial que evidencian una desestabilización natural. Tomada durante la salida de campo en setiembre de 2025.

Figura 35

Reconocimiento de las Unidades Geomorfológicas al sureste de la zona de estudio.



Nota. Vista panorámica en dirección sureste de la zona de estudio, el sector se ubica sobre una Vertiente coluvio – deluvial caracterizada por una vegetación rala.

Figura 36

Bolón en matriz de depósito coluvio-deluvial.



Nota. Se observa un fragmento de roca arenisca de aproximadamente 3 m de diámetro. Este tipo de depósito, se caracteriza por la baja cohesión y la alta susceptibilidad a la erosión y saturación durante las lluvias.

4.3. Geología estructural, geodinámica y sismicidad

4.3.1. Geología estructural

El tramo carretero Tungasuca-Livitaca, específicamente en los KM 56 y 57, se ubica dentro de las provincias de Chumbivilcas-Canas, departamento de Cusco. De acuerdo con la interpretación de imágenes satelitales, el cartografiado geológico y la información de la carta geológica nacional del INGEMMET (hoja 29s-29t), no se encontraron fallas que atraviesan directamente en los kilómetros 56 y 57 del tramo carretero.

Sin embargo, el área se encuentra influenciada por sistema de fallas activas de alcance regional y que condicionan la sismicidad de la zona.

Sistema de fallas Omacha

Este sistema se encuentra en la zona NO del cuadrángulo de Livitaca 29s y presenta una dirección NO-SE. Esta falla es inversa, en medidas tomadas en el plano de falla se han encontrado movimientos siniestrales inversos. Presenta un contacto de una sucesión de calizas de la Formación Arcurquina y una sucesión de conglomerados y volcánoclasticas de la Formación Anta.

Sistema de fallas Santo Tomás

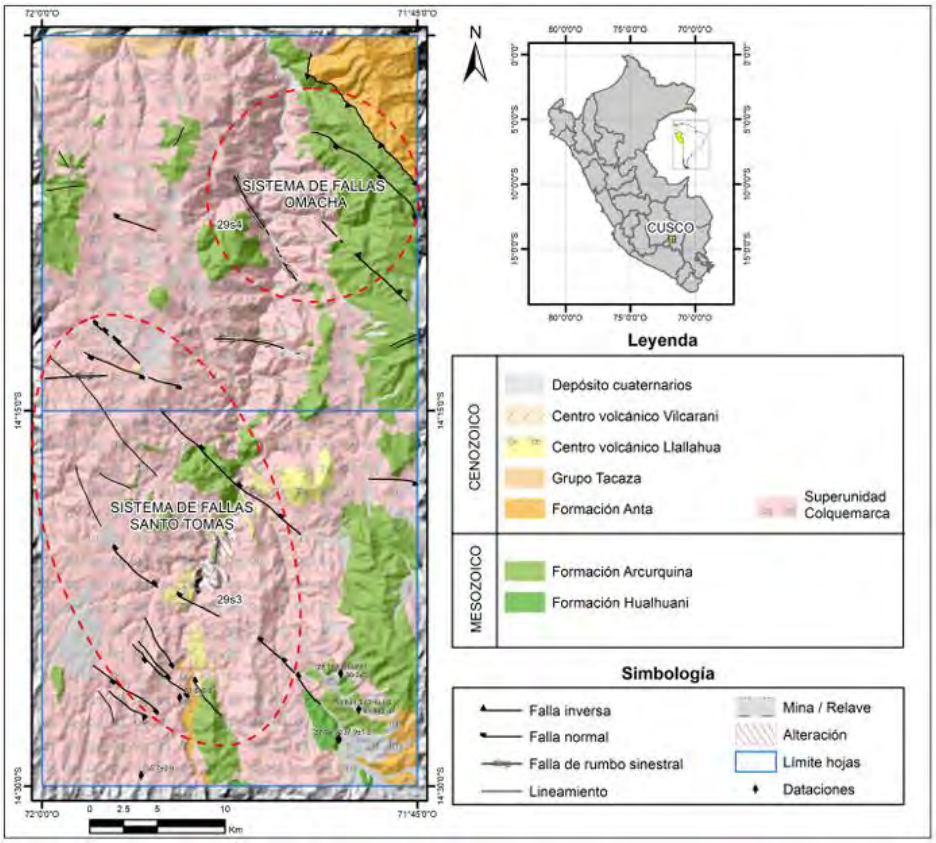
El sistema de fallas Santo Tomas se encuentra en el inferior central de la hoja 29s de Livitaca con una dirección de NO-SE y presenta evidencias de un rumbo sinestral, aunque estudios anteriores lo reportaron como una falla normal activa. En los alrededores de Paushi Pata, este sistema de fallas afecta a los intrusivos de la unidad Colquemarca.

Falla Pomacanchi

Se localiza al norte de la laguna de Pomacanchi, tiene un rumbo de N140°E y buzamiento entre 60 y 70 SO, al SE tiene un segmento de dirección NE-SO que une a otra falla de menor dimensión NO-SO. Esta falla corta abanicos aluviales conglomerádicos, por otro lado, canales aluviales resientes cruzan la falla y dos terrazas fluviales muestran evidencia de desplazamiento. Tres planos con estrías de fallas han sido medidos en la parte SE de la falla de Pomacanchi y se observa un movimiento de rumbo sinestral normal.

Figura 37

Mapa estructural del cuadrángulo de Livitaca 29s.



Nota. Adaptado de Geología del cuadrángulo de Livitaca 29s, (INGEMMET, 2025). Se muestra el sistema de fallas de Santo Tomas y el sistema de fallas Omacha.

4.3.2. Geodinámica interna

La geodinámica interna constituye el motor que prepara el terreno, los procesos tectónicos que ocurren en el interior de la corteza terrestre no solo son responsables de la formación de montañas, sino también generan fallas, plegamientos y la actividad sísmica que, en un momento dado, puede convertirse en el detonante de un deslizamiento o la causa de que un talud agrietado colapse.

El Perú se ubica sobre el borde las placas Sudamericana y de Nazca, cuya subducción produce un régimen tectónico activo que afecta tanto a la franja costera como a la región andina (Tavera & Bernal, 2005). La Norma Técnica E.030 de Diseño Sismorresistente asigna a la zona de estudio un factor de aceleración máxima horizontal.

Las sacudidas pueden degradar la resistencia del material, ya sea porque genera un aumento repentino de la presión de poros en suelos saturados o por la ruptura de puentes de roca (Kramen, 1996). En los depósitos coluvio-deluviales, un sismo puede licar parcialmente la matriz fina, mientras que en la arenisca fracturada puede soltar los bloques que ya estaban a punto de caer.

4.3.2.1. Sismicidad.

La sismicidad peruana está controlada principalmente por el proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Sin embargo, la deformación andina produce una sismicidad con eventos superficiales, generalmente a menos de 30 kilómetros de profundidad que se distribuyen a lo largo de los sistemas de fallas activas que atraviesan la cordillera Oriental (Tavera & Bernal, 2005).

Para efectos de diseño y la evaluación de taludes, la Norma Técnica E.030 de Diseño Sismorresistente divide el territorio peruano en cuatro zonas sísmicas. El área donde se ubica el

tramo carretero en estudio se clasifica dentro de la zona 2, a la que le corresponde un factor de aceleración máxima horizontal de 0.25 g, donde g representa la aceleración de la gravedad. Este valor refleja la peligrosidad sísmica regional, por ende, es el punto de partida para el análisis pseudoestático que se implementa en los modelos Slide y GEO5.

En el tramo carretero en estudio, la incorporación del análisis pseudoestático, es una exigencia derivada de la realidad sísmica de la región. Los factores de seguridad que se presentan en los resultados muestran que, bajo condiciones de carga sísmica, los taludes que aparentaban ser estables en condiciones estáticas caen por debajo del mínimo de 1.25 exigido por la Norma CE.020.

Figura 38

Zonificación sísmica del Perú según la Norma Técnica E.030.



Nota. Adaptado de Norma Técnica E.030: Diseño Sismorresistente, (Ministerio de Vivienda, Construcción y saneamiento, 2016).

El mapa de la E.030 divide el Perú en cuatro zonas. La zona 1 es la de menor peligro y la 4 de mayor peligro. La región del Cusco se encuentra en la zona 2 por lo cual nuestra área de interés estará en esta zona.

Tabla 14

Cuadro de valores de la zona sísmica para el área de estudio (Tungasuca - Livitaca).

REGIÓN	PROVINCIA	DISTRITO	ZONA	ÁMBITO
CUSCO	CANAS	CHECCA KUNTURKANKI LANGUI LAYO PAMPAMARCA QUEHUE TÚPAC AMARU YANAOCA	2	TODOS
	CHUMBIVILCAS	CAPACMARCA CHAMACA COLQUEMARCA LIVITACA	2	CUATRO DISTRITOS
		LLUSCO QUIÑOTA SANTO TOMÁS VELILLE	3	CUATRO DISTRITOS

Nota. Adaptado de Norma Técnica E.030: Diseño Sismorresistente, (Ministerio de Vivienda, Construcción y saneamiento, 2016).

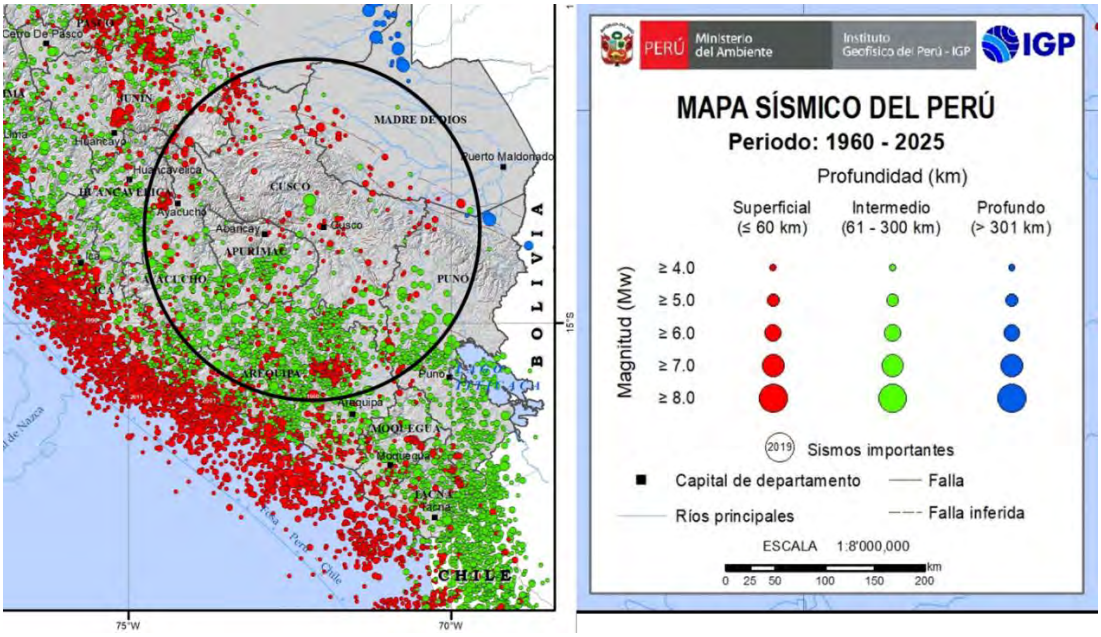
El área de estudio se encuentra en la zona sísmica 2, por lo cual la aceleración máxima a utilizar será el valor de 0.25.

Esta dinámica refleja la liberación de esfuerzos acumulados como también influye directamente en la condición mecánica de los macizos rocosos, favoreciendo la generación de discontinuidades, la reactivación de planos de debilidad y la disminución del factor de seguridad.

Es por ello que resulta esencial analizar la distribución sísmica regional, tal como se muestra en la figura.

Figura 39

Distribución sísmica en la Región del Cusco, IGP.



Nota. Adaptado del Catálogo Sísmico Nacional del Instituto Geofísico del Perú (IGP,2025).

4.3.2.2. Peligro sísmico.

La zona de estudio está caracterizada por tener una actividad sísmica baja a moderada, según registros del IGP (Instituto Geológico del Perú).

De acuerdo con la Norma Técnica E.030 de Diseño Sismorresistente, el tramo en estudio se localiza dentro de la zona 2, a la que le corresponde un factor de aceleración máxima horizontal de 0.25 g. Para trasladar esa aceleración a un modelo de estabilidad de taludes sin necesidad de un análisis dinámico complejo, se emplea el método pseudoestático. La Norma CE.020 Suelo y Taludes recomienda adoptar un coeficiente sísmico horizontal igual a la mitad de la aceleración

máxima de la zona, lo que para la zona 2 resulta en 0.125 g. esta fuerza horizontal equivalente se aplica dentro de los programas Slide y GEO5, simulando el efecto desestabilizador de un sismo.

Tabla 15

Registro de eventos sísmicos de la zona de estudio (Tungasuca - Livitaca).

Fecha UTC	Hora UTC	Latitud (º)	Longitud (º)	Profundidad (km)	Magnitud (M)
2020-07-02	02:02:40	-14.3576	-71.3631	10	3.6
2021-03-10	10:57:01	-14.3649	-71.3448	11	4.2
2022-01-13	00:06:58	-14.1468	-71.4308	15	3.6
2023-05-12	17:29:46	-14.3	-71.43	11	4.2
2023-09-13	05:02:32	-14.35	-71.45	10	4
2025-05-04	17:38:50	-14.21	-71.5	12	3.6
2025-07-30	07:22:19	-14.19	-71.46	9	3.6

Nota. Adaptado del Catálogo Sísmico Nacional del Instituto Geofísico del Perú (IGP,2025).

4.3.3. Geodinámica externa

La geodinámica externa comprende todos aquellos procesos que actúan sobre la superficie del terreno, los agentes externos como el agua, el viento, los cambios de temperatura y la gravedad, lo cuales trabajan de manera más silenciosa pero constante, desgastando, erosionando y movilizando los materiales que afloran en las laderas.

La erosión hídrica es un proceso principal, las lluvias que caen no se limitan a infiltrarse en el terreno, sino que escurre por la superficie y arrastra las partículas más finas del suelo. En los taludes excavados directamente en depósitos coluvio-deluviales, este fenómeno es particularmente agresivo, porque el material tiene una cohesión muy baja para resistir el impacto repetido de la lluvia.

La meteorización física es el segundo factor. Las variaciones térmicas entre el día y la noche, someten a la roca en suelos continuos de expansión y contracción. En las areniscas fracturadas de nuestra zona de estudio, esas tensiones térmicas agrandan progresivamente las

fisuras existentes y crean otras nuevas. En el tramo carretero estudiado, las evidencias de esta dinámica externa son visibles en cada inspección de campo, bloques de arenisca recién desprendidos, surcos en la superficie de los taludes.

4.4. Hidrología

Los datos que se presentan en esta sección provienen de registros reales recopilados durante el periodo de estudio. Se trabajó con las estaciones meteorológicas más cercanas al tramo carretero, cuyos registros diarios de precipitación cubren desde el año 1999 al 2014. Esa información, complementada con observaciones directas de campo durante la temporada de lluvias, permitió definir el escenario hidrológico que luego se incorporó en los modelos de estabilidad.

El área de estudio presenta un régimen de precipitaciones estacionales típico de zonas altoandinas, caracterizada por temporada de lluvias (noviembre – marzo), eventos de precipitación de corta duración y periodos secos prolongados. Todo ello genera condiciones de humedecimiento que afectan progresivamente la resistencia del macizo rocoso.

4.4.1. Información hidrometeorológica

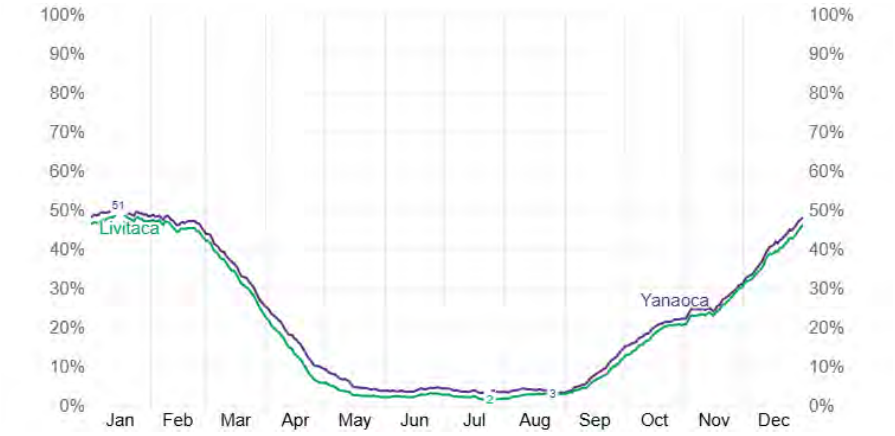
Con la finalidad de caracterizar el régimen de precipitaciones en el área de estudio, se recopiló información de las estaciones meteorológicas cercanas administradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y adicionalmente la plataforma Weather Spark. Se seleccionaron estaciones ubicadas en zonas con condiciones climáticas similares a la zona de estudio, considerando criterios de proximidad y disponibilidad de registros históricos con una antigüedad superior a 10 años, que permite evaluar las tendencias de precipitación.

4.4.1.1. Estaciones meteorológicas de Yanaoca y Livitaca.

Con el objetivo de caracterizar el comportamiento climático de la zona de estudio, se analizó la probabilidad de precipitación utilizando información climática de estaciones cercanas representativas (Yanaoca y Livitaca), la información proporcionada de los datos meteorológicos para este estudio fue de Weather Spark.

Figura 40

Probabilidad diaria de precipitación en Yanaoca y Livitaca.



Nota. Adaptado de Weather Spark (consultado en marzo del 2026).

Se observa que la mayor probabilidad de precipitación se concentra entre los meses de noviembre a marzo, lo que coincide con la temporada húmeda de la región.

En ese sentido, la evaluación de estabilidad desarrollado en la presente investigación considera condiciones asociadas a periodos de precipitación máxima, con el fin de evaluar escenarios de falla del talud.

4.4.1.2. Precipitación promedio de la zona de estudio.

Al caracterizar el régimen hidrológico del área de estudio, se analizó la información de precipitación proveniente de la estación meteorológica de Pomacanchi, la cual es la más

representativa y cercana al tramo carretero en estudio, según el registro del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

El análisis de la precipitación mensual permite identificar la distribución temporal de las lluvias a lo largo del año, lo cual es fundamental para evaluar su influencia en la estabilidad de taludes.

Tabla 16

Precipitación mensual (mm) de la estación Pomacanchi.

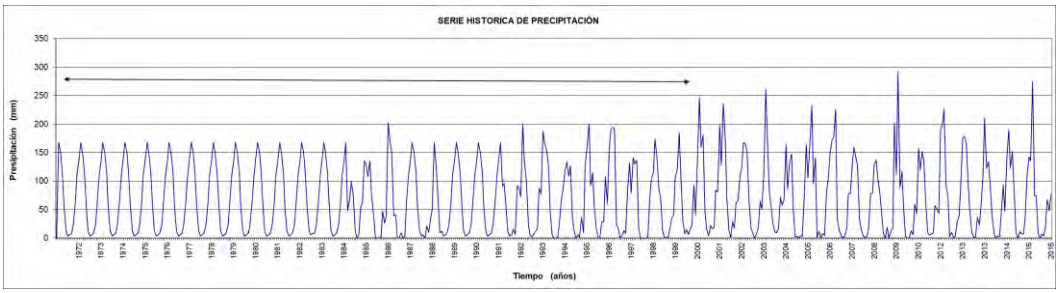
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1995	133.1	108.6	127.1	37.1	13.5	0.01	5.5	1.5	36	9	126	161.1	63.21
1996	200.5	91.6	114.7	55.6	17.1	0.01	0.01	28.8	32.3	108	79.5	155	73.59
1997	0	194	190.6	23.1	16	0	5	12.5	7.6	83.1	135.8	79.1	62.23
1998	14.1	130.3	136.8	17.5	0	0.02	0	0.02	1	72	104.5	115	49.27
1999	173.5	140.6	84.3	93.3	9.2	0.0	1.6	0.0	19.1	34.4	40.7	106.3	58.6
2000	119.2	184.2	112.0	30.6	7.5	14.8	6.0	16.1	22.5	92.3	41.3	138.1	65.4
2001	246.0	159.6	180.9	45.2	15.7	3.3	21.3	15.8	18.9	84.0	81.3	198.3	89.2
2002	128.0	236.1	174.2	69.0	13.7	0.6	27.8	17.3	62.3	65.5	108.4	121.9	85.4
2003	167.2	164.4	150.6	63.5	16.4	8.7	0.0	6.0	17.1	64.4	50.2	110.0	68.2
2004	260.9	175.4	81.5	51.2	25.4	10.2	8.9	16.9	71.5	57.2	67.2	164.0	82.5
2005	85.8	130.3	148.0	52.0	2.1	0.0	0.2	4.3	2.6	74.2	101.5	105.7	58.9
2006	163.7	232.3	95.6	140.6	1.1	11.1	0.0	7.3	4.3	80.2	101.3	149.3	82.2
2007	172.6	175.6	226.5	77.6	14.1	0.0	4.8	0.0	4.0	52.5	99.7	102.7	77.5
2008	158.6	140.8	128.3	33.7	12.9	4.4	0.0	3.1	17.0	77.9	78.3	129.5	65.4
2009	136.7	105.6	80.5	41.8	8.6	0.0	14.1	0.0	11.0	18.2	277.6	111.1	67.1
2010	292.1	88.4	116.6	53.8	2.4	0.0	0.0	12.8	5.3	58.9	42.1	156.7	69.1
2011	119.1	151.8	135.7	60.2	9.3	4.7	7.1	8.9	56.5	50.9	42.8	189.7	69.7
2012	184.7	232.7	100.4	63.9	2.6	10.2	1.1	2.9	34.9	45.0	95.5	172.6	78.9
2013	178.0	167.1	91.8	46.2	8.9	1.3	0.0	19.9	22.3	60.5	105.1	210.3	76.0
2014	131.0	124.7	94.0	39.0	7.5	0.0							66.0
TOTAL	153.2	156.7	128.5	54.7	10.2	3.5	5.4	9.2	23.5	62.5	93.6	140.9	70.4

Nota. Adaptado del Sistema de Información Meteorológica del SENAMHI.

La precipitación presenta una concentración entre los meses de noviembre a marzo, con valores máximos en enero y febrero. El promedio anual de precipitación alcanza 70.4 mm.

Figura 41

Comportamiento histórico de la precipitación en la estación meteorológica durante el periodo 1972-2016.



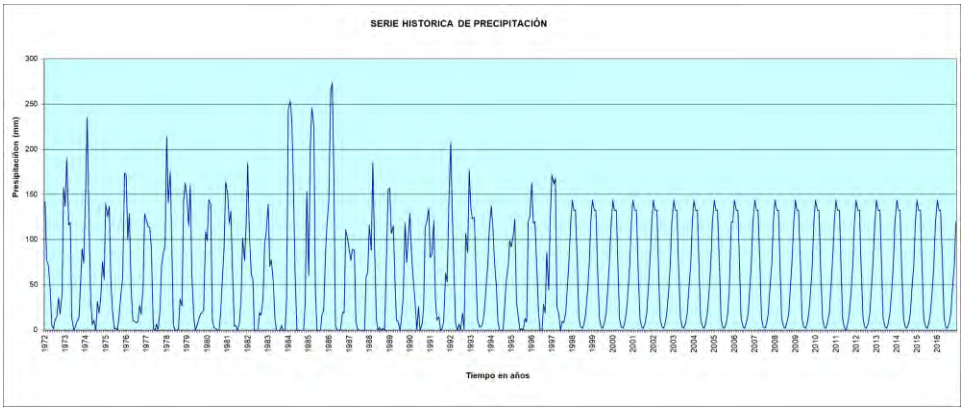
Nota. Adaptado del Sistema de Información Meteorológica del SENAMHI.

Para tener mayor conocimiento del régimen hídrico de la zona donde se ubican los taludes, se recurrió a la información pluviométrica disponible de la estación meteorológica más cerca al área de estudio. Esta estación, en su momento se localizaba en el distrito de Combapata, provincia de Canchis, y tiene una representatividad espacial para nuestra zona.

En este sentido, la figura que se presenta a continuación muestra el registro de precipitaciones representativas por año en milímetros.

Figura 42

Comportamiento histórico de la precipitación en la estación meteorológica de Combapata durante el periodo1972-2016.



4.4.1.3. Temperatura mínima de la zona de estudio.

Con el propósito de evaluar el comportamiento térmico de la zona de estudio, se realizó el promedio de las temperaturas mínimas de la estación de Pomacanchi, las cuales influyen directamente en los procesos de meteorización física del macizo rocoso.

Tabla 17

Promedio de temperaturas mínimas de la estación Pomacanchi.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1995	1.80	1.49	1.89	-0.25	-3.75	-4.38	-3.83	-2.84	-1.13	0.69	1.03	0.50	-0.75
1996	4.59	5.22	4.98	3.93	1.81	-1.95	-2.12	0.66	2.44	3.60	4.21	5.01	2.69
1997	0.00	4.66	3.84	2.67	0.19	-2.35	-1.38	0.75	3.53	5.25	5.15	6.16	2.36
1998	6.95	7.22	6.04	4.91	0.35	0.35	-0.97	1.82	2.80	5.30	5.42	5.27	3.76
1999	5.88	5.77	5.77	4.39	2.27	-1.30	-2.14	-0.55	3.03	3.90	4.08	4.98	2.99
2000	5.52	5.11	5.02	3.56	1.17	-0.53	-0.82	1.45	2.71	4.18	4.41	4.54	3.02
2001	5.42	5.64	5.56	3.56	1.59	-0.23	0.31	-0.05	3.49	4.62	5.18	5.17	3.34
2002	5.41	5.64	6.04	4.14	1.17	0.20	0.40	1.01	2.78	5.05	5.26	6.05	3.59
2003	6.34	6.38	5.86	3.86	1.48	-0.44	-0.89	1.09	2.38	3.78	4.30	5.56	3.29
2004	5.75	5.36	4.82	3.75	0.34	-0.88	-0.90	0.23	3.36	4.73	4.68	4.74	2.99
2005	5.40	5.61	5.05	2.95	-0.04	-1.67	-1.23	-0.65	2.29	4.85	4.54	5.41	2.69
2006	5.21	4.86	4.99	3.00	-1.29	-0.47	-2.36	0.81	2.17	3.99	3.97	4.26	2.41
2007	5.64	5.78	5.12	4.01	1.41	-1.80	-0.67	-0.08	2.49	3.78	3.75	4.24	2.79
2008	5.57	4.17	3.85	3.18	0.14	-1.05	-1.77	0.14	1.93	4.59	4.35	5.09	2.51
2009	5.11	5.08	4.89	3.45	0.43	-2.33	-1.98	-1.42	1.48	2.89	5.53	5.88	2.40
2010	5.95	6.04	6.14	3.86	1.85	-0.14	-1.05	-0.40	2.69	4.71	4.70	5.31	3.29
2011	5.10	5.86	5.73	4.07	0.42	-0.83	-1.03	0.00	3.33	4.35	4.65	4.94	3.03
2012	5.35	5.31	5.32	4.54	0.52	-0.80	-1.76	-1.25	1.93	4.56	5.43	6.11	2.93
2013	5.21	6.36	6.13	2.85	1.80	-0.05	-0.98	0.31	1.73	4.67	4.87	5.25	3.16
2014	5.61	5.12	5.10	3.58	1.45	-0.39							3.40
Total	3.61	3.84	3.86	2.76	0.56	-0.82	-1.03	0.01	1.87	2.95	3.17	3.56	2.02

Nota. Adaptado del Sistema de Información Meteorológica del SENAMHI. La distribución de temperaturas mínimas evidencia los valores más bajos entre junio y agosto.

4.4.1.4. Temperatura máxima de la zona de estudio.

Con el propósito de caracterizar las condiciones térmicas de la zona de estudio, se analizó los registros históricos de las temperaturas máximas de la estación meteorológica de Pomacanchi.

Tabla 18

Promedio de temperaturas máximas de la estación Pomacanchi.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1995	16.94	16.70	15.84	17.40	18.02	17.05	17.65	19.47	18.80	20.02	18.45	17.18	17.80
1996	16.00	16.24	16.77	16.61	16.71	16.12	16.44	16.41	17.89	18.13	16.94	15.97	16.69
1997	0.00	15.08	15.92	15.79	16.01	16.61	16.82	15.82	18.42	19.53	17.85	18.62	15.52
1998	18.09	18.09	17.98	18.72	18.61	16.89	17.74	18.34	19.21	18.20	18.00	17.26	18.09
1999	16.29	14.81	15.35	16.16	16.80	17.14	15.89	17.91	17.65	17.52	18.94	17.46	16.84
2000	15.55	15.19	15.34	17.06	17.55	15.93	15.80	16.91	18.32	16.78	19.28	16.54	16.68
2001	14.80	15.46	15.61	16.24	16.26	16.15	15.91	16.17	17.82	17.91	18.43	17.42	16.52
2002	17.19	15.98	16.34	15.82	16.29	15.98	14.21	16.70	17.27	17.57	17.54	16.80	16.48
2003	16.50	16.92	16.15	13.98	12.81	16.93	15.89	16.60	17.25	19.07	19.06	17.48	16.55
2004	16.12	16.48	16.74	17.03	16.55	15.21	14.99	15.54	16.66	18.11	18.67	17.56	16.64
2005	17.46	16.75	17.53	17.63	17.71	17.44	17.42	18.67	17.67	17.38	17.90	17.20	17.57
2006	15.88	16.99	16.59	16.85	16.98	16.48	16.90	17.83	18.82	18.37	17.26	17.38	17.19
2007	17.18	16.73	16.18	16.62	16.66	17.63	16.21	18.39	17.72	18.44	18.46	17.46	17.31
2008	15.33	16.36	16.08	16.73	16.71	16.93	17.30	18.71	18.82	18.42	19.38	16.80	17.29
2009	16.37	16.23	16.75	16.79	17.35	17.63	16.29	18.52	19.34	20.35	18.39	17.44	17.63
2010	16.91	17.53	17.46	18.23	17.72	18.05	17.94	18.98	19.24	18.59	19.20	16.44	18.02
2011	16.70	15.11	15.76	16.87	17.31	17.30	16.24	0.00	17.17	18.05	19.22	17.19	15.56
2012	16.32	15.54	16.45	16.23	17.04	16.37	17.21	18.25	18.49	18.84	18.57	16.34	17.14
2013	16.42	16.35	16.85	17.79	17.76	16.19	16.65	17.45	18.85	17.87	18.60	16.81	17.30
2014	16.67	16.86	17.21	17.01	16.88	18.24							17.15
Total	13.14	14.15	14.77	14.42	13.97	13.90	13.53	15.11	16.27	15.81	15.78	15.55	14.69

Nota. Adaptado del Sistema de Información Meteorológica del SENAMHI.

4.4.2. Infiltración en los taludes

La infiltración es el proceso mediante el cual las partículas de agua atraviesan la superficie del terreno. Es decir que está condicionado por la interacción entre la precipitación pluvial y las características del suelo o del macizo rocoso.

Para la investigación, la infiltración se estimará a partir del balance hídrico simplificado:

$$Im = (1-C)Pm – ETm$$

Donde: Im es infiltración mensual (mm), Pm es la precipitación mensual (mm), ETm es evapotranspiración mensual (mm) y C es el coeficiente de escorrentía.

Evapotranspiración

Con los valores de temperatura media mensual de la estación Pomacanchi se calculó la evapotranspiración potencial sin corregir (ETP), aplicando el método de Thornthwaite (1948). Posteriormente, la ETP se multiplicó por el factor de corrección correspondiente a la latitud 14° S y a cada mes, obteniendo ETm.

Tabla 19

Temperatura media mensual multianual (°C).

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1995	9.37	9.09	8.86	8.57	7.13	6.34	6.91	8.31	8.83	10.35	9.74	8.84
1996	10.29	10.73	10.88	10.27	9.26	7.08	7.16	8.53	10.16	10.86	10.57	10.49
1997	0.00	9.87	9.88	9.23	8.10	7.13	7.72	8.28	10.98	12.39	11.50	12.39
1998	12.52	12.66	12.01	11.82	9.48	8.62	8.38	10.08	11.01	11.75	11.71	11.27
1999	11.09	10.29	10.56	10.28	9.54	7.92	6.87	8.68	10.34	10.71	11.51	11.22
2000	10.53	10.15	10.18	10.31	9.36	7.70	7.49	9.18	10.52	10.48	11.85	10.54
2001	10.11	10.55	10.59	9.90	8.93	7.96	8.11	8.06	10.66	11.26	11.81	11.30
2002	11.30	10.81	11.19	9.98	8.73	8.09	7.30	8.86	10.03	11.31	11.40	11.43
2003	11.42	11.65	11.00	8.92	7.15	8.25	7.50	8.85	9.82	11.42	11.68	11.52
2004	10.94	10.92	10.78	10.39	8.45	7.17	7.05	7.89	10.01	11.42	11.68	11.15
2005	11.43	11.18	11.29	10.29	8.84	7.88	8.10	9.01	9.98	11.12	11.22	11.30
2006	10.55	10.93	10.79	9.92	7.84	8.01	7.27	9.32	10.49	11.18	10.61	10.82
2007	11.41	11.25	10.65	10.32	9.03	7.92	7.77	9.16	10.10	11.11	11.11	10.85
2008	10.45	10.27	9.97	9.96	8.42	7.94	7.76	9.42	10.38	11.50	11.86	10.95
2009	10.74	10.65	10.82	10.12	8.89	7.65	7.15	8.55	10.41	11.62	11.96	11.66
2010	11.43	11.79	11.80	11.04	9.79	8.95	8.45	9.29	10.97	11.65	11.95	10.87
2011	10.90	10.48	10.75	10.47	8.86	8.23	7.60	0.00	10.25	11.20	11.94	11.06
2012	10.84	10.43	10.88	10.38	8.78	7.78	7.73	8.50	10.21	11.70	12.00	11.22
2013	10.81	11.36	11.49	10.32	9.78	8.07	7.83	8.88	10.29	11.27	11.74	11.03
2014	11.14	10.99	11.16	10.30	9.17	8.92						
TOTAL	**10.36**	**10.80**	**10.78**	**10.14**	**8.78**	**7.88**	**7.59**	**8.36**	**10.29**	**11.28**	**11.46**	**11.05**

Nota. Adaptado del Sistema de Información Meteorológica del SENAMHI.

Para calcular la evapotranspiración mensual (Etm), según el método de Thornthwaite se debe a los siguientes pasos:

- Calcular el índice de calor mensual (i)

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514}$$

- Obtener el índice de calor anual (I)

$$I = \sum i$$

- Calcular la evapotranspiración potencial mensual

$$ET_0 = 16\left(\frac{10T}{I}\right)^{a}$$

Donde a se calcula como: $a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.792 \times 10^{-2} I + 0.49239$

- Corregir por duración real del mes y fotoperiodo

$$ET_m = ET_0 \times f$$

El factor f se obtiene de: $f = \left(\frac{N}{12}\right) \times \left(\frac{d}{30}\right)$, donde N es el número de horas del sol máximas diarias según latitud y mes, y d es el número de días del mes.

Tabla 20

Temperatura media mensual, índice térmico, ETP y ETm en Pomacanchi.

EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL CORREGIDA EN LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE NOMBRE POMACANCHI, UBICADA EN EL DISTRITO DE POMACANCHI, PROVINCIA DE ACOMAYO, DEPARTAMENTO DE CUSCO												
MÉTODO USADO: THORNTHWAITE - LATITUD DEL LUGAR: -14.0278055555556												
	ENE	**FEB**	**MAR**	**ABR**	**MAY**	**JUN**	**JUL**	**AGO**	**SET**	**OCT**	**NOV**	**DIC**
Temperatura promedio del mes	10.36	10.80	10.78	10.14	8.78	7.88	7.59	8.36	10.29	11.28	11.46	11.05
Índice térmico mensual (i)	3.01	3.21	3.20	2.92	2.34	1.99	1.88	2.18	2.98	3.43	3.51	3.32
ETP (sin corrección) (mm)	50.96	53.20	53.07	49.81	42.88	38.34	36.86	40.77	50.56	55.64	56.59	54.46
Factor de corrección*	1.11	0.98	1.05	0.98	0.99	0.94	0.98	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
ETP corregida	56.68	52.04	55.72	48.91	42.27	36.19	35.97	40.85	50.56	59.43	60.33	60.78
Índice térmico anual (I)	33.97											
Exponente "a"	1.04											

Nota. Adaptado del Sistema de Información Meteorológica del SENAMHI.

La Etm oscila entre 35.97 mm en julio y 60.78 mm en diciembre, reflejando una demanda evaporativa propia de un clima de puna, con valores máximos al inicio y al final de la temporada húmeda.

Coeficiente de escorrentía

Para estimar la fracción de precipitación que escurre superficialmente sin infiltrarse, se empleó la tabla de coeficientes de escorrentía del método racional, adoptada del Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje del MTC (2011, p.50).

Tabla 21

Coeficientes de escorrentía método racional.

COBERTURA VEGETAL	TIPO DE SUELO	PENDIENTE DEL TERRENO				
		PRONUNCIADA	ALTA	MEDIA	SUAVE	DESPRECIABLE
		> 50%	> 20%	> 5%	> 1%	< 1%
Sin vegetación	Impermeable	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60
	Semipermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Permeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
Cultivos	Impermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Semipermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Permeable	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20
Pastos, vegetación ligera	Impermeable	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45
	Semipermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Permeable	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15
Hierba, grama	Impermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Semipermeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
	Permeable	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10
Bosques, densa vegetación	Impermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Semipermeable	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25
	Permeable	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05

Nota. Adaptado del Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje, (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2011).

El tramo carretero en estudio presenta taludes con pendientes superiores al 50%, los suelos son semipermeables (coluvio-deluviales con matriz areno-limosa y bloques), y la cobertura vegetal es escasa en los cortes de los taludes asemejándose a la categoría sin vegetación. Para estas

condiciones, la tabla asigna un coeficiente C= 0.70, aunque en algunos taludes se tiene presencia de ichu y otros pastos naturales, se adoptó el valor más desfavorable como criterio conservador con el fin de que la infiltración no sea sobrevalorada.

Infiltración estimada

La precipitación mensual (Pm) corresponde al promedio del periodo 1995-2014 de la estación Pomacanchi- con esos datos, con C= 0.70 y con la ETm y calculada, se aplicó la fórmula del balance.

Tabla 22

Balance hídrico mensual e infiltración estimada.

MES	Pm (mm)	C	(1-C).Pm (mm)	Etm (mm)	Im (mm)
ENE	153.2	0.7	45.97	56.68	10.70
FEB	156.7	0.7	47.01	52.04	5.03
MAR	128.5	0.7	38.55	55.72	17.17
ABR	54.7	0.7	16.42	48.91	-12.49
MAY	10.2	0.7	3.06	42.27	-19.21
JUN	3.5	0.7	1.04	36.19	-15.15
JUL	5.4	0.7	1.63	35.97	-14.34
AGO	9.2	0.7	2.75	40.85	-18.10
SET	23.5	0.7	7.05	50.56	-23.51
OCT	62.5	0.7	18.76	59.43	-20.67
NOV	93.6	0.7	28.09	60.33	-12.25
DIC	140.9	0.7	42.26	60.78	-8.52

Nota. Adaptado del Sistema de Información Meteorológica del SENAMHI.

Los valores de Im son negativos en algunos meses, lo que indica que bajo el coeficiente de escorrentía de 0.70, la precipitación efectiva que logra infiltrarse es inferior a la demanda evaporativa. Esto no significa que no haya infiltración, sino que el agua se entra al terreno se evapora o se almacena en la zona no saturada, lo cual genera la presión de poros.

Para el modelado de estabilidad con Slide y GEO5 se asumió, por tanto, un escenario hidrológico crítico que reproduce lo observado en campo durante la temporada de lluvias. Este

criterio evita subestimar el afecto del agua en la reducción de los esfuerzos efectivos y en la pérdida de resistencia al corte que detona los deslizamientos.

Desde el punto de vista geológico, la infiltración de agua de escorrentía en los taludes del tramo carretero Tungasuca-Livitaca específicamente en los km 56 y 57, está controlada por la estratigrafía local. El depósito coluvio-deluvial, compuesto por gravas arcillosas y gravas limosas, presenta una permeabilidad moderada que permite la entrada de agua, pero el contacto con la arenisca subyacente actúa como una barrera de baja permeabilidad. Esta estratigrafía genera una condición de drenaje que favorece la acumulación de agua en el contacto litológico, elevando la presión de poros y reduciendo el esfuerzo efectivo. Este mecanismo fue confirmado en campo por la presencia de filtraciones activas en el contacto coluvial-arenisca y por la recurrencia de deslizamientos durante la temporada de lluvias (noviembre-marzo).

Los efectos mecánicos de la infiltración se manifiestan. En primer lugar, la cohesión aparente del coluvial se reduce al desaparecer la succión matricial, los valores de cohesión efectiva de 10 a 12 kPa, obtenidos en laboratorio para muestras en estado natural, descienden a valores cercanos a cero cuando el material se satura. En segundo lugar, el peso específico del material aumenta al incorporarse agua en los poros, lo cual eleva las fuerzas desestabilizadoras. En tercer lugar, el esfuerzo efectivo se reduce conforme la presión de poros aumenta. La combinación de estos tres efectos perdida de cohesión, aumento del peso específico y la reducción del esfuerzo, convierte al contacto coluvial-arenisca en el plano de debilidad preferencial donde se desarrollan las superficies de falla.

Figura 43

Evidencia de escorrentía superficial y concentración de flujo hídrico en el tramo carretero.



Nota. Se observa un talud con presencia de vegetación densa, en el fondo de la cavidad se aprecia un afloramiento de agua subterránea.

4.5. Estudio geotécnico

Con la finalidad de caracterizar el estudio geotécnico de los taludes situados en el tramo carretero Tungasuca – Livitaca. Este estudio constituye base para la evaluación de la estabilidad y el diseño de medidas preventivas de los taludes.

Se extrajeron muestras representativas de calicatas y bloques de arenisca intacta donde los taludes que presentan mayores signos de actividad morfodinámica. Las muestras se embalaron y llevados a laboratorio conservando su humedad natural.

4.5.1. Trabajos de campo

Para la elaboración de esta investigación se han realizado estudios de las estaciones geomecánicas durante diferentes salidas de campo. Así mismo, se han tomado muestras de los taludes representativos para ser analizadas en laboratorio. Estas estaciones geomecánicas se organizaron con el fin de realizar un estudio de campo de los macizos rocosos como de sus discontinuidades que permitirán un análisis sobre la estabilidad del talud.

En cuanto al reconocimiento del talud, se realizó una revisión visual de la zona de estudio, así como diversas actividades de campo durante los meses de setiembre y noviembre del 2025 y febrero del 2026, con el objetivo de comparar información geológica previa con los datos reales obtenidos en la zona.

Figura 44

Toma de datos estructurales in situ sobre talud de arenisca.



Nota. Se registra la orientación, espaciado, persistencia y apertura de fracturas. Ubicación: 8426168.38 m S y 227471.99 m E.

Para la toma de datos en las estaciones geomecánicas se realizó empleando tres instrumentos principales: una brújula, martillo geológico y un flexómetro.

La brújula es un instrumento de precisión que integra un clinómetro en su estructura, lo que permite medir el ángulo respecto a la vertical y en consecuencia determinar la dirección de buzamiento de los planos de discontinuidad. Así mismo, funciona mediante una aguja imantada que se alinea con las líneas del campo magnético terrestre.

Figura 45

Toma de datos estructurales con brújula Brunton.



La medición se realiza apoyando la brújula sobre la superficie del plano de discontinuidad, para obtener la orientación exacta de la familia estructural.

El martillo de geólogo, es una herramienta empleada para fragmentar y extraer porciones de roca del macizo rocoso. Su uso permite determinar la composición, naturaleza y mineralogía del material, así como obtener muestras de roca alterada para su posterior análisis en laboratorio.

Figura 46

Muestreo de roca arenisca fracturada con martillo geológico.



Nota. Fotografía tomada durante la salida de campo en febrero del 2026.

Con el uso de estas herramientas se procedió a analizar y registrar los parámetros fundamentales de las discontinuidades, tales como: espaciamiento, continuidad, apertura, relleno, rugosidad, entre otros. La información recopilada ha sido sistematizada en el formato de campo que se presenta a continuación:

Tabla 23

Formato de registro utilizado en campo.

| DATOS TALUD | | |

Registro de datos geomecánicos donde se integrarán los parámetros medidos.

Los datos que se tomaron en campo fueron:

- Afloramiento, con esto se procedió a medir la orientación de las discontinuidades, parámetro que queda definido por dos componentes: la dirección de buzamiento y el buzamiento. Para la obtención de estos datos, se colocó la brújula sobre una superficie rígida, en este caso se utilizó el tablero de registro como base de apoyo. La dirección del plano se midió con respecto al norte geográfico, obteniendo valores comprendidos entre 0° y 360° y el buzamiento se determinó mediante el clinómetro incorporad en la brújula cuyos valores varían de 0° a 90°.
- Espaciado, se define como la distancia existente entre dos planos de discontinuidades que pertenecen a una misma familia, medida en dirección perpendicular a dichos planos. Para determinar este parámetro en campo se empleó el flexómetro.
- Continuidad, se refiere a la extensión superficial de la discontinuidad, la cual se mide por su longitud en la dirección del plano y en el sentido del buzamiento. Estos valores se obtuvieron utilizando el flexómetro.
- Apertura, corresponde a la distancia perpendicular que separa las paredes de la discontinuidad cuando no existe material de relleno entre ellas. Estas mediciones se realizaron con flexómetro.
- Rugosidad, se emplea para abarcar tanto la ondulación de las superficies de discontinuidad como las irregularidades o rugosidades a pequeña escala presentes en los planos.

- Rellenos, este condiciona el comportamiento mecánico de la discontinuidad, por ello se reconoce y describe los aspectos relacionados con sus propiedades y estado de conservación.

Durante la toma de datos, es preciso considerar que cuando no existe material de relleno entre las paredes de una discontinuidad, la distancia perpendicular que las separa se denomina apertura.

En la tabla que se presenta a continuación, se muestran los datos recopilados en campo tras la realización de las estaciones geomecánicas en el talud previamente identificado.

Tabla 24

Parámetros de discontinuidades registrados en campo del talud para la clasificación RMR.

| DATOS TALUD N° 04 | | |

4.5.2. Trabajos de laboratorio

Los ensayos de laboratorio permiten cuantificar las propiedades físicas y mecánicas de la matriz rocosa y del suelo, las cuales definen su comportamiento mecánico. Durante el trabajo de campo, se recolectaron diversas muestras procedentes de cada uno de los taludes objeto de estudio, con la finalidad de someterlas a análisis de laboratorio que permiten determinar las características geotécnicas de los materiales.

Figura 47

Puntos de obtención de muestras en los taludes del tramo carretero Tungasuca-Livitaca.



Para el objetivo del trabajo, se decidió realizar los ensayos siguientes según sus normas:

- Granulometría, NTP 339.128
- Límites de Atterberg, NTP 339.129
- Corte directo, NTP 339.171
- Peso específico, NTP 339.143

Figura 48

Ejecución de ensayos de laboratorio para la caracterización geotécnica del material.



Nota. Se muestra el desarrollo de los ensayos de laboratorio realizados para la caracterización del material, incluyendo el cuarteo y preparación de muestras para el análisis granulométrico, determinación de los límites de Atterberg y ensayo Proctor, para la determinación de los parámetros de resistencia al corte del suelo, como la cohesión y el ángulo de fricción interna.

Tabla 25

Resultados de los ensayos de laboratorio.

TALUD	SUCS	GRANULOMETRÍA			LÍMITES DE ATTERBERG			CONTENIDO DE HUMEDAD (W%)	PESO ESPECÍFICO		CORTE DIRECTO	
		GRAVA (%)	ARENA (%)	FINO (%)	LL	LP	IP		gr/m3	KN/m3	ÁNGULO DE FRICCIÓN	COHESIÓN
TALUD N°1	SP-SM	18.58	71..78	9.64	23.35	21.48	1.87	11.81	1.94	19.4	29.97°	12.78
TALUD N°2	GP-GC	46.15	44.98	8.86	21.68	26.32	4.64	10.4	1.92	19.2	29.64°	8.09
TALUD N°3	SP-SC	39.96	54.34	5.70	23.84	19.61	4.23	10.83	1.89	18.9	30°	12.39

4.5.3. Evaluación de los taludes

En el tramo carretero Tungasuca – Livitaca, se describe y evalúa los taludes en los tramos que han sido identificados como críticos.

4.5.3.1. Talud N° 01 Tramo Km 56+500 – Km 56+700.

Las coordenadas del talud N° 01, son:

Tabla 26

Tabla de coordenadas UTM del talud N° 01.

PUNTO	ESTE	NORTE
INICIAL	227428	8426215
FINAL	227465	8426213

Este talud evaluado expone una sección de corte vial, caracterizado por una heterogeneidad litoestratigráfica. Morfológicamente presenta una fuerte pendiente natural que a la vez ha sido modificada por el trazo de la carretera lo cual genera una superficie expuesta debido a los procesos de meteorización. En la corona del talud se observa depósitos coluvio – deluviales, cuyo espesor estimado es de 3 metros donde la superficie está compuesta por fragmentos de roca inmerso en una matriz de comportamiento areno-limoso. La falta de consolidación hace que esta zona sea más débil frente a eventos de infiltración pluvial, siendo más propenso a sufrir desprendimientos.

Por debajo de la cobertura coluvio – deluvial está constituido por un estrato de areniscas, las cuales están fracturadas debido a los esfuerzos tectónicos y al efecto de los trabajos del trazo de la carretera. La base está conformada por una secuencia de pizarras, a diferencia de las areniscas esta roca metamórfica posee planos de foliación. Aunque la matriz de pizarra se encuentra en confinamiento profundo, las discontinuidades laminares planares actúan como planos potenciales de debilidad.

Figura 49

Fotografía del Talud N° 01 del tramo carretero Tungasuca - Livitaca.

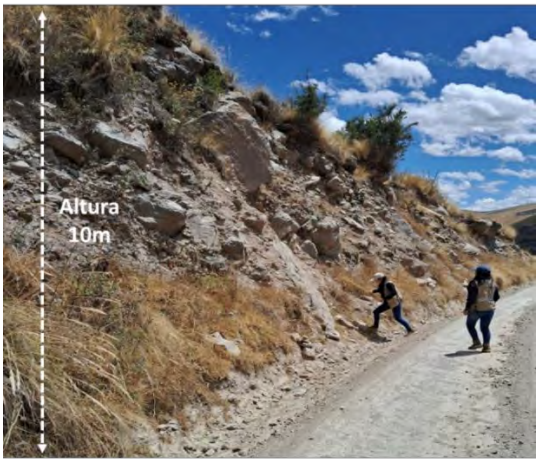


Tabla 27

Datos geométricos del talud N° 01.

DATOS GEOMÉTRICOS	
Altura del talud	10 m
Distancia horizontal	11.22 m
Pendiente del talud	50°

Para la determinación de los parámetros de resistencia, utilizamos metodologías combinadas que integra 2 fuentes de información. El programa RocData, cuyos resultados se presenta en el anexo 9, y los datos de laboratorio cuyo informe figura en el anexo 8, en base a este procedimiento se obtuvieron los datos de los diferentes materiales del talud.

Tabla 28

Propiedades del material obtenidos de ensayos de laboratorio, Talud N° 01.

PARÁMETROS	Coluvio-deluvial
Peso unitario	19 kN/m3
Cohesión	12.71 KN/m2
Angulo de fricción	30°

Tabla 29

Propiedades de los materiales (Software RocData) que componen el Talud N° 01.

PARÁMETROS	Arenisca	Pizarra
Clasificación de Hoek-Brown		
Resistencia a la compresión	35 MPa	20 MPa
GSI	48	38
mi	17	7
Factor de perturbación	0.7	0.7
Criterio de Hoek-Brown		
mb	0.97	0.23
s	0.0005	0.0001
a	0.507	0.513
Rango de la envolvente de falla		
Esfuerzo principal menor máx.	0.213	0.199
Peso unitario	23 kN/m3	24 kN/m3
Ajuste de Mohr-Coulomb		
Cohesión	0.128 Mpa	0.064 MPa
Angulo de fricción	54.56	39.60°

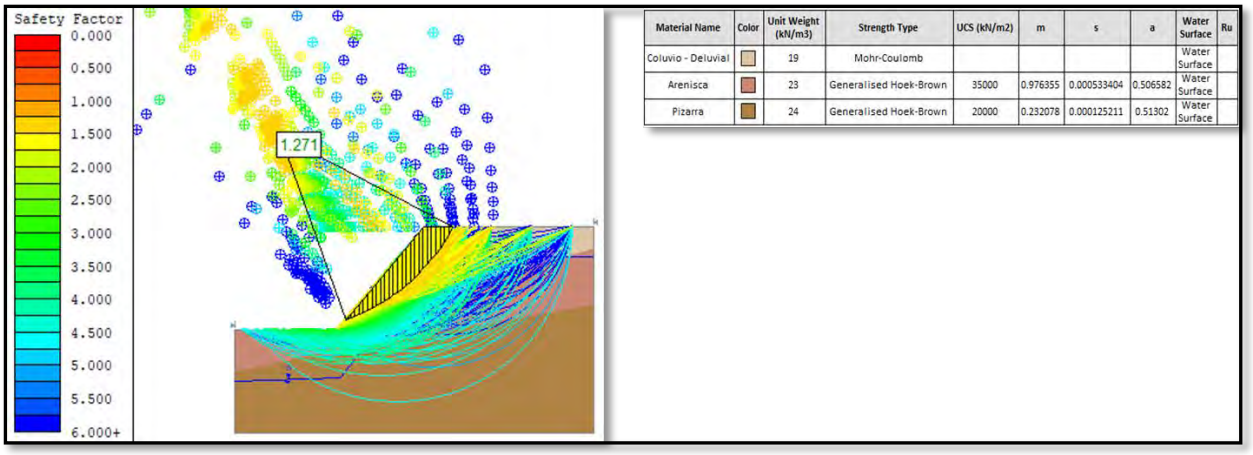
Los parámetros presentados corresponden al material coluvio-deluvial, arenisca de la parte media del talud y pizarra de la base. Los valores de cohesión y el ángulo de fricción fueron determinados a partir de ensayos de corte directo realizados sobre muestras inalteradas extraídas en campo, cuyos resultados fueron procesados y ajustados mediante el software RocData para obtener una envolvente de falla más representativa.

Evaluación para el talud N° 01 con el software Slide

Con el fin de evaluar el comportamiento del talud N°01 frente a diferentes escenarios de humedad, se realizó 2 análisis con el software Slide (Rocscience): una en condición drenada, donde las presiones de poro se han disipado completamente; y otro en condición no drenada, que considera la presión de poros ante una saturación del terreno por precipitación pluvial.

Figura 50

Modelo del Talud N° 01 en el software Slide para la condición drenada y estática.



Nota. Se muestra la geometría del talud con las superficies de falla, la estratigrafía considerada. En el cuadro se observa las propiedades de los materiales litológicos.

Tabla 30

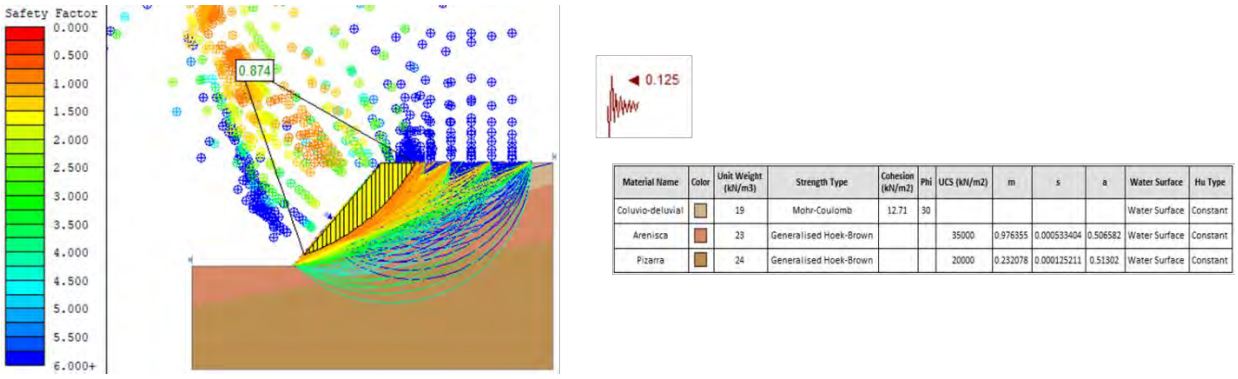
Factores de seguridad del Talud N° 01 obtenido mediante el software Slide (condición drenada-estática).

TALUD N° 01 PROGRESIVA 56+500, 56+700 (drenada-estática)			
	Método	**F.S.**	**NORMA CE.020 (mín 1.5)**
Equilibrio Límite	Bishop simplificado	1.303	INESTABLE
	Janbu simplificado	1.271	INESTABLE
	Fellenius	1.277	INESTABLE
	GLE/Morgenstern-Price	1.303	INESTABLE

Los factores de seguridad fueron calculados en Slide utilizando los métodos de Bishop simplificado, Janbu simplificado y Morgenstern-Price para la condición drenada. Los valores similares muestran la consistencia del modelo.

Figura 51

Modelo del Talud N° 01 en el software Slide para la condición no drenada-pseudoestática.



Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kN/m2)	Phi	UCS (kN/m2)	m	s	a	Water Surface	Hu Type
Coluvio-deluvial		19	Mohr-Coulomb	12.71	30					Water Surface	Constant
Arenisca		23	Generalised Hoek-Brown			35000	0.976355	0.000533404	0.506582	Water Surface	Constant
Pizarra		24	Generalised Hoek-Brown			20000	0.232078	0.000125211	0.51302	Water Surface	Constant

Nota. Se muestra la geometría del talud con las superficies de falla, la estratigrafía considerada. En el cuadro se observa las propiedades de los materiales litológicos.

Tabla 31

Factores de seguridad del Talud N° 01 obtenido mediante el software Slide (condición no drenada-pseudoestática).

TALUD N° 01 PROGRESIVA 56+500, 56+700 (no drenada-pseudoestático)			
	Método	**F.S.**	**NORMA CE.020 (mín. 1.25)**
Equilibrio Límite	Bishop simplificado	0.874	INESTABLE
	Janbu simplificado	0.857	INESTABLE
	Fellenius	0.921	INESTABLE
	GLE/Morgenstern-Price	0.874	INESTABLE

Los factores de seguridad calculados en Slide, se consideró las presiones de poros en terreno saturado por lo cual los valores obtenidos son menores a los de la condición drenada, reflejando el efecto de desestabilización que provoca el agua ante eventos de lluvias intensas.

Evaluación del talud N° 01 con el software Geo5

Con el objetivo de fortalecer la validez de los resultados obtenidos, se decidió realizar un modelo complementario del talud utilizando GEO5. Esto es fundamental para una validación

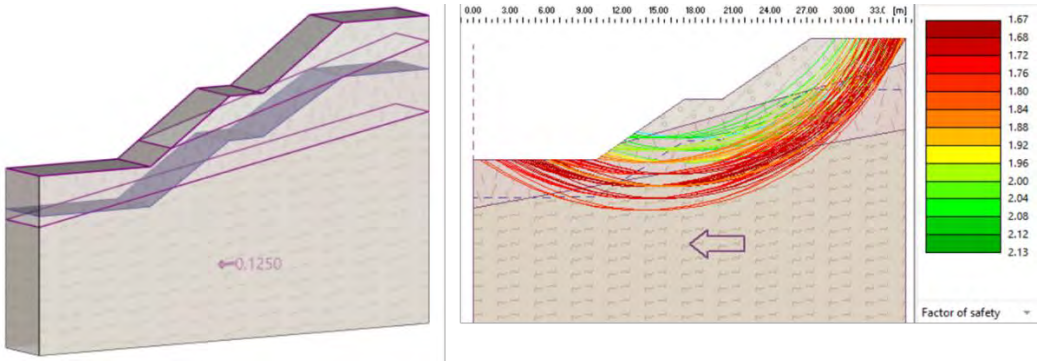
cruzada de F.S. ya que permite confirmar la consistencia de los modelos y minimizar el riesgo de errores numéricos o de interpretación.

La geometría original del corte, con una inclinación de 50° y sin bermas, fue modificada mediante el tendido del ángulo a 35° y la construcción de una banqueta intermedia de 3 m de ancho a media altura. Adicionalmente, se excavó una cuneta de coronación de 0.5 m de profundidad en la parte superior, con el fin de interceptar la escorrentía superficial antes de que alcance la cara del talud. En el pie del talud se dispusieron cunetas de drenaje para evacuar el agua que pudiera acumularse en la plataforma de la vía.

Desde el punto de vista hidrogeológico, el efecto combinado de cuneta de coronación, los subdrenes y las banquetas se traduce a un descenso del nivel freático. Para representar esta mejora en el modelo GEO5, se definió una nueva línea de saturación que se mantiene al menos 3 m por debajo de la superficie del talud; esta condición refleja el funcionamiento del sistema de drenaje durante la temporada de lluvias, en el análisis se mantuvo el coeficiente sísmico de 0.125g.

Figura 52

Modelo de estabilidad del Talud N° 01 con la solución de corrección.



Nota. Modelo de estabilidad elaborado en GEO5. Geometría corregida, nivel freático deprimido simulando el drenaje en el talud N° 01.

Tabla 32

Factores de seguridad del Talud N° 01 aplicando las soluciones en GEO5.

TALUD N° 01 PROGRESIVA 56+500, 56+700 (drenada-pseudoestático)			
	Método	**F.S.**	**NORMA CE.020 (mín. 1.25)**
Equilibrio Límite	Bishop simplificado	1.66	ESTABLE
	Janbu simplificado	1.67	ESTABLE
	Fellenius	1.44	ESTABLE
	GLE/Morgenstern-Price	1.67	ESTABLE

Como se aprecia, la combinación de la corrección geométrica y el drenaje elevó el factor de seguridad, superando el mínimo exigido de 1.25 para condiciones pseudoestáticas. Este incremento en le FS se explica por la reducción del ángulo del talud (disminuye la componente gravitacional de las fuerzas desestabilizadoras) y del abatimiento del nivel freático que eliminó las presiones de poros en la zona de falla. Los resultados validan la efectividad de la solución propuesta.

4.5.3.2. Talud N° 02 Tramo Km 56+700 – Km 56+800.

Las coordenadas del talud N° 02, son:

Tabla 33

Tabla de coordenadas UTM del talud N° 02.

PUNTO	ESTE	NORTE
INICIAL	227616	8426105
FINAL	227587	8426116

El talud N° 02 se localiza en el tramo carretero comprendido Tungasuca – Livitaca. Desde el punto de vista morfológico presenta una altura aproximada a los 12 metros, en su parte superior presenta una cubierta por pasto natural (ichu) y algunos arbustos que nos indica que el terreno natural no ha sido intervenido aparte del corte para la construcción de la carretera.

Litológicamente, el talud se compone de 3 unidades, de las cuales podemos apreciar superficialmente que, en la parte superior desde la corona hasta unos 4 metros de profundidad, aflora un suelo coluvio de textura limo-arenosa, con abundantes fragmentos angulosos de arenisca dispersos en una matriz areno limosa.

Un aspecto importante son las filtraciones de caudal muy bajo pero continuo durante épocas de lluvias, son la evidencia de un flujo que circula por el contacto litológico, saturando el suelo coluvial en su base reduciendo su resistencia al corte y sumado a la pendiente pronunciada explica los frecuentes deslizamientos de material coluvial que se observan en el tramo.

Figura 53

Fotografía del Talud N° 02 del tramo carretero Tungasuca - Livitaca.



Tabla 34

Datos geométricos del talud N° 02.

DATOS GEOMÉTRICOS	
Altura del talud	12 m
Distancia horizontal	18.30 m
Pendiente del talud	49°

Para la determinación de los parámetros de resistencia del criterio de Mohr-Coulomb y el criterio de Hoek-Brown, utilizamos metodologías combinadas que integra 2 fuentes de información. En primer lugar, se recurrió al programa RocData, cuyos resultados se presenta en el anexo 9, en segundo lugar, se utilizaron datos de laboratorio cuyo informe completo figura en el anexo 8, en base a este procedimiento se obtuvieron los datos de los diferentes materiales del talud.

Tabla 35

Propiedades del material obtenidos de ensayos de laboratorio, Talud N° 02.

PARÁMETROS	Coluvio-deluvial
Peso unitario	19 kN/m3
Cohesión	8 KN/m2
Angulo de fricción	30°

Tabla 36

Propiedades de los materiales (Software RocData) que componen el Talud N° 02.

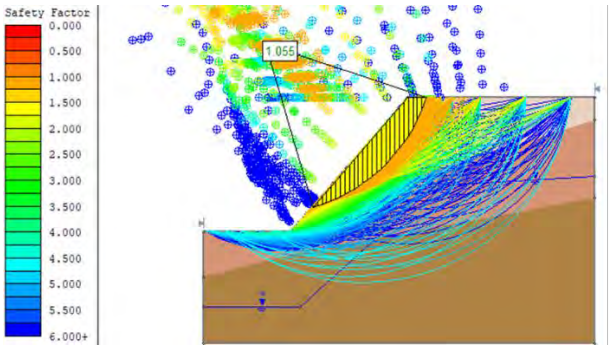
PARÁMETROS	Arenisca	Pizarra
Clasificación de Hoek-Brown		
Resistencia a la compresión	30 MPa	20 MPa
GSI	48	38
mi	17	7
Factor de perturbación	0.7	0.7
Criterio de Hoek-Brown		
mb	0.976	0.232
s	0.0005	0.0001
a	0.507	0.513
Rango de la envolvente de falla		
Esfuerzo principal menor máx.	0.213	0.235
Peso unitario	23 kN/m3	24 kN/m3
Ajuste de Mohr-Coulomb		
Cohesión	0.139 Mpa	0.070 MPa
Ángulo de fricción	53.41°	38.27°

Evaluación para el talud N° 02 con el software Slide

Con el fin de evaluar el comportamiento del talud N°02 frente a diferentes escenarios de humedad, se realizó 2 análisis con el software Slide (Rocscience): una en condición drenada, donde las presiones de poro se han disipado completamente; y otro en condición no drenada, que considera la presión de poros ante una saturación del terreno por precipitación pluvial.

Figura 54

Modelo del Talud N° 02 en el software Slide para la condición drenada-estática.



Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kN/m2)	Phi	UCS (kN/m2)	m	s	a	Water Surface	Hu Type
Coluvio-Deluvial		19	Mohr-Coulomb	8	30					Water Surface	Constant
Arenisca		27	Generalised Hoek-Brown			30000	0.976355	0.000533404	0.506582	Water Surface	Constant
Fizarra		26	Generalised Hoek-Brown			20000	0.232078	0.000125211	0.51302	Water Surface	Constant

Nota. Se muestra la geometría del talud con las superficies de falla, la estratigrafía considerada. En el cuadro se observa las propiedades de los materiales litológicos.

Tabla 37

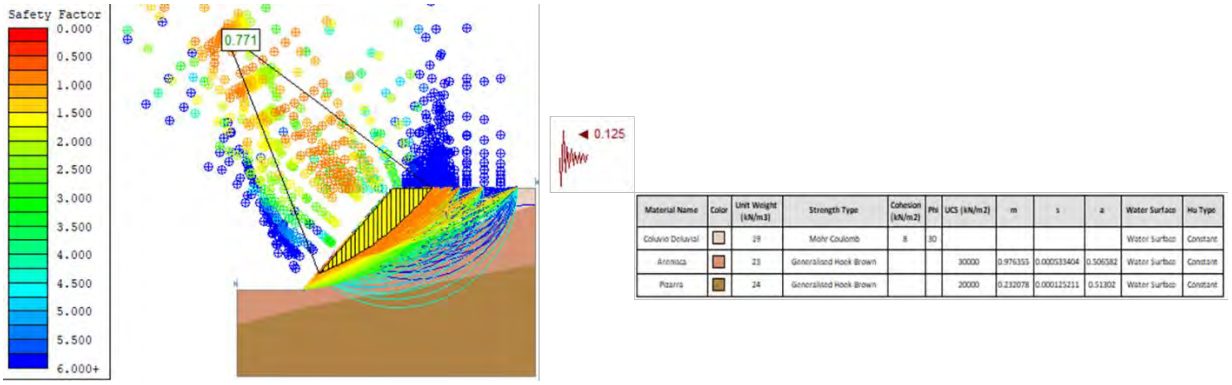
Factores de seguridad del Talud N° 02 obtenido mediante el software Slide (condición drenada-estática).

TALUD N° 02 PROGRESIVA 56+700, 56+800 (drenada-estática)			
	Método	**F.S.**	**NORMA CE.020 (mín. 1.5)**
Equilibrio Límite	Bishop simplificado	1.055	INESTABLE
	Janbu simplificado	1.001	INESTABLE
	Fellenius	1.009	INESTABLE
	GLE/Morgenstern-Price	1.047	INESTABLE

Los factores de seguridad fueron calculados en Slide utilizando los métodos de Bishop simplificado, Janbu simplificado, Fellenius y Morgenstern-Price para la condición drenada. Los valores similares muestran la consistencia del modelo.

Figura 55

Modelo del Talud N° 02 en el software Slide para la condición no drenada-pseudoestática.



Nota. Se muestra la geometría del talud con las superficies de falla, la estratigrafía considerada. En el cuadro se observa las propiedades de los materiales litológicos.

Tabla 38

Factores de seguridad del Talud N° 02 obtenido mediante el software Slide (condición no drenada-pseudoestática).

TALUD N° 02 PROGRESIVA 56+700, 56+800 (no drenada-pseudoestático)			
	Método	**F.S.**	**NORMA CE.020 (mín. 1.25)**
Equilibrio Límite	Bishop simplificado	0.771	INESTABLE
	Janbu simplificado	0.746	INESTABLE
	Fellenius	0.801	INESTABLE
	GLE/Morgenstern-Price	0.767	INESTABLE

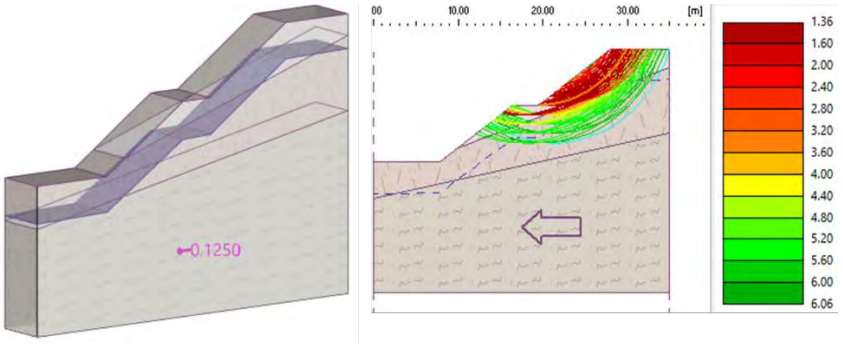
Los factores de seguridad calculados en Slide, se consideró las presiones de poros en terreno saturado por lo cual los valores obtenidos son menores a los de la condición drenada, reflejando el efecto de desestabilización que provoca el agua ante eventos de lluvias intensas.

Evaluación para el talud N° 02 con el software Geo5

La estrategia de intervención de combinar la corrección geométrica, se redujo la pendiente global de 49° a 35° y se incorporó una banqueta intermedia de 3 m de ancho a 6 m de altura, siguiendo las recomendaciones del Manual de Diseño Geométrico de Carreteras (MTC,2018) y la Norma CE.020. el control de agua se simuló deprimiendo el nivel freático al menos 2 m por debajo de la superficie del talud, representando así el efecto de los drenajes como también sobre este modelo se aplicó la carga sísmica pseudoestática con un coeficiente horizontal de 0.125g según la Norma E.030.

Figura 56

Modelo del Talud N° 02 en el software GEO5 para la condición drenada-pseudoestática.



Nota. Modelo de estabilidad elaborado en GEO5. Geometría corregida, nivel freático deprimido simulando el drenaje en el talud N° 02.

Tabla 39

Factores de seguridad del Talud N° 02 aplicando las soluciones en GEO5.

TALUD N° 02 PROGRESIVA 56+700, 56+800 (drenada-pseudoestático)			
	Método	**F.S.**	**NORMA CE.020 (mín. 1.25)**
Equilibrio Límite	Bishop simplificado	1.36	ESTABLE
	Janbu simplificado	1.35	ESTABLE
	Fellenius	1.31	ESTABLE
	GLE/Morgenstern-Price	1.36	ESTABLE

Como se aprecia, la combinación de la corrección geométrica y el drenaje elevó el factor de seguridad, superando el mínimo exigido de 1.25 para condiciones pseudoestáticas. Este incremento en le FS se explica por la reducción del ángulo del talud (disminuye la componente gravitacional de las fuerzas desestabilizadoras) y del abatimiento del nivel freático que eliminó las presiones de poros en la zona de falla. Los resultados validan la efectividad de la solución propuesta.

4.5.3.3. Talud N° 03 tramo Km 56+800 – 57+000.

Las coordenadas del talud N° 03, son:

Tabla 40

Tabla de coordenadas UTM del talud N° 03.

PUNTO	ESTE	NORTE
INICIAL	227551	8426146
FINAL	227521	8426168

En la cresta del talud se aprecia una cobertura de origen coluvio deluvial. Este depósito se caracteriza visualmente por una matriz arena-gravosa que engloba fragmentos de roca angulares de diversos tamaños. Por debajo, yace un miembro de arenisca.

Finalmente, el sustrato en base constituido por pizarras, la cual desde la perspectiva global la rigidez de este a comparación de la arenisca sería menor.

Figura 57

Fotografía del Talud N° 03 del tramo carretero Tungasuca - Livitaca.



Tabla 41

Datos geométricos del talud N° 03.

DATOS GEOMÉTRICOS	
Altura del talud	19 m
Distancia horizontal	26 m
Pendiente del talud	48°

Para la determinación de los parámetros de resistencia del criterio de Mohr-Coulomb y el criterio de Hoek-Brown, utilizamos metodologías combinadas que integra 2 fuentes de información. El programa RocData, cuyos resultados se presenta en el anexo 9, y los datos de laboratorio cuyo informe completo figura en el anexo 8.

Tabla 42

Propiedades del material obtenidos de ensayos de laboratorio, Talud N° 03.

PARÁMETROS	Coluvio-deluvial
Peso unitario	19 kN/m3
Cohesión	8 KN/m2
Angulo de fricción	30°

Tabla 43

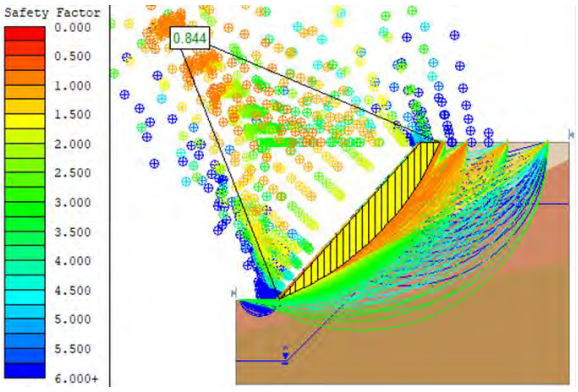
Propiedades de los materiales (Software RocData) que componen el Talud N° 03.

PARÁMETROS	Arenisca	Pizarra
Clasificación de Hoek-Brown		
Resistencia a la compresión	30 MPa	20 MPa
GSI	48	38
mi	17	7
Factor de perturbación	0.7	0.7
Criterio de Hoek-Brown		
mb	0.976	0.232
s	0.0005	0.0001
a	0.507	0.513
Rango de la envolvente de falla		
Esfuerzo principal menor máx.	0.382	0.358
Peso unitario	23 kN/m3	24 kN/m3
Ajuste de Mohr-Coulomb		
Cohesión	0.176 Mpa	0.089 MPa
Ángulo de fricción	50.36°	34.90°

Con el fin de evaluar el comportamiento del talud N°03 frente a diferentes escenarios de humedad, se realizó 2 análisis con el software Slide (Rocscience): una en condición drenada, donde las presiones de poro se han disipado y otro en condición no drenada, que considera la presión de poros ante una saturación del terreno por precipitación pluvial.

Figura 58

Modelo del Talud N° 03 en el software Slide para la condición drenada-estática.



Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kN/m2)	Phi	UCS (kN/m2)	m	s	a	Water Surface	Hu Type
Coluvio-Deluvial		19	Mohr-Coulomb	8	30					Water Surface	Constant
Arenisca		23	Generalised Hoek-Brown			30000	0.976355	0.000533404	0.506582	Water Surface	Constant
Pizarra		24	Generalised Hoek-Brown			20000	0.232078	0.000125211	0.51302	Water Surface	Constant

Nota. Se muestra la geometría del talud con las superficies de falla, la estratigrafía considerada. En el cuadro se observa las propiedades de los materiales litológicos.

Tabla 44

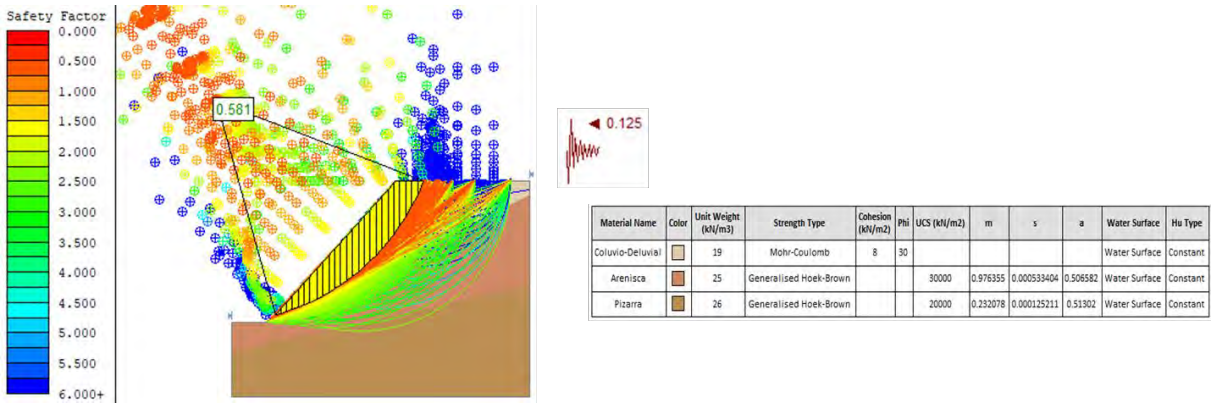
Factores de seguridad del Talud N° 03 obtenido mediante el software Slide (condición drenada-estática).

TALUD N° 03 PROGRESIVA 56+800, 57+000 (drenada-estática)			
	Método	**F.S.**	**NORMA CE.020 (mín. 1.5)**
Equilibrio Límite	Bishop simplificado	0.880	INESTABLE
	Janbu simplificado	0.839	INESTABLE
	Fellenius	0.844	INESTABLE
	GLE/Morgenstern-Price	0.874	INESTABLE

Los factores de seguridad fueron calculados en Slide utilizando los métodos de Bishop simplificado, Janbu simplificado, Fellenius y Morgenstern-Price para la condición drenada. Los valores similares muestran la consistencia del modelo.

Figura 59

Modelo del Talud N° 03 en el software Slide para la condición no drenada-pseudoestática.



Nota. Se muestra la geometría del talud con las superficies de falla, la estratigrafía considerada. En el cuadro se observa las propiedades de los materiales litológicos.

Tabla 45

Factores de seguridad del Talud N° 03 obtenido mediante el software Slide (condición no drenada-pseudoestática).

TALUD N° 03 PROGRESIVA 56+800, 57+000 (no drenada-pseudoestático)			
	Método	**F.S.**	**NORMA CE.020 (mín. 1.25)**
Equilibrio Límite	Bishop simplificado	0.541	INESTABLE
	Janbu simplificado	0.500	INESTABLE
	Fellenius	0.581	INESTABLE
	GLE/Morgenstern-Price	0.549	INESTABLE

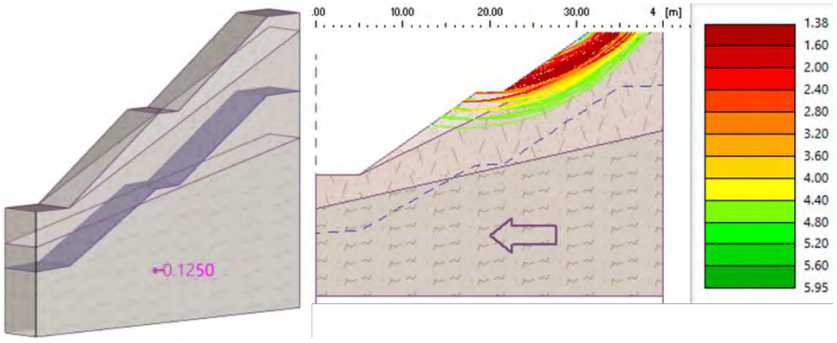
Los factores de seguridad calculados en Slide, se consideró las presiones de poros en terreno saturado por lo cual los valores obtenidos son menores a los de la condición drenada, reflejando el efecto de desestabilización que provoca el agua ante eventos de lluvias intensas.

Evaluación para el talud N° 03 con el software Geo5

Se modeló en GEO5 la solución de estabilización propuesta para el talud de 19 m de altura y 48° de inclinación. La intervención consistió en la corrección de la geometría del perfil, mediante el tendido de la pendiente a 35° y la incorporación de una banqueta intermedia de 3 m de ancho a 9.5 m de altura, complementada con un sistema de drenaje integral (cuneta de coronación y subdrenes). El análisis se realizó en condiciones pseudoestáticas, aplicando un coeficiente sísmico de 0.125g de acuerdo a la zonificación sísmica de la zona de estudio.

Figura 60

Modelo del Talud N° 03 en el software GEO5 para la condición drenada pseudoestática.



Nota. Los resultados del modelo en GEO5 confirman que la combinación de la corrección geométrica y el drenaje restablece la estabilidad del talud, incluso bajo el escenario más desfavorable de lluvias intensas y sismo.

Tabla 46

Factores de seguridad del Talud N° 03 aplicando las soluciones en GEO5.

TALUD N° 03 PROGRESIVA 56+800, 57+000 (drenada-pseudoestático)			
	Método	**F.S.**	**NORMA CE.020 (mín. 1.25)**
Equilibrio Límite	Bishop simplificado	1.38	ESTABLE
	Janbu simplificado	1.37	ESTABLE
	Fellenius	1.33	ESTABLE
	GLE/Morgenstern-Price	1.38	ESTABLE

El factor de seguridad se elevó hasta 1.38, superando el mínimo estipulado por la Norma CE.020, lo que demuestra que la intervención es técnicamente efectiva. Estos resultados validan la solución propuesta y permiten recomendar su implementación en el tramo carretero Tungasuca-Livitaca para garantizar su transitabilidad y seguridad a largo plazo.

4.5.3.4. Talud N° 04 tramo Km 57+000 – 57+100.

Las coordenadas del talud N° 04, son:

Tabla 47

Tabla de coordenadas UTM del talud N° 04.

PUNTO	ESTE	NORTE
INICIAL	227516	8426172
FINAL	227485	8426178

El talud está constituido por arenisca de color gris rosáceo a pardo claro, con un grado de meteorización moderado. Las discontinuidades presentes hacen que disminuya significativamente la resistencia del macizo. El macizo esta intensamente fracturado, con bloques de diversos tamaños.

El talud presenta una pendiente muy elevada de aproximadamente 60°. En la parte superior existe una cobertura de material coluvial y vegetación herbácea, lo que evidencia los procesos de alteración superficial y facilita la infiltración de agua durante la temporada de lluvias.

Figura 61

Fotografía del Talud N° 04 del tramo carretero Tungasuca - Livitaca.

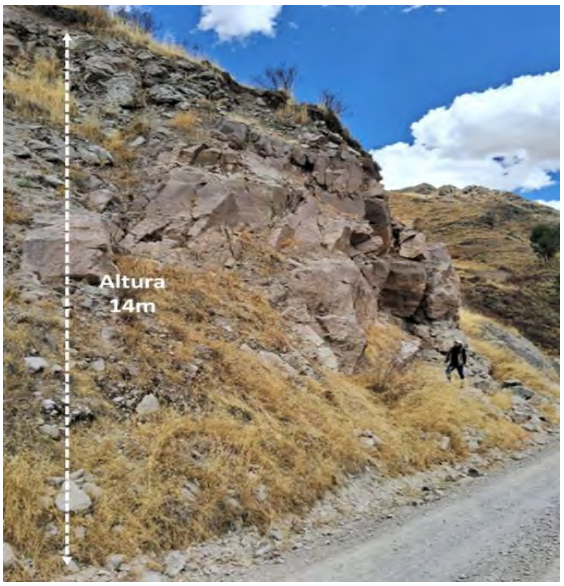


Tabla 48

Datos geométricos del talud N° 04.

DATOS GEOMÉTRICOS	
Altura del talud	14 m
Distancia horizontal	25 m
Pendiente del talud	60°

Para cuantificar el grado de fracturación del macizo rocoso, se determinó el RQD. Dado que el afloramiento de arenisca fracturada se estimó en campo a partir del número de discontinuidades por metro lineal mediante la relación de Priest y Hudson.

Tabla 49

RQD estimado mediante la relación Priest y Hudson.

RQD		
∑ (longitud en cm)	125.00	
e (longitud total/# de discont) cm	9.62	
λ(#de discont/e)	1.35	
RQD (%)	60.91	Media

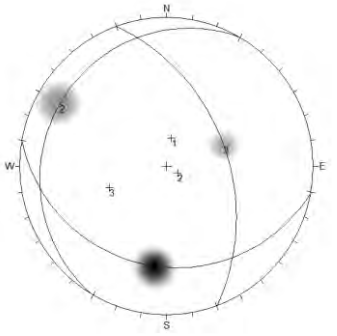
Este método es ampliamente aceptado para estimar el RQD en afloramientos cuando no se tiene perforaciones.

EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PAR AL ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRTERO TUNGASUCA-LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025	FECHA:	12/03/2026	ESTACIÓN GEOMECÁNICA N°:	EG-1
	REALIZADO POR:	BR. PARI QUISPE MILAGROS YANINA BR. USCAMAYTA ASLLA EDITH ANALY		
	PROGRESIVAS:	58+100- 58+200 KM		

GEOMETRÍA	Longitud:	20 m
	Altura:	14 m
	Dip . Dir:	7°
	Buzamiento:	68°
GEOLOGÍA	Litología:	Arenisca
	Tipo de roca:	Sedimentaria
	Tipo de estructura:	Juntas

PLANO	ORIENTACIÓN		OBSERVACIONES
	D	DD	
J-1	70°	10°	
J-2	80°	120°	
J-3	45°	250°	





Parámetros	RESISTENCIA DE LA ROCA							ÍNDICE DE CALIDAD DE LA ROCA					ESPACIADO DE LA DISCONTINUIDAD					CONDICIONES DE LA DISCONTINUIDAD																						CONDICIÓN HIDROLÓGICA					CORRECCIÓN POR ORIENTACIÓN		
	Resistencia a la compresión uniaxial (Mpa)							RQD (%)					Espaciamiento (m)					Continuidad (m)					Apertura (mm)					Rugosidad					Relleno				Alteración					Presencia de agua					Orientación de las discontinuidades		
Rangos y valores	> 250	100-250	50-100	50-25	25-5	5-1	< 1	90-100	75-90	50-75	25-50	< 25	Muy juntas	Juntas	Moderad. Juntas	Separadas	Muy separadas	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta	Ninguna	Muy cerrada	Cerrada	Moderad. Abierta	Abierta	Muy rugosa	Rugosa	Ligeram. Rugosa	Lisa	Plana	Blando		Duro		Ninguno	Inalterada	Ligeram. Alterada	Moderad. Alterada	Muy alterada	Descompuesta	Seco	Ligeram. Humedo	Húmedo	Goteado	Fluyendo	SMR	0	0
													<60mm	60 - 200mm	0.2 - 0.6m	0.6 - 2m	>2m	< 1m	1 - 3m	3 - 10m	10 - 20m	>20m	0	< 1mm	0.1 - 1 mm	1 - 5 mm	> 5mm						>5mm	<5mm	>5mm	<5mm												F3	F4
	15	12	7	4	2	1	0	20	17	13	8	3	5	8	10	15	20	8	4	2	1	0	6	5	3	1	0	6	5	3	1	0	0	2	2	4	6	6	5	3	1	0	15	Nulo	10	< 10 l/min	7	10-25l/min	4	25-125 l/min	0	>125 l/min			
valores	4							13					8					4					1					3					2				5					10							

VALOR TOTAL RMR BÁSICO = 50							
VALOR TOTAL SMR = 50							
CLASE DE MACIZO ROCOSO							
SMR	100-81	80-61	60-51	50-41	40-31	30-21	20-0	III B
DESCRIPCIÓN	I Muy buena	II Buena	IIIA Regular A	IIIB Regular B	IVA Mala A	IV Mala B	V Muy mala	REGULAR B

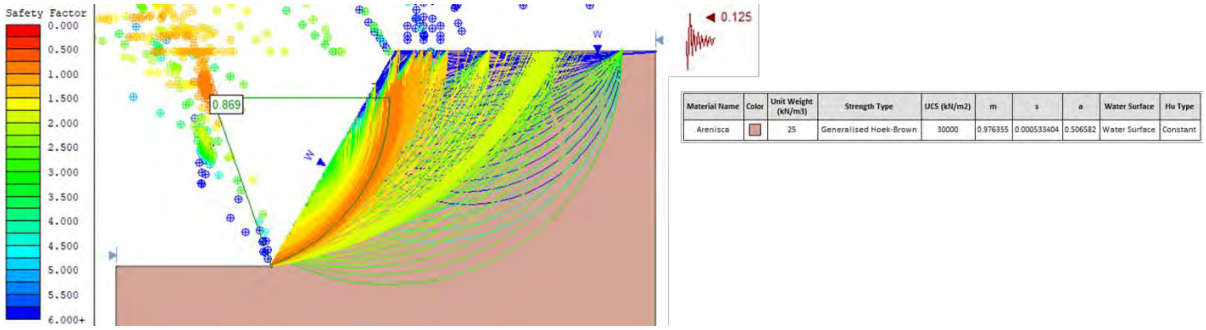
Tabla 50

Propiedades del material (Software RocData) que componen el Talud N° 04.

PARÁMETROS	Arenisca
Clasificación de Hoek-Brown	
Resistencia a la compresión	30 MPa
GSI	48
mi	17
Factor de perturbación	0.7
Criterio de Hoek-Brown	
mb	0.976
s	0.0005
a	0.507
Rango de la envolvente de falla	
Esfuerzo principal menor máx.	0.312
Peso unitario	25 kN/m3
Ajuste de Mohr-Coulomb	
Cohesión	0.157 Mpa
Ángulo de fricción	51.86°

Figura 62

Modelo del Talud N° 04 en el software Slide para la condición no drenada-pseudoestática.



Nota. Se muestra la geometría del talud con las superficies de falla. En el cuadro se observa las propiedades de los materiales litológicos.

Tabla 51

Factores de seguridad del Talud N° 04 obtenido mediante el software Slide (condición no drenada-pseudoestática).

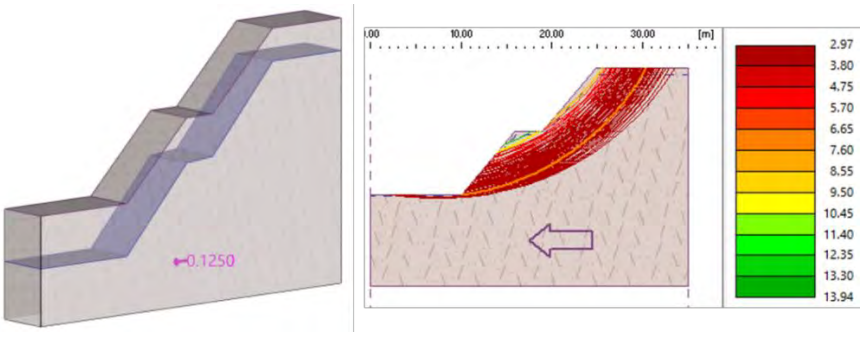
TALUD N° 04 PROGRESIVA 58+100, 58+200 (no drenada-pseudoestático)			
	Método	**F.S.**	**NORMA CE.020 (mín. 1.25)**
Equilibrio Límite	Bishop simplificado	1.037	INESTABLE
	Janbu simplificado	0.869	INESTABLE
	Fellenius	1.223	INESTABLE
	GLE/Morgenstern-Price	1.044	INESTABLE

Evaluación para el talud N° 04 con el software Geo5

Con los parámetros geomecánicos definidos de la arenisca y el escenario hidrológico crítico, se modelo el talud en GEO5 la solución de estabilización para el talud de arenisca fracturada de 14 m de altura y 60° de pendiente. La intervención consistió en la corrección de la geometría: reducción de la pendiente a 50° y construcción de banqueta de 3 m a 7 m de altura, complementada con un sistema de drenaje.

Figura 63

Modelo del Talud N° 04 en el software GEO5 para la condición drenada-pseudoestática.



Nota. Geometría corregida y nivel freática (línea azul) se deprime al menos 2 m por debajo de la superficie, simulando el sistema de drenaje. La superficie roja crítica circular (línea roja) arrojo un factor de seguridad de 2.97, muy superior al mínimo exigido por la Norma CE.020.

Tabla 52

Factores de seguridad del Talud N° 04 aplicando las soluciones en GEO5.

TALUD N° 04 PROGRESIVA 58+100, 58+200 (drenada-pseudoestático)			
	Método	**F.S.**	**NORMA CE.020 (mín. 1.25)**
Equilibrio Límite	Bishop simplificado	2.97	ESTABLE
	Janbu simplificado	3.22	ESTABLE
	Fellenius	2.91	ESTABLE
	GLE/Morgenstern-Price	3.22	ESTABLE

La intervención elevó el factor de seguridad desde un valor inferior a 1.25 en condiciones críticas hasta un valor de 3.58, superando el mínimo exigido por la CE.020. La banqueta redistribuye los esfuerzos y el drenaje elimina las presiones de poros en las fisuras, que son las principales responsables de la inestabilidad. Por lo cual se confirma la efectividad de la solución combinada para garantizar la seguridad en el tramo carretero.

4.5.4. Estudio de Soluciones

El objetivo de este punto es el análisis de las posibles soluciones destinadas a la estabilización de los taludes en el tramo carretero Tungasuca – Livitaca específicamente entre los kilómetros 56 y 57. Dicho análisis se desarrolla una vez completados los estudios geotécnicos, los cuales permiten caracterizar el comportamiento del terreno y conocer sus propiedades mecánicas, información que es fundamental para evaluar las distintas alternativas.

A partir de la información, se busca definir y establecer el conjunto de posibles soluciones o medidas correctivas, así como el cálculo del factor de seguridad y la identificación de lo más adecuado desde los puntos de vista funcional, económico y constructivo.

Las medidas correctivas pueden clasificarse en dos tipos: las activas, que intervienen directamente corrigiendo el problema de deslizamiento en los taludes; y las pasivas, que

proporcionan control y reducen las afecciones sobre los elementos dentro de la zona de influencia del desprendimiento, una vez que ya se haya producido.

De las alternativas planteadas, se analizarán sus ventajas y desventajas con el fin de seleccionar la más adecuada, aplicando un análisis de multicriterio que considere las condiciones económicas, medioambientales, técnicos y funcionales.

4.5.4.1. Condicionantes.

Dada la relevancia de la actividad económica en el entorno de la zona de estudio, específicamente para los distritos de Tungasuca y Livitaca, el adecuado funcionamiento de la carretera es de suma importancia. Así mismo, para la selección más adecuada se tendrán en cuenta los siguientes criterios:

- Económico, se evaluará tanto el costo de ejecución de cada alternativa como las potenciales pérdidas económicas asociadas a la misma.
- Técnico, se evaluará la facilidad y simplicidad de ejecución de cada alternativa, así como las dificultades particulares que se pudieran presentar durante su implementación, considerando las características geotécnicas propias de los taludes.
- Funcional, cada alternativa será valorada en función de su efectividad para resolver el problema de estabilidad, tanto a corto y largo plazo.
- Medioambiental, se considerará la afectación al entorno natural que pudiera derivarse de la ejecución de cada solución, como también el posible impacto en el futuro que dichas alternativas puede generar sobre el paisaje.

Con base a estos criterios, se seleccionará la opción más optima entre todas, comparando las soluciones mediante una matriz de decisión. A cada solución se le asignara una puntuación

numérica del 0 al 5 donde 0 representa el incumplimiento total del criterio y 5 como el cumplimiento óptimo del mismo.

4.5.4.2. Alternativas.

a) No realizar ninguna acción de estabilización

Es necesario evaluar si la ausencia de intervención frente al problema de inestabilidad podría constituir una solución de compromiso aceptable, en función de los criterios ya mencionados.

VENTAJAS:

- El costo económico sería nulo.
- No se generarían impactos ambientales derivados de la ejecución de obras, preservando el entorno natural de la zona de estudio.
- No se interrumpirá la actividad económica de las canteras ubicadas en Livitaca y Yanaoca.

DESVENTAJAS

- En caso de producirse un deslizamiento de talud, las consecuencias económicas y humanas podrían ser significativamente elevadas.

La zona en donde se desarrolla la investigación se caracteriza por presentar un alto riesgo de deslizamientos y caída de roca. Desde el punto de vista económico, un eventual desprendimiento supondría un problema debido a que no solo implicaría asumir los costos de limpieza del tramo carretero, sino también hacer frente a las pérdidas económicas derivadas de la paralización de las actividades de canteras situadas alrededores de la zona. Funcionalmente, esta alternativa carece de justificación, puesto que, si se produjera un desprendimiento y se retirara el

material, el talud buscaría naturalmente a buscar un nuevo equilibrio, lo que generaría nuevos deslizamientos o desprendimientos.

La valoración de esta alternativa es:

Tabla 53

Valoración multicriterio de No realizar ninguna acción.

Criterio	Valoración	Observaciones
Económico	2	Las pérdidas son altas si falla el talud
Medioambiental	5	No hay acción
Técnico	0	No hay acción
Funcional	0	No hay acción

La puntuación se asigna en una escala del 0 al 5. El valor de 5 en el criterio medioambiental refleja la usencia de impacto ambiental. El valor de 2 en el criterio económico reconoce el ahorro inmediato, pero advierte de las elevadas pérdidas en caso falle el talud.

b) Modificar la geometría del talud

Es una solución viable frente al problema de inestabilidad existente, considerando los criterios técnico, funcional, económico y medioambiental.

VENTAJAS

- Económicamente accesible, los trabajos de corte de talud pueden ejecutarse con maquinaria convencional disponible en las provincias de Canas y Chumbivilcas.
- A diferencia de otras soluciones como mallas, bulones o muros de contención, esta alternativa no depende de materiales industriales ni de elementos de fijación, lo que simplifica la ejecución.

DESVENTAJAS

- Para reducir la pendiente del talud, se requiere excavar y retirar un volumen considerable de material, lo que implica un costo económico considerable.
- Riesgo de desencadenar nuevos deslizamientos durante el corte, al intervenir el talud, se genera una condición de inestabilidad temporal. Durante la ejecución del corte puede haber deslizamientos poniendo en riesgo al personal y a la maquinaria.
- El corte del talud implica la remoción de cobertura vegetal, alterando la morfología del terreno, generando polvo, emisiones de maquinaria y un impacto acústico.

La zona de estudio, presenta un alto riesgo de deslizamientos frecuentes de material coluvial y caída de rocas, debido a la naturaleza de los materiales. La modificación de la geometría del talud mediante corte resulta viable para corregir la pendiente existente.

La valoración de esta alternativa es:

Tabla 54

Valoración multicriterio de la alternativa Corrección de la geometría del talud.

Criterio	Valoración	Observaciones
Económico	3	Requiere inversión en maquinaria y movimiento de tierra
Medioambiental	2	Impacto por remoción de cobertura vegetal
Técnico	4	Reduce efectivamente la pendiente del talud
Funcional	3	Mejora la estabilidad a largo plazo

La corrección de la geometría mediante corte obtiene una valoración técnica de 4 por su efectividad en la reducción de la pendiente, lo que disminuye significativamente los deslizamientos y caídas de rocas. El valor de 3 en el criterio de funcionalidad responde a la necesidad de cortes temporales de la vía durante la ejecución, afectando el tránsito. El valor de 3 en el criterio

económico refleja una inversión inicial esta queda justificada frente a las perdidas por eventos de inestabilidad. El valor de 2 del criterio medioambiental reconoce los impactos medioambientales reconoce los impactos inevitables asociados a la excavación y movimiento de tierras.

c) Muros de contención

Esta solución constituye una solución viable de inestabilidad existente en la zona.

VENTAJAS

- La construcción de muros no interviene directamente en el macizo rocoso, lo que evita generar inestabilidades temporales durante la ejecución.
- Construir un muro demanda menos tiempo que corregir la geometría del talud mediante corte y retiro de volúmenes de material.
- Mitiga el problema, funcionando como un elemento de seguridad para la carretera y los usuarios.

DESVENTAJAS

- Requiere un control y mantenimiento exhaustivo, caso contrario pierde efectividad como método de contención.
- No resuelve de raíz la inestabilidad, el muro actúa sobre las consecuencias, pero no elimina las fuerzas desestabilizadoras, por lo que los deslizamientos seguirán produciéndose y el muro terminará colapsando por acumulación de esfuerzos.
- Si no se diseña adecuadamente, un muro puede obstruir el flujo natural de agua superficial, aumentado la presión de poros.
- Impacto visual, cualquier muro representa una modificación del entorno natural y requiere terreno adicional en el pie del talud en algunos tramos de carretera.

En la zona de estudio, si bien el muro de contención ofrece ventajas como su menor tiempo de ejecución y su capacidad de mitigación, los inconvenientes de que requiere de un control exhaustivo y mantenimiento constante y el alto riesgo de colapso por acumulación de esfuerzos durante temporadas de lluvia, hacen que esta alternativa no sea las más adecuada para la zona.

La valoración de esta alternativa es:

Tabla 55

Valoración multicriterio de la alternativa Muros de contención.

Criterio	Valoración	Observaciones
Económico	2	Costos de mantenimiento constantes
Medioambiental	3	Impacto paisajístico parcialmente mitigable
Técnico	1	No es factible técnicamente debido a la profundidad de la superficie de falla
Funcional	2	Mitiga temporalmente el problema

La alternativa de muros de contención obtiene una valoración técnica muy baja de 1 debido a que la profundidad de falla hace inviable la cimentación adecuada. El valor de 2 en el criterio de funcionalidad y económico refleja que, si bien puede mitigar temporalmente el problema, no lo resuelve de raíz y genera costos de mantenimiento continuos.

d) Drenajes

Se debe estudiar si la implementación de un sistema de drenaje constituye una solución viable para el problema de inestabilidad existente en la zona de estudio.

VENTAJAS

- Ataca la causa principal de la inestabilidad que están directamente relacionados con la infiltración de agua de lluvia.
- Al combinar la corrección de la geometría del talud con un sistema de drenaje se obtiene una solución integral.
- La instalación de drenajes aumenta significativamente el factor de seguridad del talud al reducir la presión de poros.
- Bajo impacto ambiental, ya que pueden integrarse en el entorno natural.
- Larga vida útil con bajo mantenimiento.

DESVENTAJAS

- No resuelve por sí solo el problema de estabilidad.
- Para que el sistema mantenga su efectividad, es necesario realizar limpiezas periódicas de zanjas, canales y subdrenes, antes y después de la temporada de lluvias.

Esta solución conjunta con la corrección de la geometría del talud, aprovecha la eficacia estructural del corte y la capacidad de drenaje para mantener el terreno en condiciones humedad.

La valoración de esta alternativa es:

Tabla 56

Valoración multicriterio de la alternativa Drenajes

Criterio	Valoración	Observaciones
Económico	4	Inversión moderada, con alta relación costo beneficio
Medioambiental	3	Impacto por excavación del corte y construcción de drenajes
Técnico	5	Solución integral: corrección de la geometría y drenajes
Funcional	4	Mejora significativamente la estabilidad a largo plazo

El valor de 4 en el criterio económico refleja una inversión justificada con alta relación costo-beneficio. El valor de 3 en el criterio medioambiental reconoce los impactos de la excavación, pero se valora la integración paisajística de las obras. El valor de 4 en funcionalidad responde a la necesidad de cortes temporales de la vía durante la ejecución.

e) Elementos estructurales resistentes

Se debe estudiar la instalación de elementos estructurales resistentes puede constituir una solución viable para el problema de inestabilidad existente en la zona de estudio.

Para aumentar el coeficiente de seguridad de un talud se debe disminuir las fuerzas desestabilizadoras que tienden a provocar la falla. El peso de la propia masa deslizante es la más importante de las fuerzas, entre estos elementos constructivos se encuentran:

- Pilotes de hormigón, elementos verticales que se introducen en el terreno para transmitir las cargas a capas más profundas y resistentes.
- Anclajes metálicos, elementos que trabajan a tracción, constituidos por armaduras metálicas alojadas en perforaciones realizadas en el terreno, que se sujetan o anclan por medio de inyecciones o dispositivos mecánicos expansivos.

VENTAJAS

- Es el medio más efectivo para aplicar grandes esfuerzos a un talud de forma exacta y precisa, especialmente en roca competente.
- A la hora de su colocación no se necesitaría mucha maquinaria pesada. Es una alternativa rápida, con ahorro energético y menor afectación temporal a la carretera.

DESVENTAJAS

- Los anclases necesitan de equipos de perforación y personal técnico calificado.
- Gran impacto ambiental, se actúa directamente sobre el talud mediante perforaciones, lo que genera impacto visual.
- Requiere control y mantenimiento a largo plazo para asegurar que las tensiones transmitidas al terreno se mantienen en el tiempo. Esto añade costos de instrumentación y seguimiento.
- Perdida de agarre con el tiempo, cuando la parte de la roca donde se ancla el elemento se deteriora por meteorización o por ciclos de humedad, el anclaje pierde efectividad.

Los anclajes y pilotes pueden ofrecer ventajas como su actuación localizada y su rapidez en su ejecución, los inconvenientes asociados a su elevado costo, necesidad de personal y maquinarias especializadas hacen que esta alternativa no sea las más adecuada como solución principal para la estabilización de taludes en nuestra zona de estudio.

La valoración de esta alternativa es:

Tabla 57

Valoración multicriterio de la alternativa Elementos estructurales resistentes

Criterio	Valoración	Observaciones
Económico	1	Costo muy elevado por maquinaria especializada
Medioambiental	2	Impacto directo por perforaciones, introducción de elementos metálicos y hormigón
Técnico	2	Factible técnicamente, pero con limitaciones
Funcional	3	Efectivo para estabilizar bloques concretos a corto plazo

4.5.4.3. Solución adoptada.

Después de asignarle valores a cada alternativa de solución para la inestabilidad de los taludes en el tramo carretero Tungasuca – Livitaca. En la siguiente tabla se ha resumido las valoraciones que obtuvo cada alternativa.

Tabla 58

Valoración multicriterio de las alternativas de estabilización para los taludes del tramo carretero Tungasuca - Livitaca.

Criterio	Valoración				
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5
Económico	2	3	2	4	1
Medioambiental	5	2	3	3	2
Técnico	0	4	1	5	2
Funcional	0	3	2	4	3
Total	**7**	**12**	**8**	**16**	**8**

La puntuación total corresponde a la suma de los 5 criterios. Los valores se han asignado con base en las condiciones específicas de campo. Durante los recorridos de campo realizados en el tramo carretero Tungasuca – Livitaca, se pudo constatar un aspecto fundamental que condiciona la inestabilidad de los taludes, la acción del agua producto de las precipitaciones que se infiltra a través de las fisuras de la arenisca y contribuye a la degradación del suelo coluvial.

Por otro lado, la geometría actual de los taludes presenta una pendiente muy elevada, lo que explica la recurrencia de deslizamientos del material coluvial y caída de rocas. Si se instalaran únicamente sistemas de drenaje sin modificar la inclinación, los taludes mantendrían un alto potencial de rotura. De igual manera, si solo se efectuara una corrección de la geometría del talud sin gestionar el flujo hídrico, la infiltración continuaría afectando la resistencia del macizo a largo plazo. Por ello, la solución más viable y coherente consiste en aplicar conjuntamente ambos

factores: la corrección de la geometría del talud para reducir las fuerzas desestabilizadoras y el drenaje para impedir la acumulación de agua.

Tras el análisis multicriterio realizado y la evaluación de las distintas alternativas, se concluye que la medida más adecuada para estabilizar los taludes del tramo carretero Tungasuca – Livitaca específicamente de los km 56 y 57 consiste en combinar la corrección de la geometría del talud mediante el rebaje de pendientes con la implementación de un sistema de drenaje. La decisión se ha tomado sobre la base de la evidencia recopilada durante el trabajo de campo, considerando además la necesidad de no interrumpir prolongadamente el tránsito vehicular. Por todo ello, se adopta esta alternativa como la solución técnica y funcionalmente más viable para la zona de estudio.

4.5.4.4. Desarrollo de la alternativa adoptada.

Durante los trabajos de campo realizados entre los meses de setiembre del 2025 a febrero del 2026 se identificó que los deslizamientos de material coluvial y las caídas de bloques de arenisca responden a una doble causa. Por un lado, la pendiente media del talud que es superior al ángulo de reposo. Por otro lado, las precipitaciones registradas en las estaciones más cercanas a la zona de estudio que generan una infiltración a través de las discontinuidades de la roca y de los poros del suelo, reducen la resistencia efectiva del terreno.

La corrección de la geometría mediante corte permite rebajar la pendiente hasta un ángulo de reposo adecuado 35° - 38°, valor que fue verificado mediante el análisis de estabilidad con el método de Bishop en el software Slide y GEO5. El rebajo de la pendiente disminuye las fuerzas tangenciales actuantes y eleva el factor de seguridad por encima de 1.25, tal como exige la norma peruana CE.020 de igual manera el sistema de drenaje evita la acumulación de escorrentía superficial, impidiendo que se generen presiones de poro.

Al corte del talud se ejecutará, respetando las siguientes directrices:

- Banqueo, se dispondrán bermas intermedias de 3 m de ancho cada media altura del talud, con el propósito de interrumpir la continuidad de la pendiente.
- Inclinación del talud, se proyecta una relación altura: base de 1:1.4, equivalente a un ángulo aproximado a 35°, medido desde la horizontal. Este ángulo se determinó a partir de ensayos de corte directo en muestras de suelo coluvial y arenisca meteorizada, que arrojaron una cohesión efectiva de 15 kPa a 65 kPa y un ángulo de fricción de 27° a 30° según la profundidad.

El sistema de drenaje como un componente del corte del talud, se empleará con los siguientes elementos:

- Zanja de coronación, se construirá una cuneta en la parte superior del talud, con la función de interceptar las aguas que escurren desde la ladera natural por encima del corte, desviándolas a cauces naturales sin que penetren el macizo.
- Cuneta de pie, al borde la calzada se ejecutará una cuneta de 0.80 m de ancho por 0.60 m de profundidad, que recibirá todas las descargas de los canales superiores y del escurrimiento directo.

La alternativa adoptada no requiere de mantenimiento intensivo si se ejecuta correctamente. No obstante, se recomienda efectuar inspecciones semestrales durante los primeros años y luego realizarlos de manera anual, con el objetivo de limpiar sedimentos acumulados en las cunetas.

CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en los cuatro taludes evaluados permiten trazar un hilo conductor entre el mecanismo desencadenante de la inestabilidad y la efectividad de las soluciones propuestas, de acuerdo a los antecedentes que enmarcan esta investigación.

En primer lugar, el papel de la lluvia como detonante principal de la inestabilidad de los taludes quedó evidenciado en todos los modelos que en el que se consideró un nivel freático elevado o condiciones de saturación. Al simular la condición crítica de saturación cercana a la superficie, tanto en los taludes de suelo coluvio-deluvial como en las discontinuidades de arenisca fracturada, los factores de seguridad disminuyeron por debajo de los valores mínimos establecidos por la Norma CE.020. Este comportamiento confirma lo descrito por Wu et al. (2025), quienes explican con claridad como la infiltración de la lluvia genera una zona de saturación, elevando las presiones de poros hasta que se forma una superficie de deslizamiento. Este fenómeno fue notorio en los taludes donde se presenta el depósito coluvial. Esta situación es similar al estudio de Ocón (2015) en la carretera Hualgayoc-Apan Alto (Cajamarca), donde las precipitaciones intensas y la saturación de los depósitos coluviales fueron los detonantes principales de la inestabilidad de los taludes. Esta coincidencia es relevante porque valida la hipótesis planteada en el presente estudio sobre el rol de la infiltración de agua de lluvia como factor desencadente de la inestabilidad, y sugiere que este mecanismo es recurrente en la sierra peruana.

La caracterización geomecánica basada en la determinación del RMR, GSI, RQD y los parámetros de Hoek-Brown, fue determinante para los modelos numéricos con datos representativos. Tanto Cevallos (2023) en Ecuador como Cuentas (2024) en Puno emplearon un enfoque metodológico similar, combinando la clasificación de macizo rocoso con el análisis cinemático y el cálculo del factor de seguridad mediante el método de equilibrio límite. Esta

coincidencia metodológica valida el enfoque adoptado en el presente estudio. Nuestro estudio complementa los resultados obtenidos mediante los softwares Slide y GEO5 para verificar las superficies de fallas críticas y los factores de seguridad eran coherentes entre ambos programas, lo que valida la elección de las herramientas complementarias.

En cuanto a la solución de estabilización, los cuatro taludes intervenidos con corrección geométrica y drenaje mostraron incrementos notables en el factor de seguridad. En los taludes de suelo coluvio-deluvial, la reducción de la pendiente y la construcción de bermas lograron elevar el FS por encima de 1.25 en condiciones pseudoestáticas, cumpliendo con la exigencia de la Norma CE.020. Este hallazgo es consistente con el estudio de Sackschewski (2017) en la carretera Canta-Huayllat, donde la reconformación geométrica combinada con el control de filtraciones permitió estabilizar cortes viales que originalmente presentaban problemas. En nuestro caso, la depresión de nivel freático simulada en los modelos equivalente al efecto de las cunetas de coronación y los subdrenes propuestos, resulto clave para eliminar las presiones de poros en la zona de falla. Esta misma lógica fue aplicada por Cuentas (2024), quien recomendó el descabezamiento del talud y la construcción de cunetas para deprimir el nivel freático y elevar el FS por ecima de 1.5.

En el talud de arenisca fracturada, la combinación geometría más tendida y un drenaje eficiente produjo un factor de seguridad alto incluso bajo cargas sismicas. Si bien este valor supera el mínimo normativo, se interpreta como resultados favorables en una roca competente. Cevallos (2023), trabajo sobre lutitas y lodolitas de menor calidad y obtuvo FS infeiores a 1.0 y propuso igualmente la reducción de la pendiente como medida correctiva. En ese sentido nuestro resultado confirma que para macizos de buena calidad, la corrección geométrica es una solución efectiva.

CONCLUSIONES

1. Se determinó que la estabilidad de los taludes del tramo carretero Tungasuca – Livitaca esta directamente ligada a la caracterización geotécnica de los materiales presentes y a su identificación de los factores que condicionan la inestabilidad. Todo el proceso desarrollado desde los ensayos de campo y laboratorio hasta el modelado numérico en Slide y GEO5, demostró que solo partiendo de un conocimiento sólido del terreno es posible proponer medidas de mitigación que sean técnicamente viables.
2. Se confirmó que las características geológicas y geotécnicas que controlan la estabilidad son, efectivamente la cohesión y la alta susceptibilidad a la saturación de los depósitos coluvio-deluviales, así como el fracturamiento intenso de las areniscas. Los valores de resistencia obtenidos para el coluvión, lo sitúan como un material que pierde rápidamente su capacidad de soporte en cuanto el agua se infiltra entre sus partículas. Por su parte las areniscas, están atravesadas por familias de discontinuidades, lo que genera la caída de bloques.
3. Las condiciones hidrológicas propias de la zona altoandina, caracterizadas por lluvias intensas y prolongadas durante la temporada húmeda lo que reduce significativamente la estabilidad de los taludes. El balance hídrico realizado con los datos de la estación Pomacanchi evidenció que entre diciembre y marzo se produce un excedente de infiltración que eleva el nivel freático. Cuando está situación la llevamos a los modelos, las presiones de poros aumentaron notablemente y el factor de seguridad cayó por debajo de los mínimos exigidos por la Norma CE.020. Este comportamiento se observó en los taludes coluvio-deluviales como en las de arenisca fracturada, confirmando que el agua es el detonante principal de la inestabilidad en el tramo estudiado.

4. La combinación de Slide y GEO5 permitió demostrar que la corrección geométrica (reducción de la pendiente) acompañada de un sistema de drenaje que deprime el nivel freático, eleva el factor de seguridad a valores superiores a 1.25. en paralelo la alternativa de geotextil con vegetación nativa se perfila como una solución complementaria, aunque no fue modelada sería eficaz para control de la erosión superficial y los pequeños deslizamientos someros. Ambos resultados permiten sustentar un diseño conceptual de medidas de protección y estabilización adaptado a las condiciones reales del tramo carretero.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda ejecutar la corrección geométrica propuesta en los taludes que actualmente presentan factores de seguridad por debajo de los mínimos normativos. La reducción de la pendiente a valores cercanos a 35° a 45°, según sea el caso, y la construcción de banquetas intermedias de al menos 3 metros de ancho, que han demostrado ser medidas eficaces para redistribuir los esfuerzos y disminuir las fuerzas desestabilizadoras. Estas intervenciones deberían de acompañarse de un sistema de drenaje integral que contemple cunetas de coronación en la parte alta de los cortes. De modo que el nivel freático se mantenga deprimido incluso durante los meses de lluvia intensa. No debe subestimarse la importancia del mantenimiento periódico de estas obras de drenaje.
2. Para aquellos taludes donde los deslizamientos profundos ya han sido controlados con la corrección geométrica, se sugiere implementar la alternativa de geotextil y vegetación nativa como una capa de protección superficial. La siembra de especies propias de la zona altoandina como el ichu combinada con mallas de fibras naturales, ayudaría a frenar la erosión que provocan las lluvias sobre el suelo desnudo, aunque generen costos de limpieza recurrentes.
3. Se recomienda a las entidades encargadas del mantenimiento vial que establezcan un programa de inspección visual durante la temporada de lluvias, prestando especial atención de grietas en la corona de los taludes y acumulación de material suelto en las cunetas. La información recogida de forma sistemática permitiría anticipar fallas y programar intervenciones antes de que se produzcan cortes de la vía.
4. Se recomienda que en futuros estudios en la región adopten la comparación de métodos de Slide y GEO5 ya que otorga mayor confiabilidad a los resultados y permite detectar

posibles inconsistencias. Asimismo, se sugiere explorar con mayor profundidad el efecto de la vegetación nativa sobre la estabilidad, incorporando en los modelos no solo el esfuerzo mecánico de las raíces, sino también la succión que estas generan en el suelo al evapotranspirar, lo cual requiere ensayos específicos y el uso de herramientas que simulen el flujo en medios no saturados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abramson, L., Lee, T., Sharma, S., & Boyce, G. (2002). *Slope Stability and Atabilization Methods.* John Wiley & Sons, INC.

Alpaca, A., & Cahuana, R. (2022). *Análisis de la estabilidad del talud del tramo 23+710 carretera Yaurisque-Ranraccasa-Paruro y propuesta de estabilización.*

Bieniawski, Z. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications.* John Wiley & Sons. pp. 85-86.

Bishop, A. (1955). *The use pf the slip circle in the stability analysis of slopes.* Geotechnique.

Bowles , J. (1982). *Propiedades Geofísicas de los Suelos.*

Castillo, P., Vergara, L., Chalas, J., & Vicioso, F. (2020). Revisión histórica de los deslizamientos de terreno superficiales causados por lluvias, casos: México y República Dominicana. *Aqua-LAC Volumen 12(1)*, 108-117.

Catanzariti, F. (2016). Estabilidad de taludes. *GeoStru*.

Cevallos, M. (2023). *Análisis de estabilidad de talud en roca ubicado en la parroquia La Pila perteneciente al Cantón Montecristi.*

Cruden, D., & Varnes, D. (1996). Landslide types and processes. *A.K. Turner & R. L. Schuster (Eds.)*, 36-75.

Cuentas, M. (2024). *Análisis de estabilidad de taludes en el macizo rocoso Quellorco mediante el método de elemnetos finitos, equilibrio límite, probabilístico y propuesta de estabilización Puno.*

Das, B., & Sivakugan, N. (2018). *Principles of Geotechnical Engineering (9th ed.).* Cengage Learning.

De Matteis, Á. (2003). Geología y Geotecnia, Tema: Estabilidad de Taludes. *Universidad Nacional de Rosario*.

Deere, D., & Miller, R. (1968). *Engineering properties of rocks.* New York: Stagg Zienkiewicz, Jhon Wiley, Sons.

Duncan, J. (1996). State of the art: Limit equilibrium and finite-element analysis of Slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(7), 577-596.

Gonzales de Vallejo, L. (2002). *Ingeniería Geológica.* Pearson Prentice Hall.

Griffiths, D., & Lane, P. (1999). Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique*, 49(3), 387-403.

Hernández, A. (2010). *Factibilidad Técnica y Ambiental para el Diseño de Sitio de una Planta de Concreto.* ICOTEC.

Hérnandez, R., Férnandez, C., & Pilar, L. (2014). *Metodología de la investigación.* McGraw-Hill/Interamericana Editores,S.A.

Hoek, E., & Brown, E. (2019). The Hoek-Brown failure criterion and GSI-2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 11(3)*, 445-463.

Instituto Geológico y Minero de España. (2006). *Manual de Ingeniería de Taludes.* Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

ISRM. (2007). Suggested Methods for Rock Charaterization, Testing and Monitoring.

Jambu, N. (1954). Aplication of composite slip surface for stability analysis. *Proceedings of the European Cofenrence on the Stability of Earth Slopes*, 43-49.

Loayza Serna, F., & Pachacutec Champi, J. (2025). *Estudio geológico, geotécnico e hidrológico para la estabilidad de taludes del tramo de la linea ferrea Quebrada Pomatales, distrito de Huarocondo, provincia de Anta, departamento del Cusco.* Cusco.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). *Norma Técnica CE.020 Suelos y Taludes. Reglamento Nacional de Edificaiones.*

Moreno, L., Muñoz, M., & Ramirez, R. (2019). Caracterización Mecánica de suelos del Perfil Costero entre Ancón y Anconcito. *REvista Ciencia UNEMI 12(31)*, 40-53.

MTC. (2018). *Manual de carreteras: Diseño Geometrico DG-2018.* Lima, Perú.

Mucuta, H. V., Cartaya, M., & Watson, R. L. (2020). Evaluación de estabilidad en taludes del yacimiento Castellano mediante el cálculo del factor de seguridad. *Revista Cubana de Ciencias de la Tierra 36(4)*, 441- 450.

Ocón Paico, V. E. (2015). *Evaluación geotécnica de inestabilidad de taludes en la carretera Hualgayoc-Apan Alto.* Cajamarca.

ONU. (2023). Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en zonas de alta montaña de la región andina. *IAM*.

Palmstrom, A. (1982). The volumetric Joint Count - A Useful and Simple Measure of the Degree of Rock Mass Jointing. *Partner of Norconsult A.S.*

Peña, I., Vera, R., Vásquez, A., & Gálvez, M. (2023). Evaluación del peligro por inestabilidad de taludes en la ruta PE-3S, Abancay. *Hatun Yachay Wasi 2(2)*, 40-51.

Priest, S., & Hudson, J. (1976). Discontinuity Spacings in rock. *Int. J. Rock. Mech. Min*, 135-148.

Proyecto Multinacional Andino:Geociencias para las Comunidades Andinas. (2007). *Movimientos en masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas* . Servicio Nacional de Geología y Minería.

Quispe Anccalle, L., & Rodríguez Alfaro, Y. (2021). *Evaluación de estabilidad de taludes a través de elementos finitos en la carretera Interoceánica sur de Marcapata, Quispicanchis, Cusco, 2021.* Cusco.

Romana, M. (1985). New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. *ISRM*, 49-53.

Sackschewski Chapman, C. E. (2017). *Soluciones para la estabilidad de taludes de la carretera Canta-Huayllay entre las progresivas del km 102 al km 110.* Lima.

Sequeira , J. (2023). Contexto de inestabilidad de laderas en la ruta nacional 613, Coto Brus, Costa Rica. *Revista infraestructura vial*.

Suarez, J. (2017). *Deslizamientos y Estabilidad de taludes en zonas tropicales.*

Turner, A., & Schuster, R. (2012). *Rockfall: Characterization and Control.* Transportation Research Board.

Wu, Z., Yang, G., Li, W., Chen, X., Liu, F., & Zheng, Y. (2025). Numerical Simulation Study Of Rainfall-Induced Saturated-Unsaturated Landslide Instability and Failure. *Water*, 17.

Wyllie, D., & Mah, W. (2004). *Rock Slope Engineering.* This edition published in the Taylor & Francis e-Library.

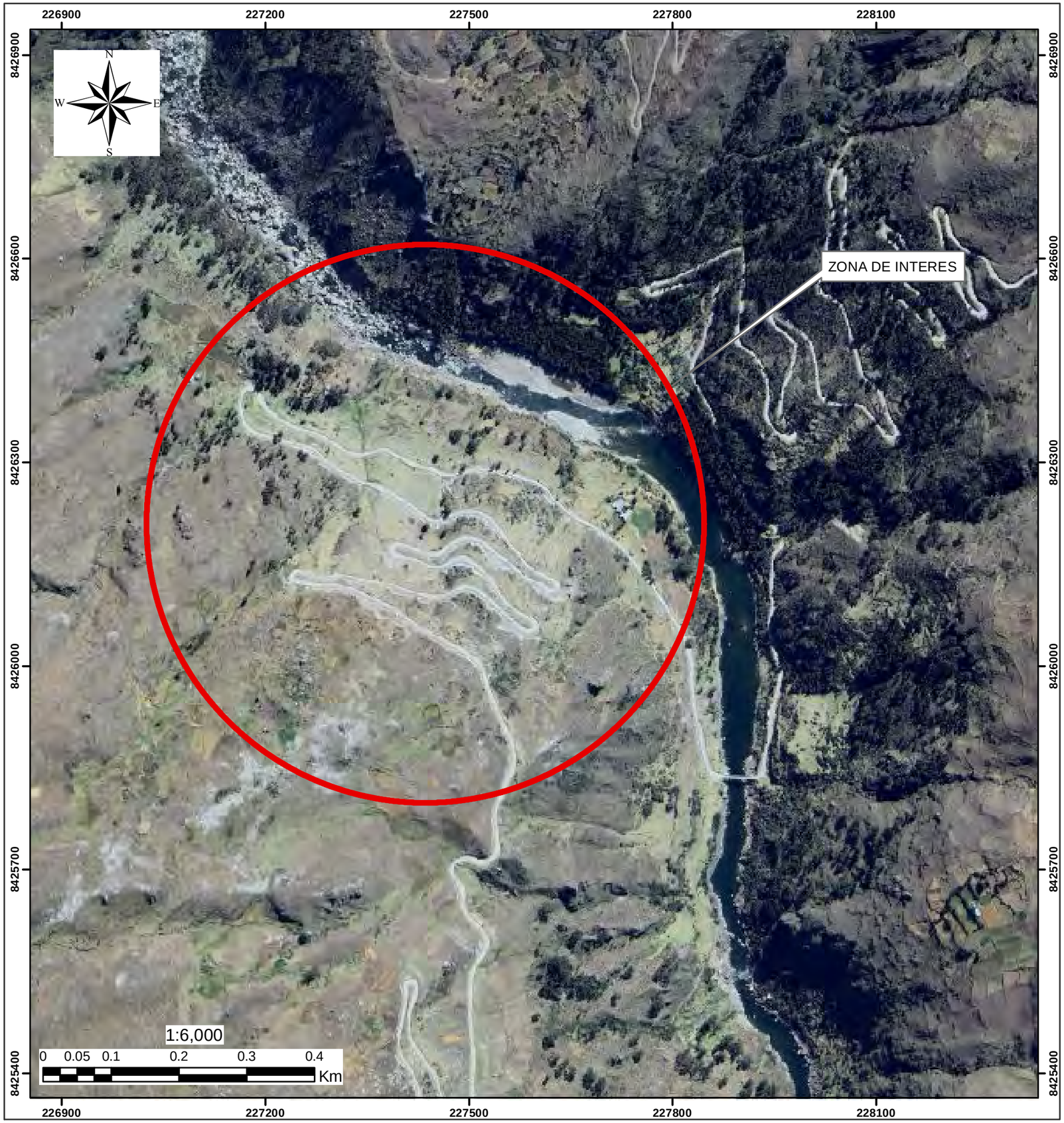
Zienkiewicz, O., Taylor, R., & Zhu, J. (2013). *The finite element method: its basis and fundamentals (7th ed.).* Butterworth-Heinemann.

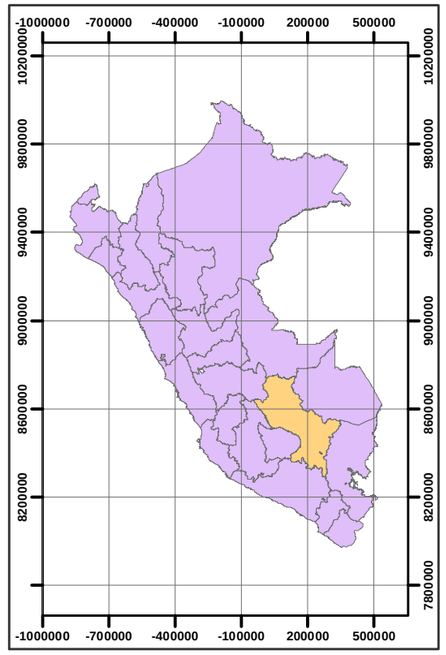
ANEXOS

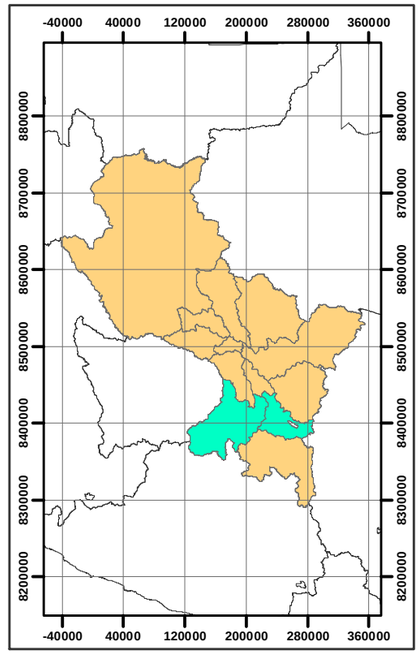
ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

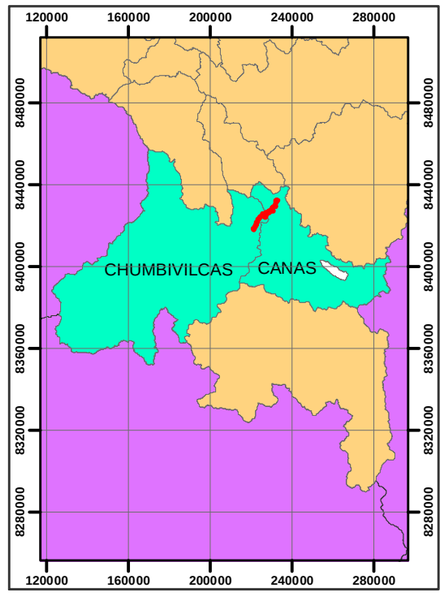
EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA-LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025					
Problema	**Objetivos**	**Hipótesis**	**Variables**	**Indicadores**	**Metodología**
General	**General**	**General**	**Dependiente**	Tipo de material (suelo/roca)	Enfoque
¿Cómo influye la evaluación geotécnica para determinar la estabilidad de los taludes en los kilómetros 56 y 57 del tramo carretero Tungasuca – Livitaca, región Cusco 2025?	Realizar una evaluación geotécnica para la estabilidad de taludes en los kilómetros 56 y 57 del tramo carretero Tungasuca – Livitaca, región Cusco 2025.	La estabilidad de los taludes ubicados en el km 56 y 57 del tramo carretero Tungasuca – Livitaca se relaciona de manera directa con la caracterización geotécnica de los materiales, la identificación de los factores condicionantes de inestabilidad y la aplicación de métodos de análisis de estabilidad, lo que permite determinar medidas de mitigación adecuadas.	Estabilidad de taludes	Cohesión, ángulo de fricción, meteorización	Mixto (Cualitativo y Cuantitativo)
				Geometría del talud (altura, pendiente, ancho de base)	Alcance
				Presencia de agua, drenaje, condiciones hidrogeológicas	Descriptivo - Explicativo
Específico	**Específico**	**Específico**		Identificación de zonas críticas	Diseño
¿Cuáles son las características geológicas y geotécnicas que influyen en la estabilidad de los taludes en los kilómetros 56 y 57 del tramo carretero Tungasuca – Livitaca, región Cusco 2025?	Caracterizar las condiciones geológicas y geotécnicas que influyen para la estabilidad de los taludes en los kilómetros 56 y 57 del tramo carretero Tungasuca – Livitaca, región Cusco 2025.	Las características geológicas y geotécnicas que controlan la estabilidad de los taludes del km 56 y 57 del tramo carretero Tungasuca – Livitaca son la baja cohesión y la alta susceptibilidad a la saturación de los depósitos coluvio-deluviales, el fracturamiento intenso de las areniscas.		Nivel de susceptibilidad al deslizamiento	No experimental - Transversal
					Técnica
				Identificación de falla, grietas	Se empleará pre-campo, campo y post-campo
				Erosión superficial, control de drenaje	Instrumento
¿Cuál es la relación de las condiciones hidrológicas y la estabilidad de los taludes en el tramo carretero Tungasuca – Livitaca, región Cusco 2025?	Evaluar las condiciones hidrológicas para la estabilidad de los taludes en los kilómetros 56 y 57 del tramo carretero Tungasuca – Livitaca, región Cusco 2025.	Las condiciones hidrológicas, como las lluvias intensas y prolongadas que caracteriza las zonas altoandinas, reducen la estabilidad de los taludes del tramo carretero Tungasuca - Livitaca, al incrementar las presiones de poros en los depósitos coluvio-deluviales y en las discontinuidades de la arenisca fracturada, lo que disminuye los esfuerzos efectivos y con ello el factor de seguridad hasta valores que están por debajo del mínimo exigido por la normativa peruana.	**Independiente**	Litología	Se utilizará instrumentos de campo como: Picota, brújula, GPS, lupa 8x y 10x, cámara de alta resolución, tableros, cuaderno de campo, lápices de colores, envases para el muestreo, pico y pala, e instrumentos de gabinete como software y equipos de laboratorio.
			Condiciones geotécnicas del talud	Estratigrafía	
				Altura del talud, pendiente	Población
¿De qué manera el modelado de la estabilidad de los taludes, mediante la determinación del factor de seguridad, permite proponer un diseño conceptual de medidas de protección y estabilización en el tramo carretero Tungasuca – Livitaca en los kilómetros 56 y 57, región Cusco 2025?	Modelar la estabilidad de los taludes determinando los factores de seguridad y proponer un diseño conceptual de medidas de protección y estabilización en los kilómetros 56 y 57 del tramo carretero Tungasuca – Livitaca, región Cusco 2025.	El modelado de la estabilidad con Slide y GEO5, al determinar los factores de seguridad, demuestra que la corrección geométrica combinada con drenajes eleva el factor de seguridad por encima de los mínimos normativos, y la alternativa de geotextil con vegetación nativa contribuye al control de erosión superficial en los taludes del tramo carretero Tungasuca – Livitaca.		Precipitaciones pluviales, Variaciones de temperatura	La población de la presente investigación está constituida por el sistema geotécnico completo del tramo carretero Tungasuca - Livitaca
				Nivel freático, infiltración, permeabilidad	Muestra
				Corte de taludes, intervención vial	Se empleo un muestreo no probabilístico, es la técnica que permite seleccionar muestras con una clara intención o por un criterio preestablecido

MAPA DE UBICACIÓN DEL TRAMO CARRETERO KM 56 Y 57 TUNGASUCA - LIVITACA









LEYENDA

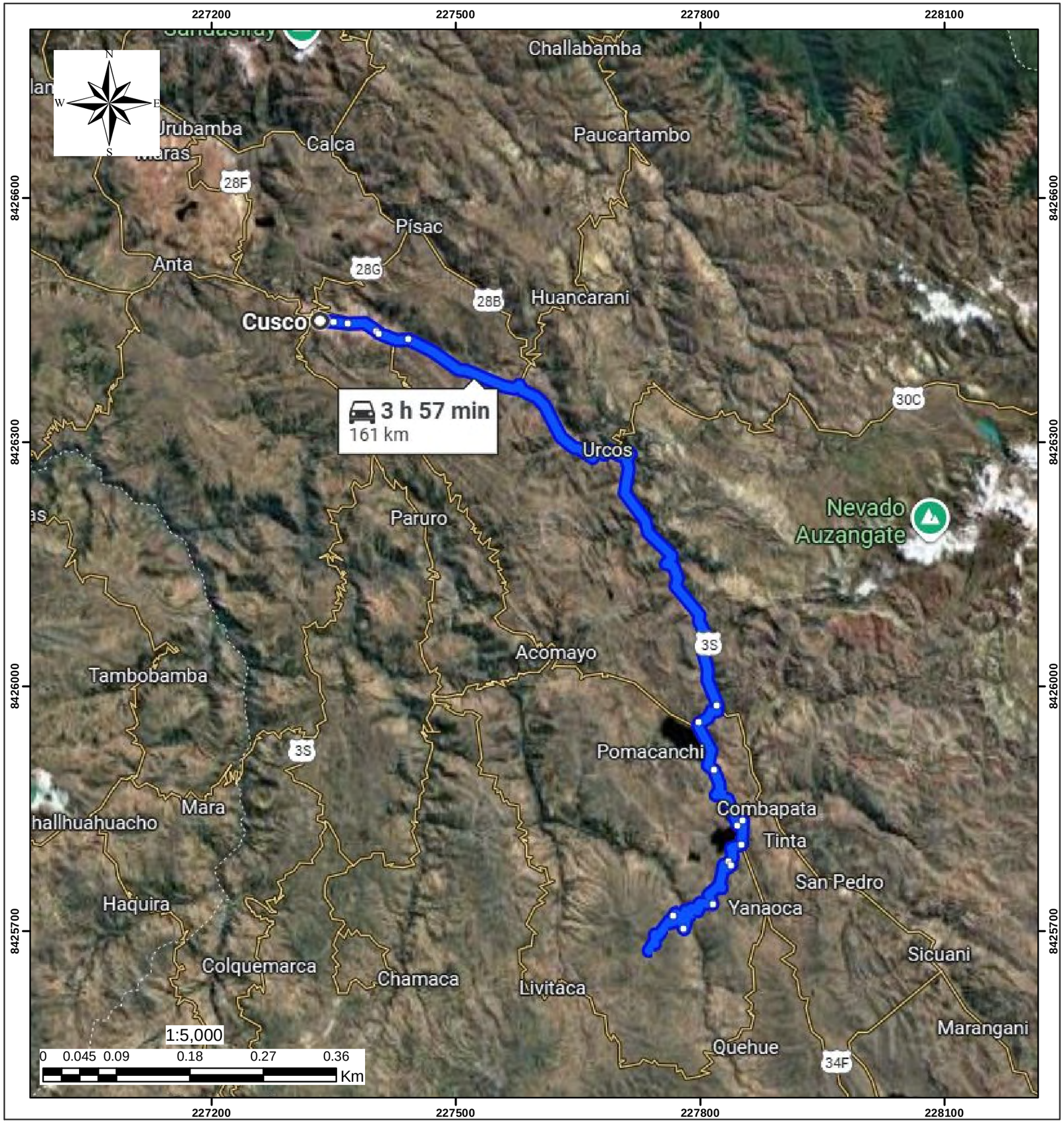
- TUNGASUCA-LIVITACA
- PROVINCIAS CANAS-CHUMBIVILCAS
- DEPARTAMENTO CUSCO
- MAPA DEL PERU

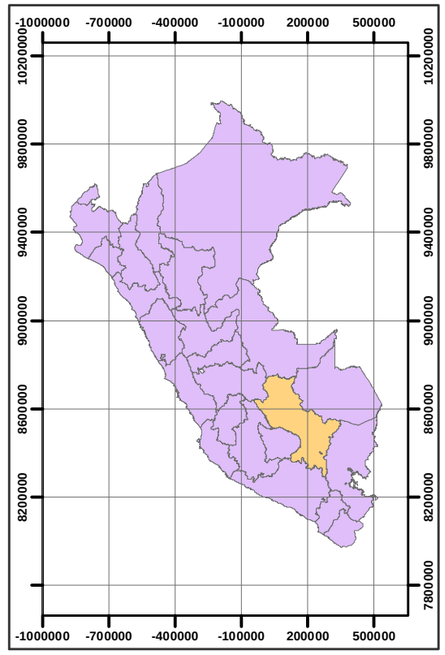
ZONA DE INTERES.jpg
RGB

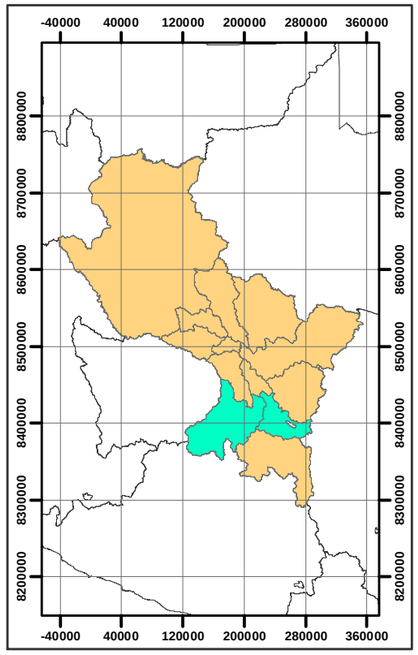
- Red: Band_1
- Green: Band_2
- Blue: Band_3

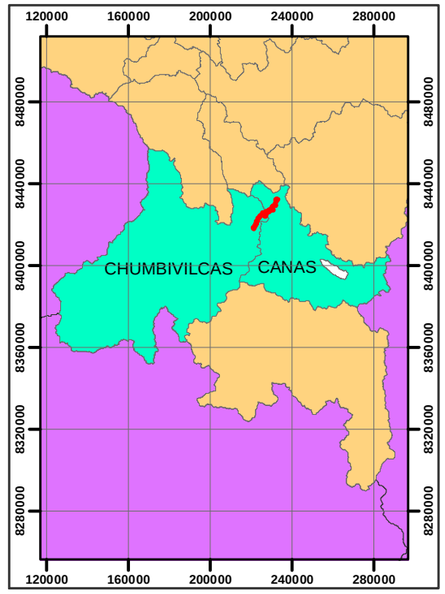
	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA			
PLANO:	MAPA DE UBICACIÓN DEL TRAMO CARRETERO KM 56 Y 57 TUNGASUCA - LIVITACA			
TESIS:	"EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO TUNGASUCA - LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025"			
DEPARTAMENTO:	CUSCO	DATUM: WGS 84	ZONA: 19S	LAMINA: 01
PROVINCIA:	CANAS-CHUMBIVILCAS	ELABORADO POR: Bach. PARI QUISPE, Milagros Yanina Bach. USCAMAYTA ASLLA, Edith Analy		
DISTRITO:	TUNGASUCA-LIVITACA			
COMUNIDAD:	TUNGASUCA - AUSANTA	ESCALA: 1:6000		

MAPA DE ACCESIBILIDAD DEL TRAMO CARRETERO KM 56 Y 57 TUNGASUCA - LIVITACA







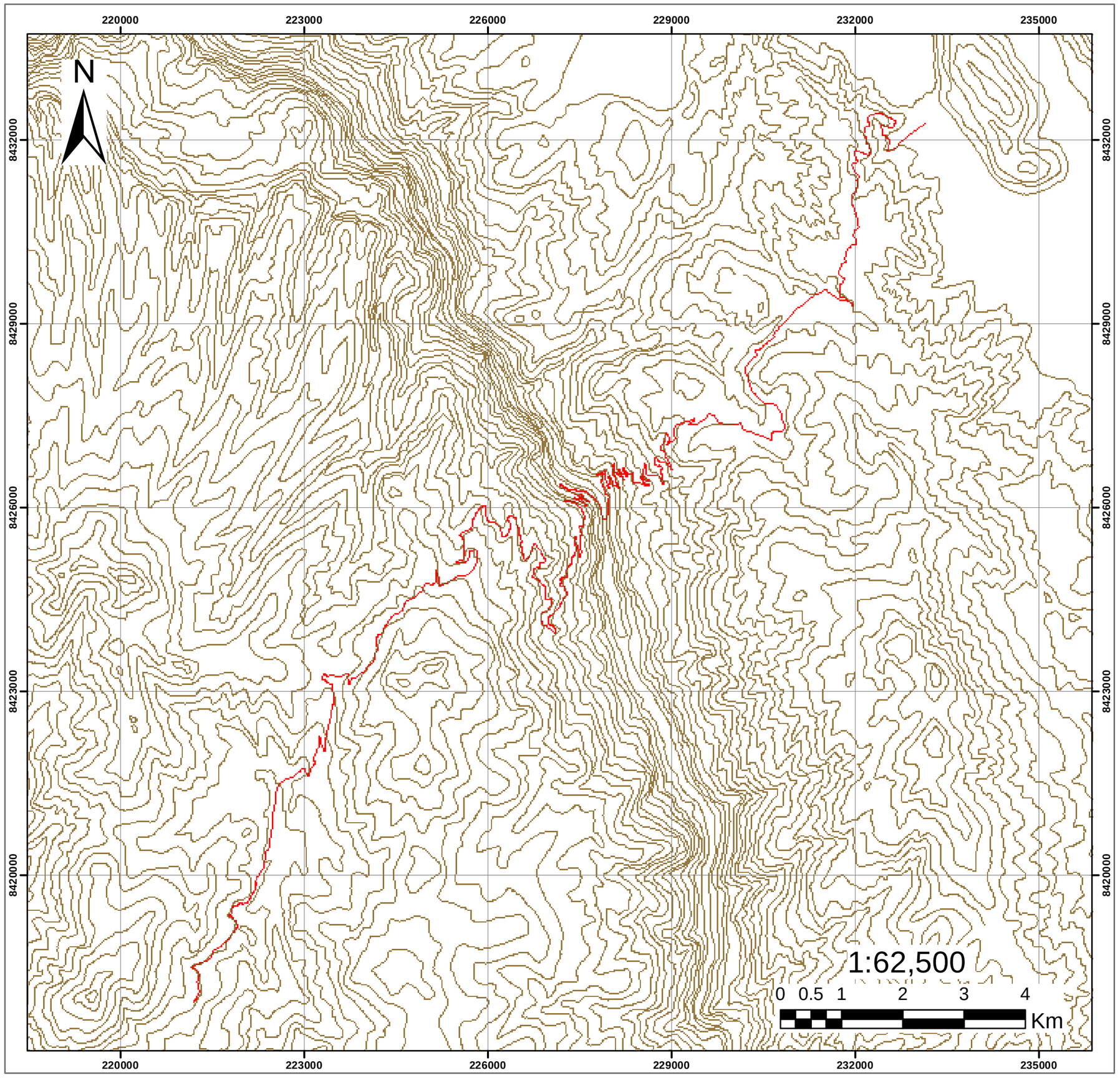


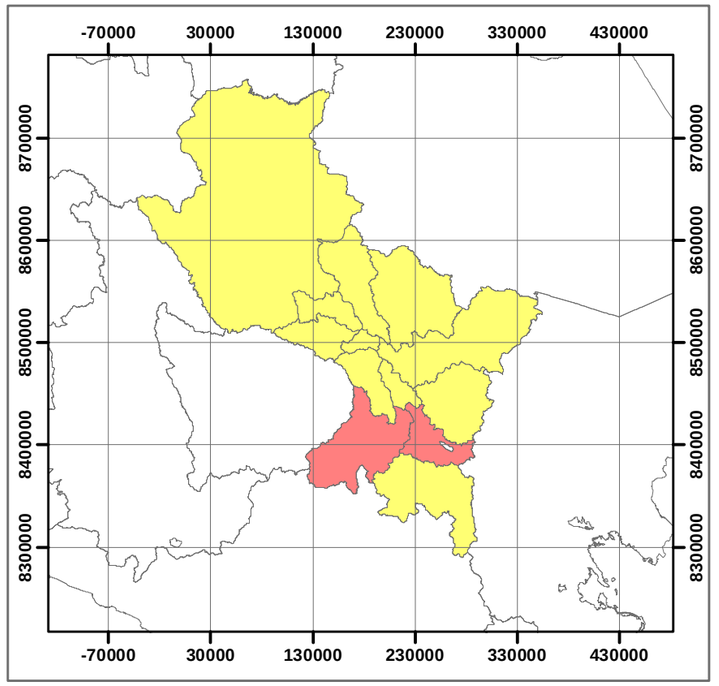
LEYENDA

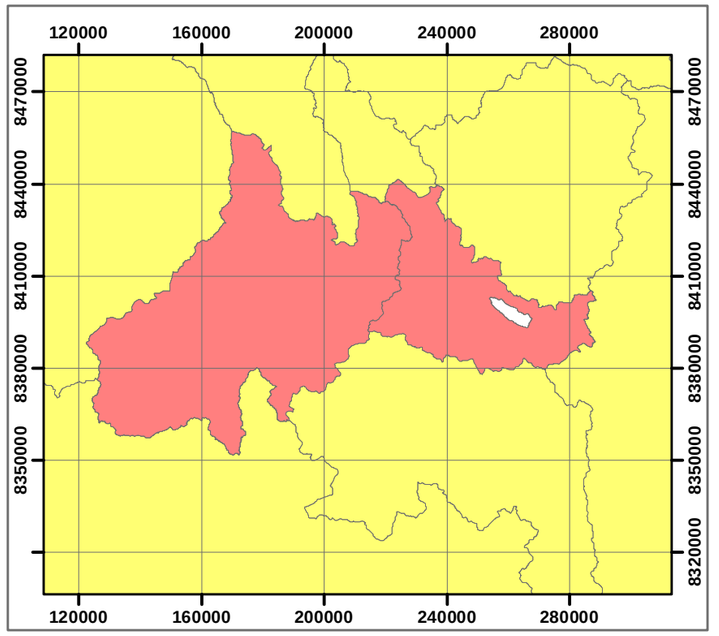
- TUNGASUCA-LIVITACA
- PROVINCIAS CANAS-CHUMBIVILCAS
- DEPARTAMENTO CUSCO
- MAPA DEL PERU

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		
PLANO:	MAPA DE ACCESIBILIDAD AL TRAMO CARRETERO KM 56 Y 57 TUNGASUCA - LIVITACA		
TESIS:	"EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO TUNGASUCA - LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025"		
DEPARTAMENTO:	CUSCO	DATUM: WGS 84	ZONA: 19S
PROVINCIA:	CANAS-CHUMBIVILCAS	ELABORADO POR: Bach. PARI QUISPE, Milagros Yanina Bach. USCAMAYTA ASLLA, Edith Analy	LAMINA: 02
DISTRITO:	TUNGASUCA-LIVITACA		
COMUNIDAD:	TUNGASUCA - AUSANTA	ESCALA: 1:6000	

MAPA TOPOGRÁFICO DE LA ZONA DE ESTUDIO

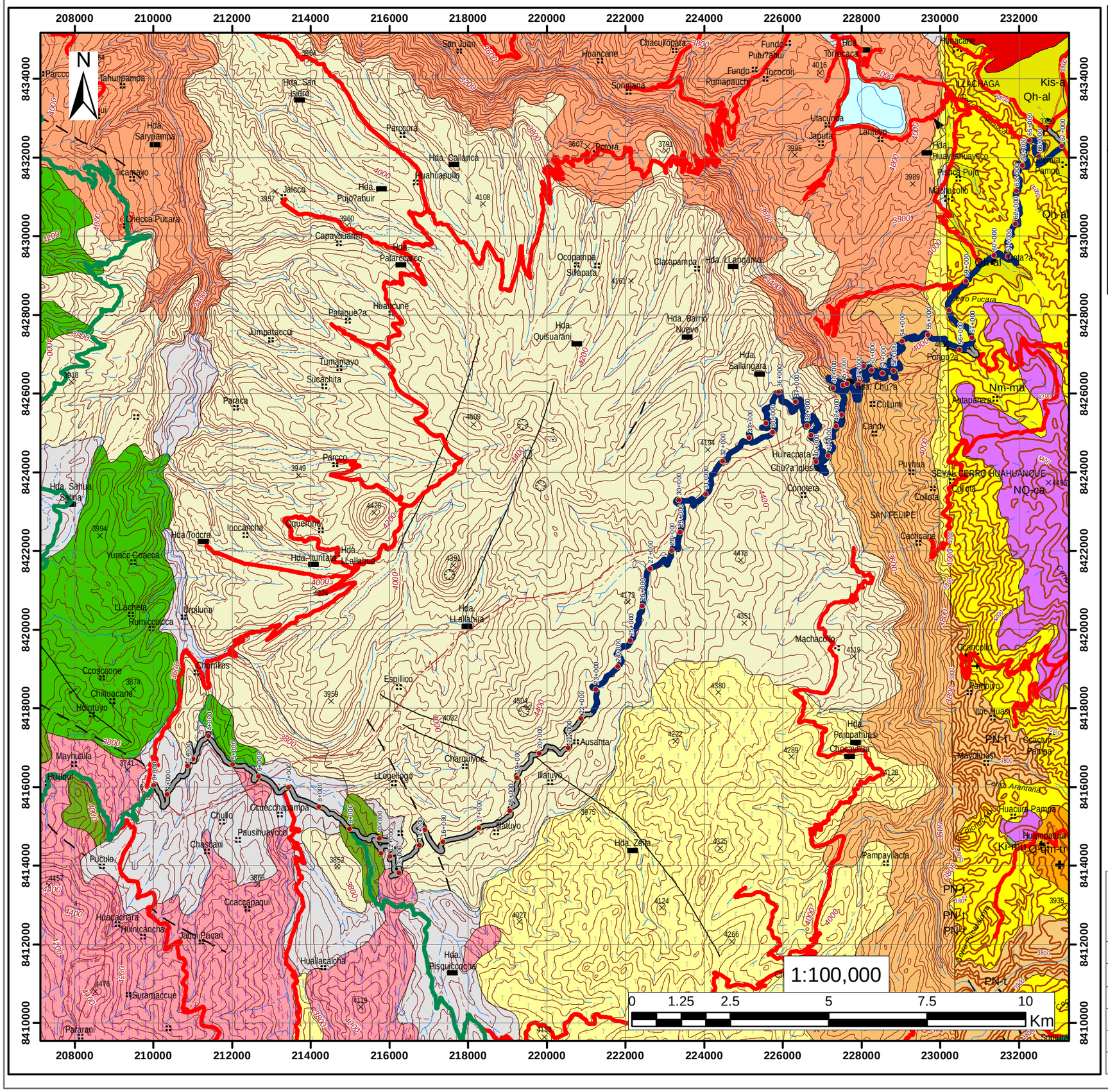


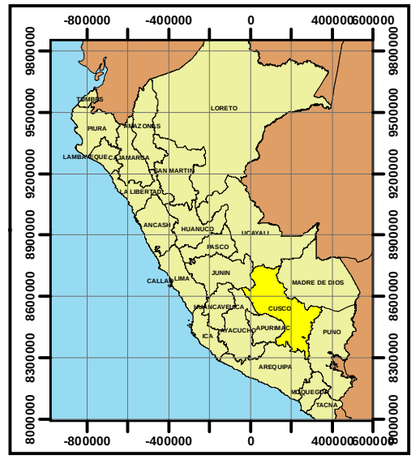


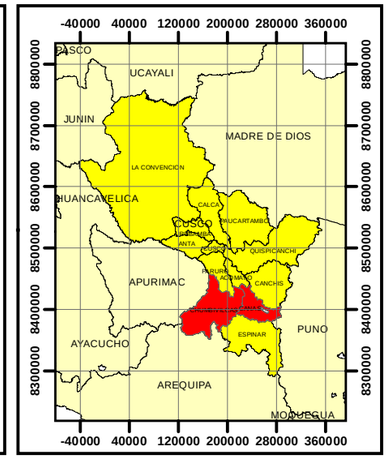


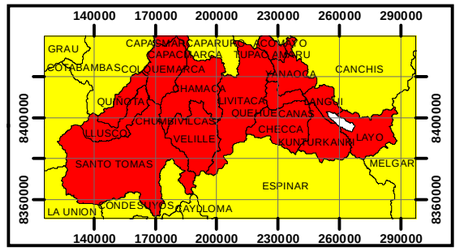
	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		
PLANO:	MAPA TOPOGRÁFICO		
TESIS:	"EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA - LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025"		
DEPARTAMENTO:	CUSCO	DATUM: WGS 84	ZONA: 19S
PROVINCIA:	CANAS-CHUMBIVILCAS	ELABORADO POR: Bach. PARI QUISPE, Milagros Yanina Bach. USCAMAYTA ASLLA, Edith Analy	LAMINA: 03
DISTRITO:	TUNGASUCA-LIVITACA		
COMUNIDAD:	TUNGASUCA - AUSANTA	ESCALA: 1:62500	

MAPA GEOLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO









LEYENDA

- Progresivas
- TRAMO TUNGASUCA_LIVITACA
- Eje_Vía
- red_vial_departamental_dic18
- red_vial_vecinal_dic18
- Red Vial Nacional
- Dataciones radiométricas

DRENAJE
- Río principal
- Río secundario
- Quebrada
- Quebrada seca e intermitente
- Canal ó acequia
- Acequia

CURVAS DE NIVEL
- Curva de nivel - Primaria
- Curva de nivel - Secundaria

VIAS
- Carretera afirmada, transitable
- Camino carrozable
- Camino de herradura
- Ferrocarril
- Puente
- Cable transmisor de fza. electrica

BUZAMIENTO
- Rumbo y buzamiento de estratos
- Rumbo y buzamiento de estratos fotointerpretado < 30°
- Rumbo y buzamiento de foliación
- Rumbo y buzamiento de estratos invertido
- Estrato vertical
- Rumbo y buzamiento de estratos fotointerpretado 30° - 60°
- Rumbo y buzamiento de estratos fotointerpretado > 60°

FALLAS
- Falla normal
- Falla inferida
- Falla inversa
- Falla de rumbo dextral
- Falla de rumbo sinestral

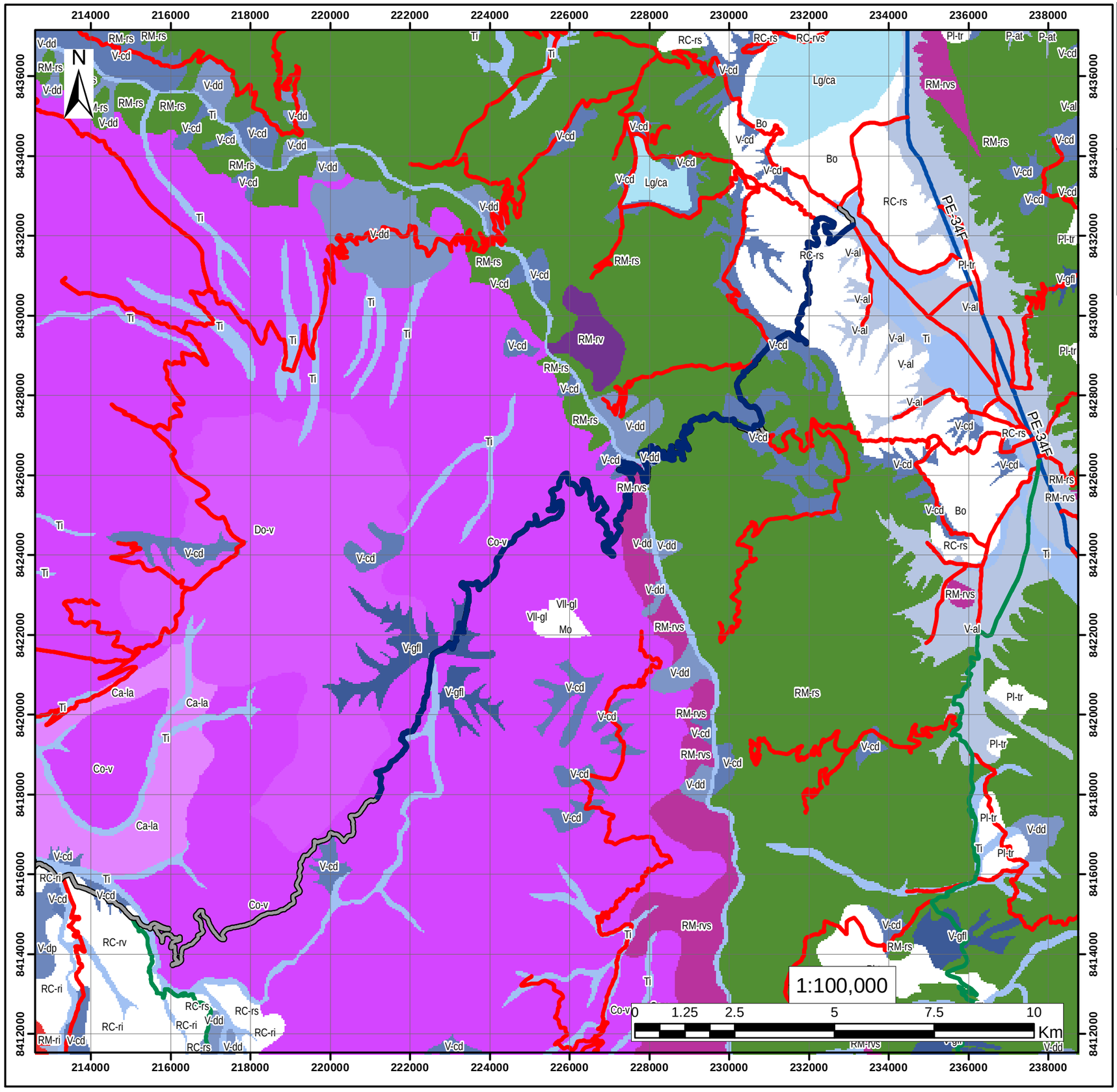
PLIEGUES
- Eje de anticlinal
- Eje de sinclinal
- Eje de sinclinal tumbado
- Eje de sinclinal tumbado inferido
- Eje de anticlinal tumbado inferido

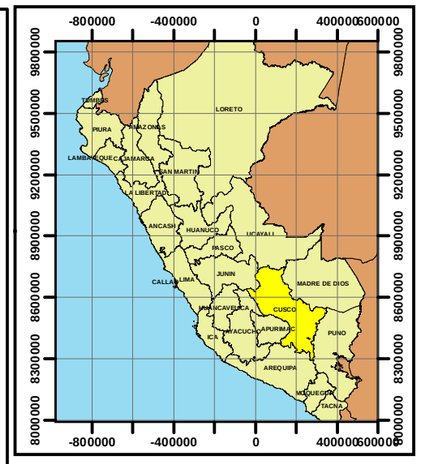
- Laguna
- Drenaje
- Ciudad

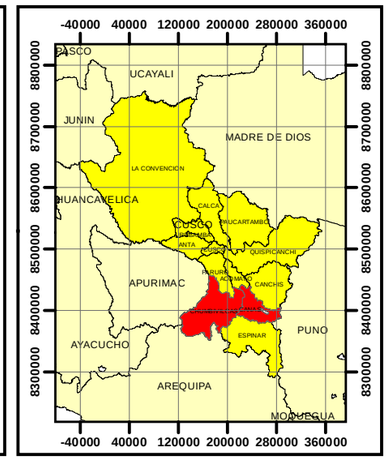
GEOLOGIA
- Depósito aluvial
- Laguna
- Depósito glaciar, fluvial
- Formación Murco
- Grupo Puno
- Grupo Tacaza
- Grupo Maure
- Unidad Llajua - Plutón Charamuray - diorita
- Formación Quechua Grande
- Formación Pisquicocha
- Grupo Barroso - toba
- Formación Arcurquina

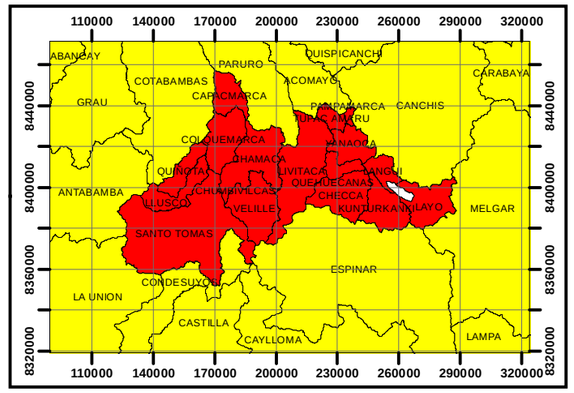
	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		
PLANO:	MAPA GEOLÓGICO		
TESIS:	"EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA - LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025"		
DEPARTAMENTO:	CUSCO	DATUM: WGS 84	ZONA: 19S
PROVINCIA:	CANAS-CHUMBIVILCAS	ELABORADO POR: Bach. PARI QUISPE, Milagros Yanina Bach. USCAMAYTA ASLLA, Edith Analy	LAMINA: 04
DISTRITO:	TUNGASUCA-LIVITACA		
COMUNIDAD:	TUNGASUCA - AUSANTA	ESCALA: 1:100000	

MAPA GEOMORFOLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO









LEYENDA

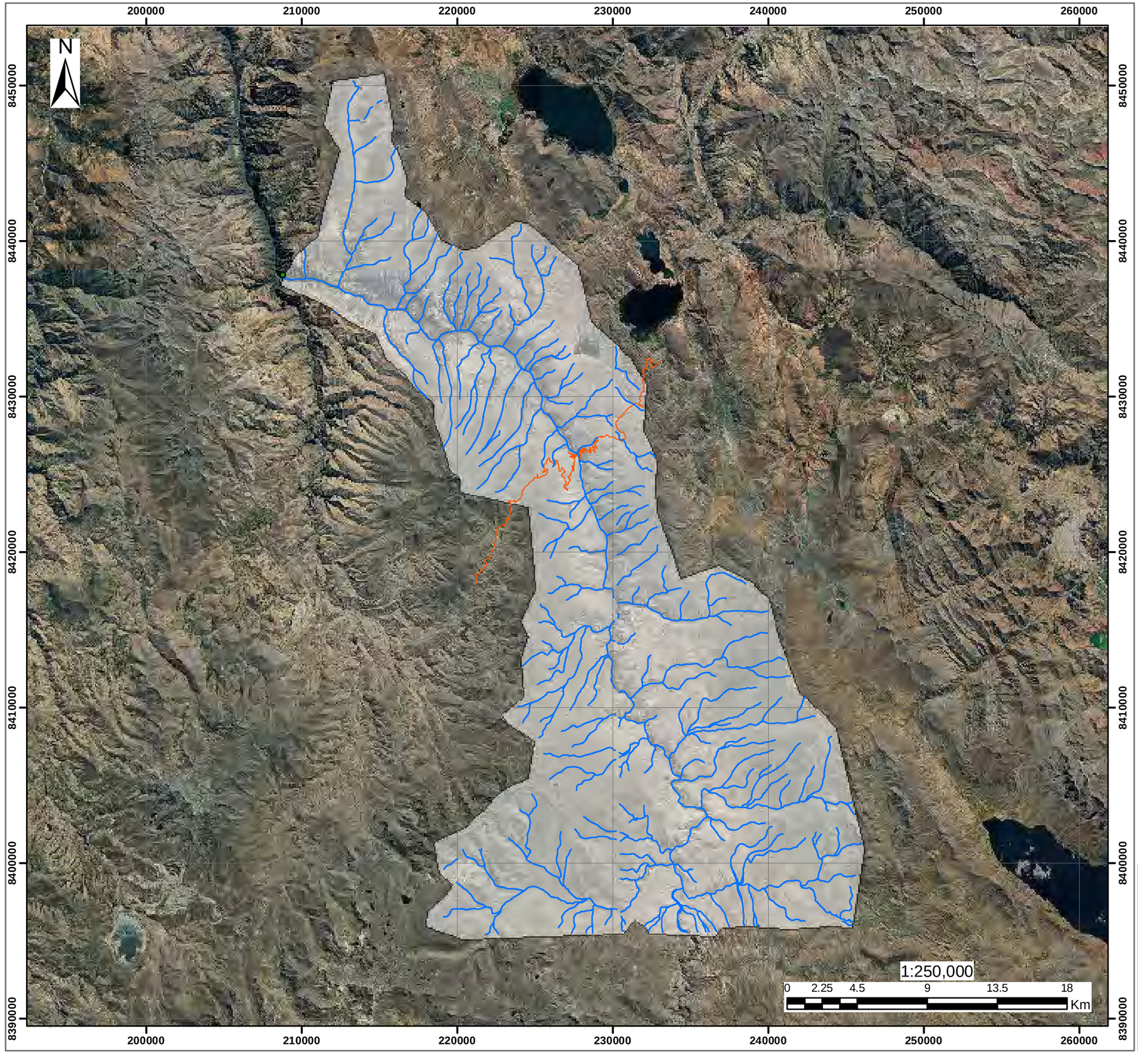
- TRAMO TUNGASUCA_LIVITACA
- Eje_Vía
- red_vial_departamental_dic18
- red_vial_vecinal_dic18
- Red Vial Nacional

GEOMORFOLOGÍA

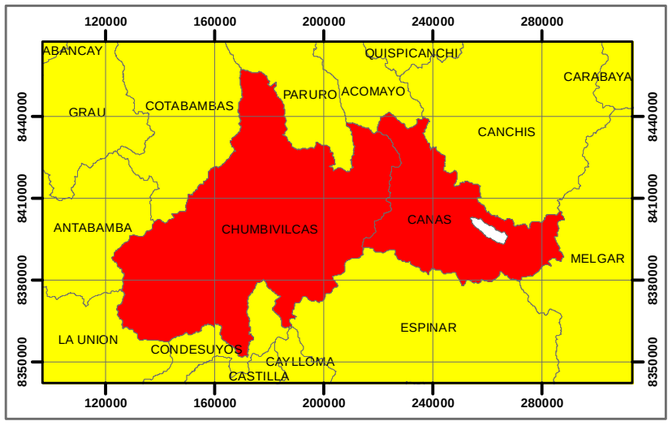
- RM-ri, Montaña en roca intrusiva
- RM-rv, Montaña en roca volcánica
- RM-rvs, Montaña en roca volcano-sedimentaria
- RM-rs, Montaña en roca sedimentaria
- RM-rm, Montaña en roca metamórfica
- Co-v, Complejo volcánico
- Do-v, Domo volcánico
- Ca-la, Coladas o campo de lavas basalto-andesíticas
- Vll-r, Valle de represamiento
- Vll-e, Valle encañonado o valle-cañón
- V-gl, Vertiente glacial o de gelifracción
- V-gfl, Vertiente glacio-fluvial
- V-al/fg/bo, Vertientes aluviales o fluvioglaciares con bofedales
- V-cd, Vertiente o piedemonte coluvio-deluvial
- V-d, Vertiente coluvial de detritos
- V-dp, Vertiente de detritos poligénica
- V-dd, Vertiente con depósito de deslizamiento
- Ab, Abanico de piedemonte
- P-at, Vertiente o piedemonte aluvio-torrencial
- V-al, Vertiente o piedemonte aluvial
- P-al, Vertiente o piedemonte aluvio-lacustre
- Pl-al, Llanura o planicie aluvial
- Pld-al, Llanura o planicie disectada aluvial
- Plo/al, Llanura o planicie ondulada aluvial
- PVTi, Planicies y valles aluviales con terrazas indiferenciadas
- T-al, Terraza aluvial
- Ta-al, Terraza alta aluvial
- Tad-al, Terraza alta disectada aluvial
- Ti, Terraza indiferenciada
- Lag, Lagos
- Lg/ca, Laguna y cuerpos de agua
- Río, Cauce del río

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		
PLANO:	MAPA GEOMORFOLÓGICO		
TESIS:	"EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA - LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025"		
DEPARTAMENTO:	CUSCO	DATUM: WGS 84	ZONA: 19S
PROVINCIA:	CANAS-CHUMBIVILCAS	ELABORADO POR: Bach. PARI QUISPE, Milagros Yanina Bach. USCAMAYTA ASLLA, Edith Analy	LAMINA: 05
DISTRITO:	TUNGASUCA-LIVITACA		
COMUNIDAD:	TUNGASUCA - AUSANTA	ESCALA: 1:100000	

MAPA HIDROLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO







LEYENDA

- DREN_CUEN
- TRAMO TUNGASUCA_LIVITACA
- CUENCA_HIDRO

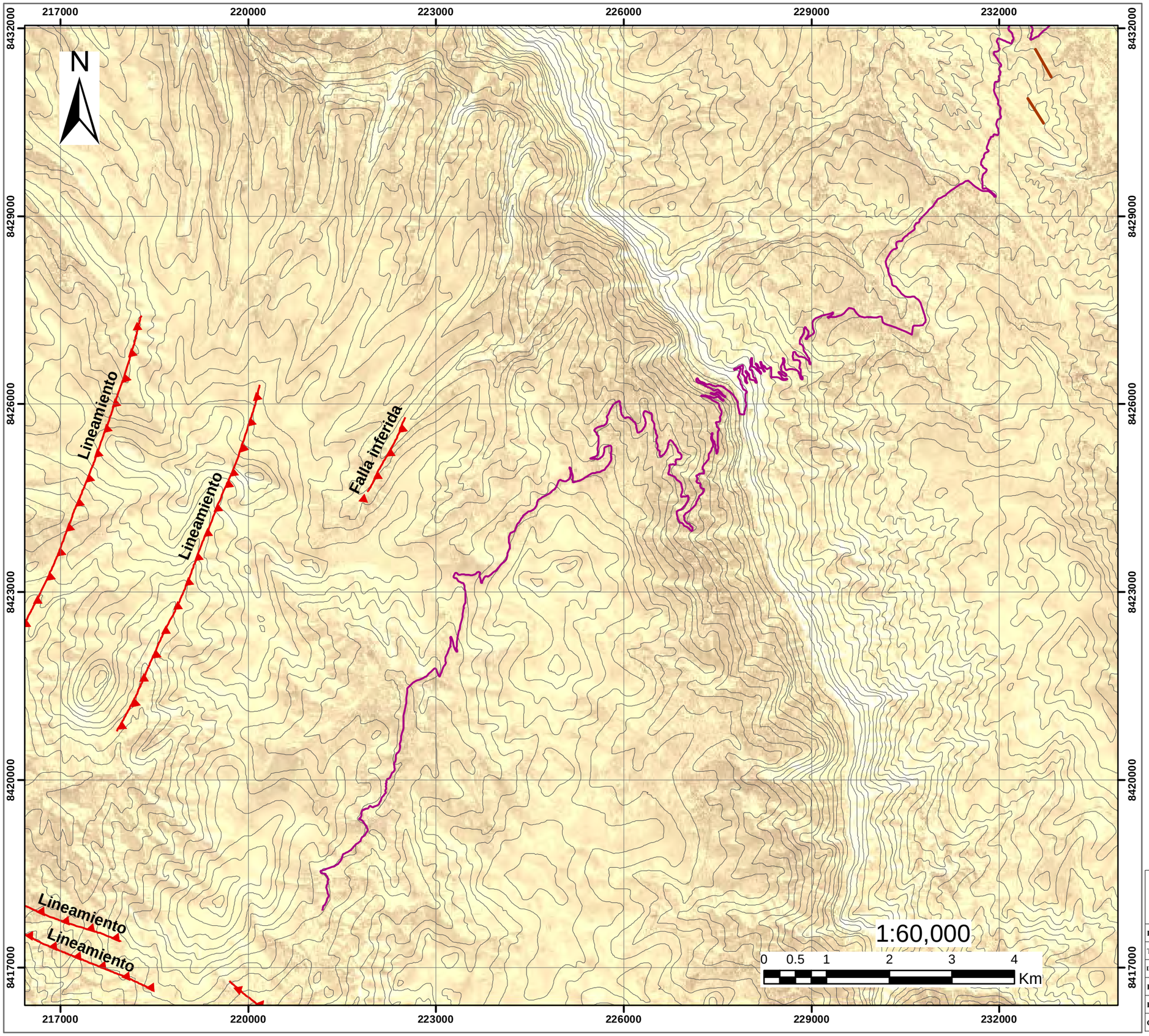
IMAGEN

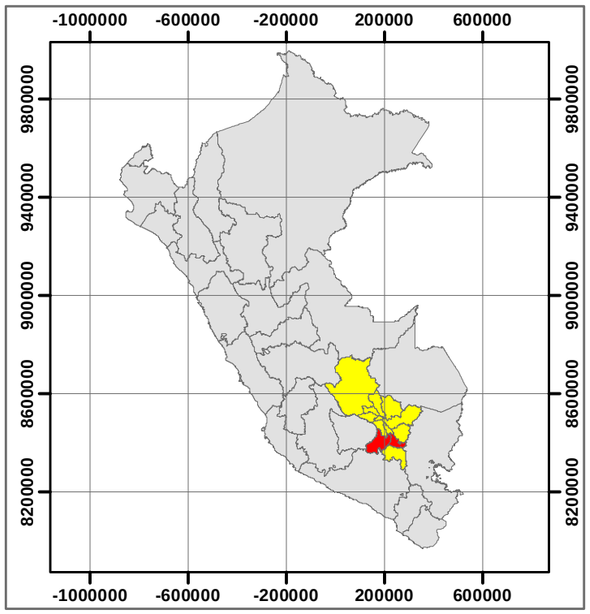
RGB

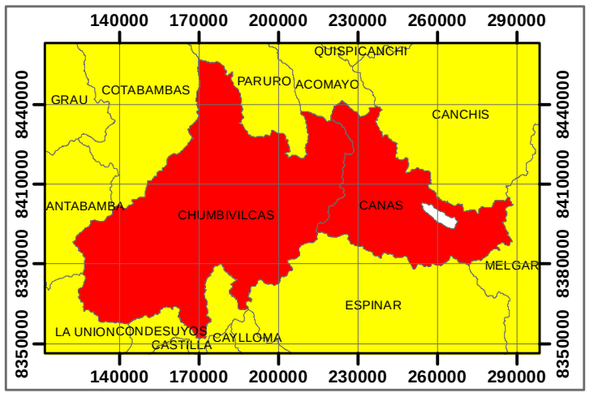
- Red: Red
- Green: Green
- Blue: Blue

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		
PLANO:	MAPA HIDROLÓGICO		
TESIS:	"EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA - LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025"		
DEPARTAMENTO:	CUSCO	DATUM: WGS 84	ZONA: 19S
PROVINCIA:	CANAS-CHUMBIVILCAS	ELABORADO POR: Bach. PARI QUISPE, Milagros Yanina Bach. USCAMAYTA ASLLA, Edith Analy	LAMINA: 06
DISTRITO:	TUNGASUCA-LIVITACA		
COMUNIDAD:	TUNGASUCA - AUSANTA	ESCALA: 1:250000	

MAPA ESTRUCTURAL DE LA ZONA DE ESTUDIO







LEYENDA

- TRAMO TUNGASUCA_LIVITACA
- BUZAMIENTOS
- ANTICLINAL
- SINCLINAL
- FALLA
- CURVAS_NIVEL

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		
PLANO:	MAPA ESTRUCTURAL		
TESIS:	"EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA - LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025"		
DEPARTAMENTO:	CUSCO	DATUM: WGS 84	ZONA: 19S
PROVINCIA:	CANAS-CHUMBIVILCAS	ELABORADO POR: Bach. PARI QUISPE, Milagros Yanina Bach. USCAMAYTA ASLLA, Edith Analy	LAMINA: 07
DISTRITO:	TUNGASUCA-LIVITACA		
COMUNIDAD:	TUNGASUCA - AUSANTA	ESCALA: 1:60000	

MAPEO GEOLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO

TALUD N° 1		
COORDENADAS UTM		
PUNTO	ESTE	NORTE
INICIAL	227428	8426215
FINAL	227465	8426213

DATOS GEOMÉTRICOS	
Altura del talud	10 m
Distancia horizontal	11.22 m
Pendiente del talud	50°
PARÁMETROS	Coluvio-deluvial
Peso unitario	19 kN/m3
Cohesión	12.71 KN/m2
Angulo de fricción	30°





ESTACIÓN GEOMECÁNICA 01
TALUD DE SUELO



TALUD N° 2		
COORDENADAS UTM		
PUNTO	ESTE	NORTE
INICIAL	227616	8426105
FINAL	227587	8426116

DATOS GEOMÉTRICOS	
Altura del talud	12 m
Distancia horizontal	18.30 m
Pendiente del talud	49°
PARÁMETROS	Coluvio-deluvial
Peso unitario	19 kN/m3
Cohesión	8 KN/m2
Angulo de fricción	30°

ESTACIÓN GEOMECÁNICA 03
TALUD DE SUELO

TALUD N° 3		
COORDENADAS UTM		
PUNTO	ESTE	NORTE
INICIAL	227551	8426146
FINAL	227521	8426168

DATOS GEOMÉTRICOS	
Altura del talud	19 m
Distancia horizontal	26 m
Pendiente del talud	48°
PARÁMETROS	Coluvio-deluvial
Peso unitario	19 kN/m3
Cohesión	8 KN/m2
Angulo de fricción	30°



ESTACIÓN GEOMECÁNICA 02
TALUD DE SUELO

ESTACIÓN GEOMECÁNICA 04
TALUD DE ROCA

TALUD N° 4		
COORDENADAS UTM		
PUNTO	ESTE	NORTE
INICIAL	227516	8426172
FINAL	227485	8426178

GEOMETRÍA	Longitud:	20 m
	Altura:	14 m
	Dip . Dir:	7°
	Buzamiento:	68°
GEOLOGÍA	Litología:	Arenisca
	Tipo de roca:	Sedimentaria
	Tipo de estructura:	Juntas

PLANO	ORIENTACIÓN	
	D	DD
J-1	70°	10°
J-2	80°	120°
J-3	45°	250°





Parámetros	RESISTENCIA DE LA ROCA							ÍNDICE DE CALIDAD DE LA ROCA					ESPACIADO DE LA DISCONTINUIDAD					CONDICIONES DE LA DISCONTINUIDAD																					CONDICIÓN HIDROLÓGICA						CORRECCIÓN POR ORIENTACIÓN		
	Resistencia a la compresión uniaxial (Mpa)							RQD (%)					Espaciamiento (m)					Continuidad (m)					Apertura (mm)					Rugosidad					Relleno					Alteración					Presencia de agua						Orientación de las discontinuidades		
Rangos y valores	> 250	100-250	50-100	50-25	25-5	5-1	< 1	90-100	75-90	50-75	25-50	< 25	Muy juntas	<60mm	60 - 200mm	Moderad. juntas	0.2 - 0.6m	Separadas	0.6 - 2m	Muy separadas	>2m	Muy baja	< 1m	Baja	1 - 3m	Media	3 - 10m	Alta	10 - 20m	Muy alta	>20m	Ninguna	0	Muy cerrada	< 1mm	Cerrada	0.1 - 1 mm	Moderad. Abierta	1 - 5 mm	Abierta	> 5mm	Muy rugosa	6	Rugosa	5	Ligeram. Rugosa	3	Lisa	1	Plana	0	Blando	>5mm	<5mm	Duro	>5mm	<5mm	Ninguno	Inalterada	6	Ligeram. Alterada	5	Moderad. Alterada	3	Muy alterada	1	Descompuesta	0	Seco	15	Nulo	15	SMR	0
	15	12	7	4	2	1	0	20	17	13	8	3	5	8	10	15	20	8	4	2	1	0	6	5	3	1	0	6	5	3	1	0	6	2	4	6	6	5	3	1	0	15	10	< 10 l/min	7	10-25l/min	4	25-125 l/min	0	>125 l/min																		

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA

Proyecto: EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025

Ubicación: PROVINCIAS CANAS - CHUMBIVILCAS, DEPARTAMENTO CUSCO

Solicita: Br. EDITH ANALU USCAMAYTA ASLLA

Br. MILAGROS YANINA PARI QUISPE

Calicata: C-01

Fecha: 18 de Abril del 2026

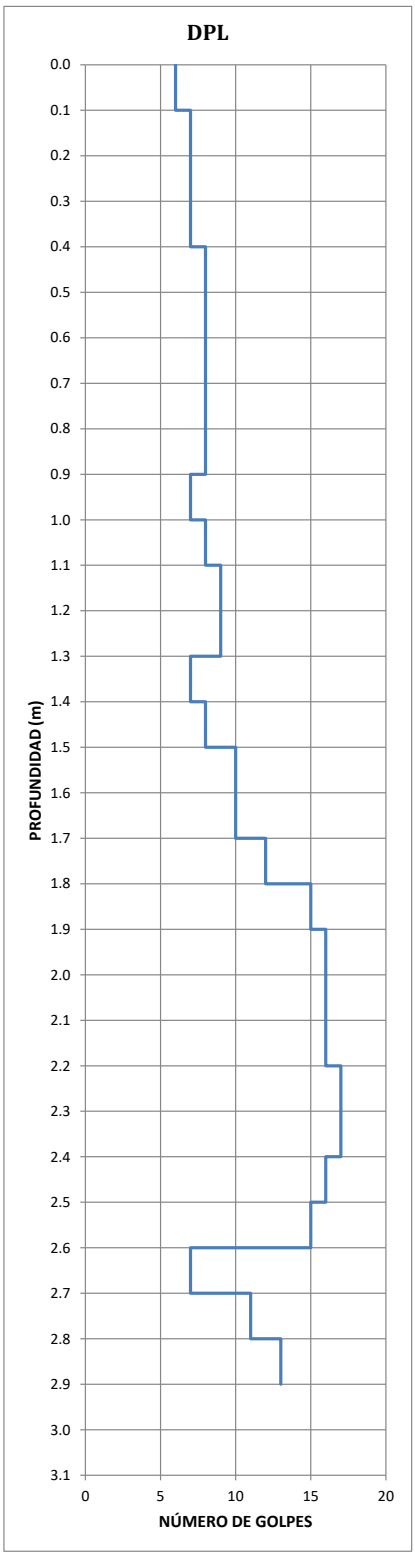
Profundidad: 3.00 m

PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)

NTP 339.159

DPL

PROFUNDIDAD (m)	NRO DE GOLPES
0.10	6
0.20	7
0.30	7
0.40	7
0.50	8
0.60	8
0.70	8
0.80	8
0.90	8
1.00	7
1.10	8
1.20	9
1.30	9
1.40	7
1.50	8
1.60	10
1.70	10
1.80	12
1.90	15
2.00	16
2.10	16
2.20	16
2.30	17
2.40	17
2.50	16
2.60	15
2.70	7
2.80	11
2.90	13



CORRELACIÓN ENTRE DPL Y SPT

$$W_0 = N * W * H = q_{din} * A * E$$

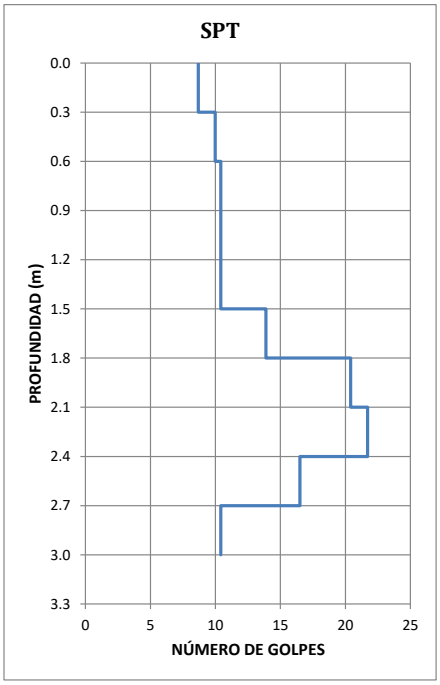
$$q_{din} = \frac{N_{SPT} * W_{SPT} * H_{SPT}}{A_{SPT} * E_{SPT}} = \frac{N_{DPL} * W_{DPL} * H_{DPL}}{A_{DPL} * E_{DPL}}$$

$$N_{SPT} = N_{DPL} * \frac{W_{DPL} * H_{DPL}}{A_{DPL} * E_{DPL}} * \frac{A_{SPT} * E_{SPT}}{W_{SPT} * H_{SPT}}$$

Tipo Penetrómetro	DPL	SPT
Peso de Martillo W (kg)	10.00	63.50
Altura de Caída H (cm)	50.00	76.20
Área de Punta A (cm2)	4.82	20.27
Espesor de Hinca E (cm)	30.00	30.00

SPT

PROFUNDIDAD (m)	NRO DE GOLPES
0.30	8.68
0.60	9.99
0.90	10.42
1.20	10.42
1.50	10.42
1.80	13.89
2.10	20.40
2.40	21.71
2.70	16.50
3.00	10.42



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA

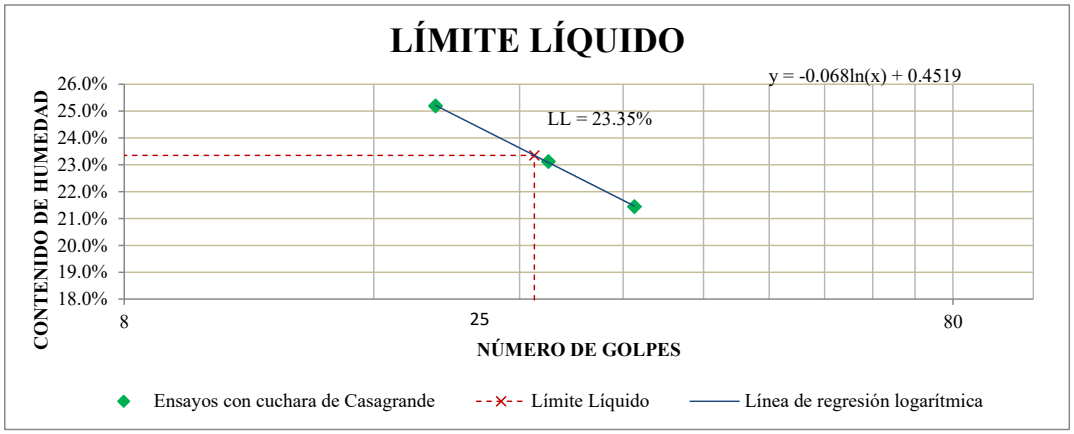
Proyecto: TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025
Ubicación: PROVINCIAS CANAS - CHUMBIVILCAS, DEPARTAMENTO CUSCO
Solicita: Br. EDITH ANALY USCAMAYTA ASLLA
Br. MILAGROS YANINA PARI QUISPE
Fecha: 18 de Abril del 2026

Calicata: C-01
Profundidad: 3.00 m

LÍMITE LÍQUIDO

NTP 339.129

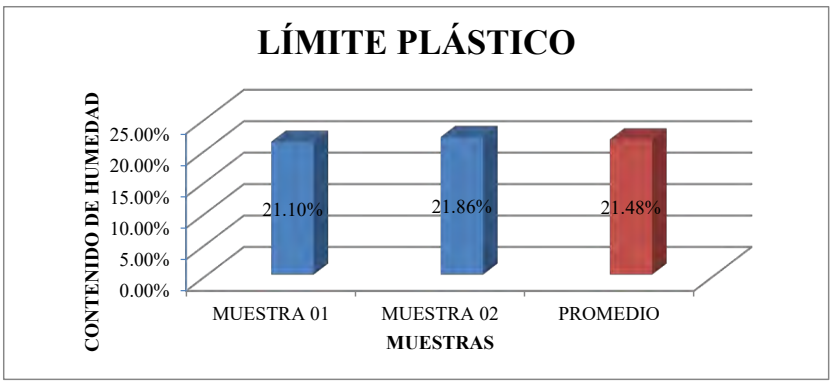
DESCRIPCIÓN	MUESTRA 01	MUESTRA 02	MUESTRA 03
NÚMERO DE GOLPES	**33**	**26**	**19**
Peso de Capsula (gr)	6.5	6.4	6.4
Peso de Capsula + Muestra Húmeda (gr)	**22.3**	**22.8**	**22.4**
Peso de Capsula + Muestra Seca (gr)	**19.5**	**19.7**	**19.2**
Peso del Agua (gr)	2.79	3.08	3.22
Peso de la Muestra Seca (gr)	13.01	13.32	12.78
CONTENIDO DE HUMEDAD	**21.45%**	**23.12%**	**25.20%**



LÍMITE PLÁSTICO

NTP 339.129

DESCRIPCIÓN	MUESTRA 01	MUESTRA 02
Peso de Capsula (gr)	6.2	6.5
Peso de Capsula + Muestra Húmeda (gr)	**12.8**	**12.8**
Peso de Capsula + Muestra Seca (gr)	**11.7**	**11.7**
Peso del Agua (gr)	1.15	1.13
Peso de la Muestra Seca (gr)	5.45	5.17
CONTENIDO DE HUMEDAD	**21.10%**	**21.86%**



LÍMITE LÍQUIDO = 23.35%
LÍMITE PLÁSTICO = 21.48%
ÍNDICE DE PLASTICIDAD = 1.87%

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA

EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO

Proyecto: TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025
Ubicación: PROVINCIAS CANAS - CHUMBIVILCAS, DEPARTAMENTO CUSCO
Solicita: Br. EDITH ANALY USCAMAYTA ASLLA
Br. MILAGROS YANINA PARI QUISPE
Fecha: 18 de Abril del 2026

Calicata: C-01
Profundidad: 3.00 m

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO

NTP 339.128

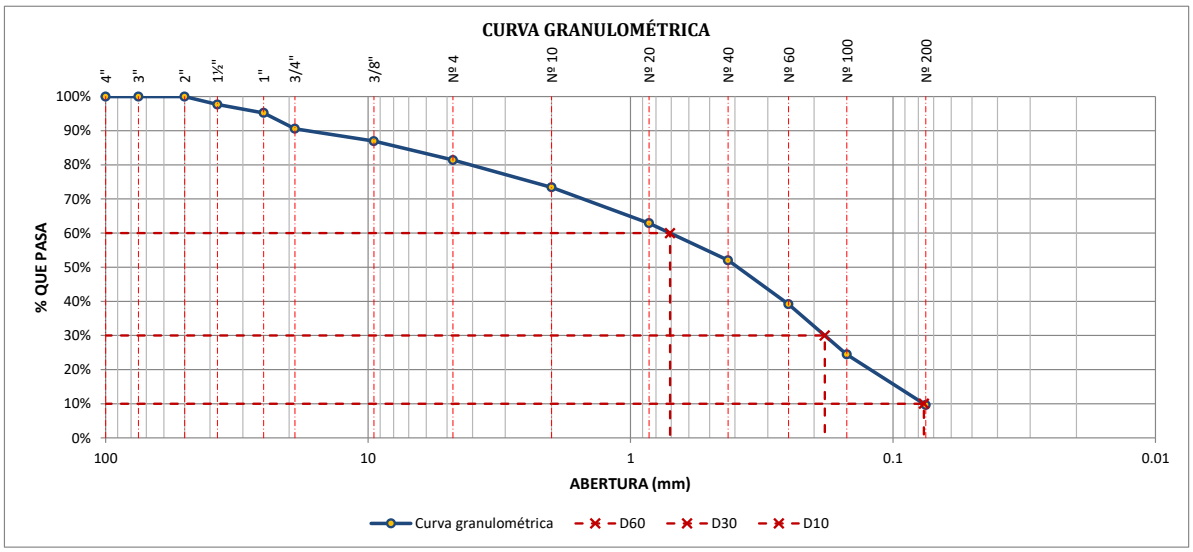
MATERIAL NO LAVADO	
Peso total de la muestra =	1,868.93 gr
Peso de la fracción de grava =	0.00 gr
Peso de la fracción de arena y finos =	1868.93 gr

FRACCIÓN DE MATERIAL LAVADO	
Peso de la fracción antes del lavado =	1868.93 gr
Peso de la fracción después de lavar =	1694.33 gr
% de la fracción lavada =	100.00%

TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO EN FRACCIÓN LAVADA	CORRECCIÓN EN FRACCIÓN LAVADA	% RETENIDO CORREGIDO EN FRACCIÓN LAVADA	% RETENIDO CORREGIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
4"	100	0.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
3"	75	0.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
2"	50	0.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
1½"	37.5	43.21	2.55%	0.02%	2.57%	2.33%	2.33%	97.67%
1"	25	45.84	2.71%	0.02%	2.73%	2.47%	4.80%	95.20%
3/4"	19	85.82	5.07%	0.04%	5.10%	4.63%	9.43%	90.57%
3/8"	9.5	67.35	3.98%	0.03%	4.01%	3.63%	13.06%	86.94%
Nº 4	4.75	102.45	6.05%	0.05%	6.09%	5.52%	18.58%	81.42%
Nº 10	2	148.25	8.75%	0.07%	8.82%	7.99%	26.58%	73.42%
Nº 20	0.850	195.21	11.52%	0.09%	11.61%	10.53%	37.10%	62.90%
Nº 40	0.425	201.82	11.91%	0.09%	12.00%	10.88%	47.99%	52.01%
Nº 60	0.250	238.22	14.06%	0.11%	14.17%	12.84%	60.83%	39.17%
Nº 100	0.150	273.25	16.13%	0.12%	16.25%	14.73%	75.56%	24.44%
Nº 200	0.075	274.43	16.20%	0.13%	16.32%	14.80%	90.36%	9.64%
Cazuela	-	5.49	0.32%	0.00%	0.33%	0.30%	90.66%	-
Lavado	-	174.60	-	-	-	9.34%	100.00%	-
FRACCIÓN RETENIDA EN LAVADO		**1681.34**	**99.23%**	**0.77%**	**100.00%**	**90.66%**		
TOTAL		**1855.94**	**%ERROR = 0.77% Ok!**		**-**	**100.00%**		

Fracciones de Grava, Arena y Finos de la Muestra	
% de grava (Retiene Tamiz Nº 4) =	18.58%
% de arena (Pasa Nº 4 y Ret. Nº 200) =	71.78%
% de finos (Pasa Tamiz Nº 200) =	9.64%
Total:	100.00%

Fracción Gruesa	
% de grava =	20.57%
% de arena =	79.43%
Total =	100.00%



TAMAÑO MÁXIMO ABSOLUTO = 2"

TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL = 3/4"

D60 = 0.71 mm
D30 = 0.18 mm
D10 = 0.076 mm

Cu = 9.27
Cc = 0.614

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA

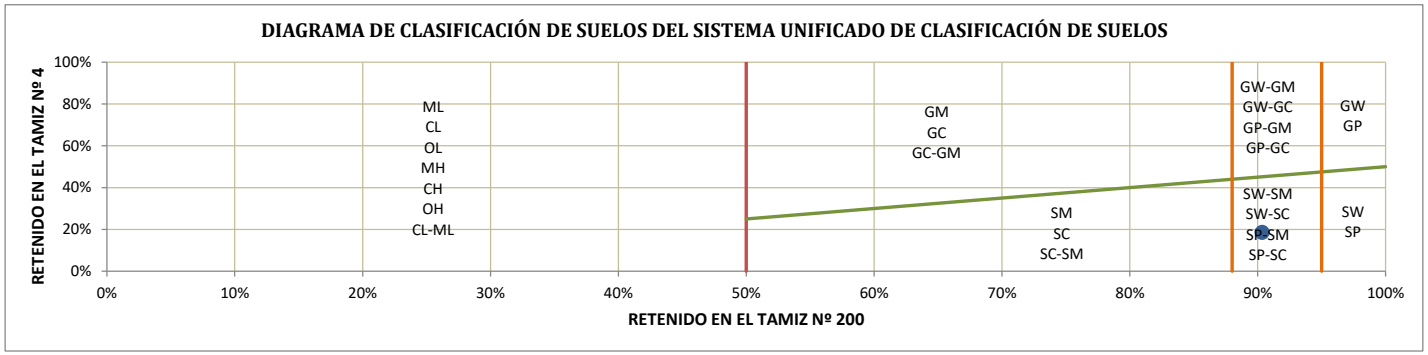
Proyecto: EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025
Ubicación: PROVINCIAS CANAS - CHUMBIVILCAS, DEPARTAMENTO CUSCO
Solicita: Br. EDITH ANALY USCAMAYTA ASLLA
Br. MILAGROS YANINA PARI QUISPE
Fecha: 18 de Abril del 2026

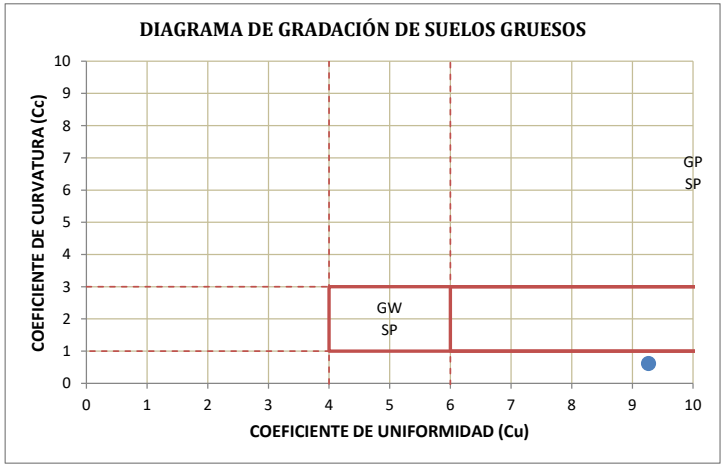
Calicata: C-01
Profundidad: 3.00 m

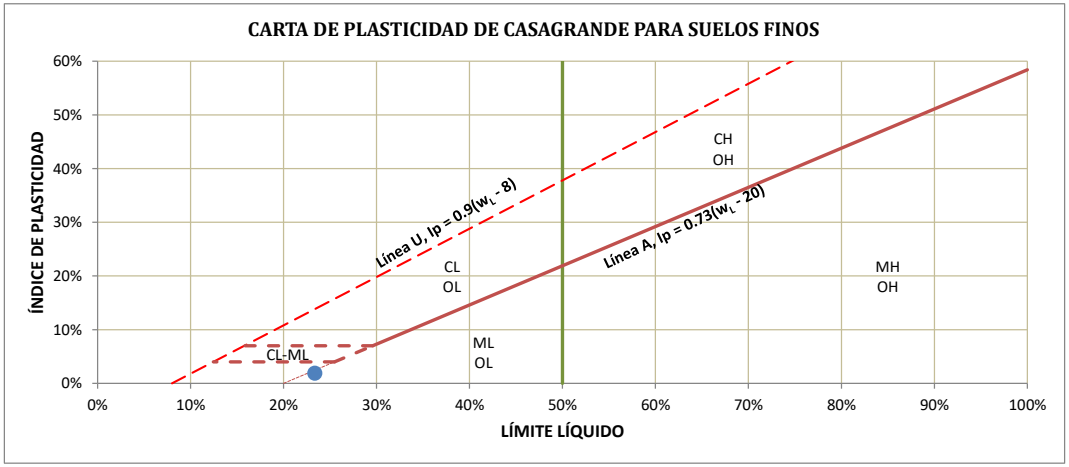
SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)

NTP 339.134

DATOS PARA CLASIFICACIÓN	
DE GRANULOMETRÍA	
% de Gruesos =	90.36%
% de Finos =	9.64%
Total =	100.00%
% de Grava =	18.58%
% de Arena =	71.78%
Total =	90.36%
Fracción Gruesa	
% de Grava =	20.57%
% de Arena =	79.43%
Total =	100.00%
Coeficientes	
Cu =	9.27
Cc =	0.614
DE LÍMITES DE CONSISTENCIA	
LL =	23.35%
LP =	21.48%
IP =	1.87%
Otros Datos	
Tipo =	







SP - SM = ARENA MAL GRADUADA CON LIMO Y GRAVA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA

Proyecto: EVALUACION GEOTECNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025
Ubicación: PROVINCIAS CANAS - CHUMBIVILCAS, DEPARTAMENTO CUSCO
Solicita: Br. EDITH ANALY USCAMAYTA ASLLA
Br. MILAGROS YANINA PARI QUISPE
Fecha: 18 de Abril del 2026

Calicata: C-01
Profundidad: 3.00 m

DENSIDAD EN CAMPO POR EL MÉTODO DEL CONO DE ARENA

NTP 339.143

DATOS DE LA ARENA	
Tipo de Arena utilizada:	Calibrada
Peso Unitario de la Arena (gr/cm^3) =	1.45

DATOS DEL ENSAYO	
Número de Cono	3
Peso del Frasco + Cono antes de usarlo (gr)	7495.00
Peso del Frasco + Cono después de usarlo (gr)	4082.00
Peso del Suelo Húmedo (gr)	4021.00
Peso de la Arena Utilizada, hueco + cono (gr)	3413.00
Peso de la Arena en el Cono (gr)	450.00
Peso de la Arena en el Hueco (gr)	2963.00
Volumen del Hueco (cm^3)	2075.50
Densidad Natural Húmeda (gr/cm^3)	1.94

CONTENIDO DE HUMEDAD	
Peso de Capsula (gr)	49.60
Peso de Capsula + Muestra Húmeda (gr)	151.50
Peso de Capsula + Muestra Seca (gr)	139.90
Peso del Agua (gr)	11.60
Peso de la Muestra Seca (gr)	98.20
Contenido de Humedad	11.81%

DENSIDAD NATURAL HUMEDA = 1.94 gr/cm3

DENSIDAD NATURAL SECA = 1.73 gr/cm3

PESO ESPECIFICO = 19.40 KN/m3

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA

Proyecto: EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025
Ubicación: PROVINCIAS CANAS - CHUMBIVILCAS, DEPARTAMENTO CUSCO
Solicita: Br. EDITH ANALY USCAMAYTA ASLLA
Br. MILAGROS YANINA PARI QUISPE
Fecha: 18 de Abril del 2026

Calicata: C-01
Profundidad: 3.00 m

CORTE DIRECTO

NTP 339.171

Velocidad de Deformación Horizontal =	1.00 mm/min

MUESTRA 1	
Altura incial	2cm
Lado de la caja	60mm
Área incial	36
Densidad seca	1.6
Humedad incial	11.11%

MUESTRA 2	
Altura incial	2cm
Lado de la caja	60mm
Área incial	36cm2
Densidad seca	1.6
Humedad incial	11.12%

MUESTRA 3	
Altura incial	2cm
Lado de la caja	60mm
Área incial	36cm2
Densidad seca	1.6
Humedad incial	11.11%

DEFORMÍMETRO DE LONGITUD DE CORTE	Esfuerzo normal	0.32
	Desplazamiento horizontal	Esfuerzo de cote
mm		
0.20	0.00	0.00
0.40	0.58	0.08
0.60	1.16	0.12
0.80	1.74	0.16
1.00	2.32	0.19
1.50	2.90	0.22
2.00	3.48	0.25
2.50	4.06	0.27
3.00	4.64	0.29
3.50	5.22	0.30
4.00	5.80	0.30
4.50	6.38	0.29
5.00	6.96	0.28
5.50	7.54	0.28
6.00	8.12	0.27
6.50	8.70	0.26
7.00	9.28	0.28
7.50	9.86	0.29
8.00	10.44	0.28
8.50	11.02	0.27
9.00	11.60	0.28
9.50	12.18	0.28
10.00	12.76	0.26
10.50	13.34	0.26
11.00	13.93	0.28
11.50	14.51	0.28
12.00	15.09	0.27
12.50	15.67	0.28
13.00	16.25	0.29
13.50	16.83	0.30

Esfuerzo normal	0.56
Desplazamiento horizontal	Esfuerzo de cote
0.00	0.00
0.58	0.14
1.16	0.22
1.74	0.28
2.32	0.32
2.90	0.36
3.48	0.39
4.06	0.41
4.64	0.43
5.22	0.44
5.80	0.44
6.38	0.43
6.96	0.42
7.54	0.42
8.12	0.41
8.70	0.42
9.28	0.43
9.86	0.43
10.44	0.44
11.02	0.44
11.60	0.43
12.18	0.42
12.76	0.41
13.34	0.42
13.93	0.43
14.51	0.43
15.09	0.42
15.67	0.43
16.25	0.41
16.83	0.42

Esfuerzo normal	1.2
Desplazamiento horizontal	Esfuerzo de cote
0.00	0.00
0.58	0.45
1.16	0.58
1.74	0.66
2.32	0.72
2.90	0.76
3.48	0.78
4.06	0.80
4.64	0.80
5.22	0.79
5.80	0.78
6.38	0.79
6.96	0.79
7.54	0.79
8.12	0.79
8.70	0.79
9.28	0.79
9.86	0.79
10.44	0.79
11.02	0.79
11.60	0.79
12.18	0.79
12.76	0.79
13.34	0.79
13.93	0.79
14.51	0.79
15.09	0.79
15.67	0.79
16.25	0.79
16.83	0.76

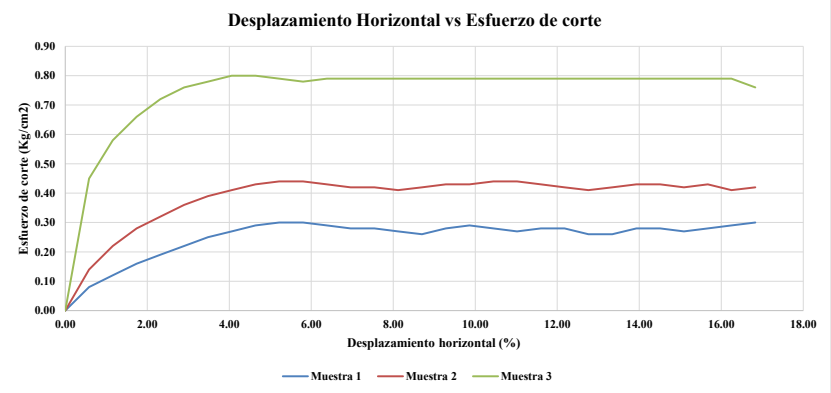
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA

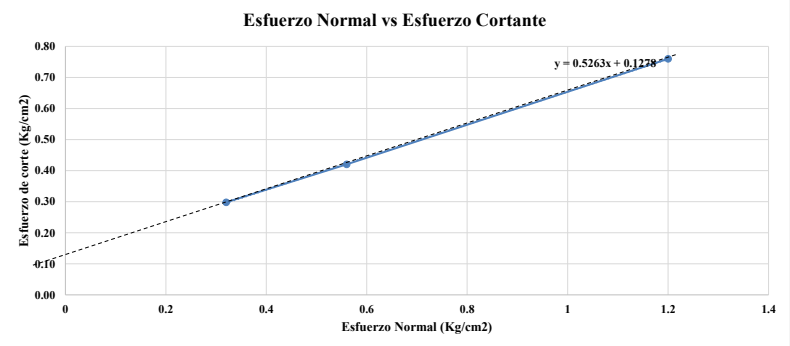
Proyecto: EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025
Ubicación: PROVINCIAS CANAS - CHUMBIVILCAS, DEPARTAMENTO CUSCO
Solicita: Br. EDITH ANALY USCAMAYTA ASLLA
Br. MILAGROS YANINA PARI QUISPE
Fecha: 18 de Abril del 2026

Calicata: C-01
Profundidad: 3.00 m

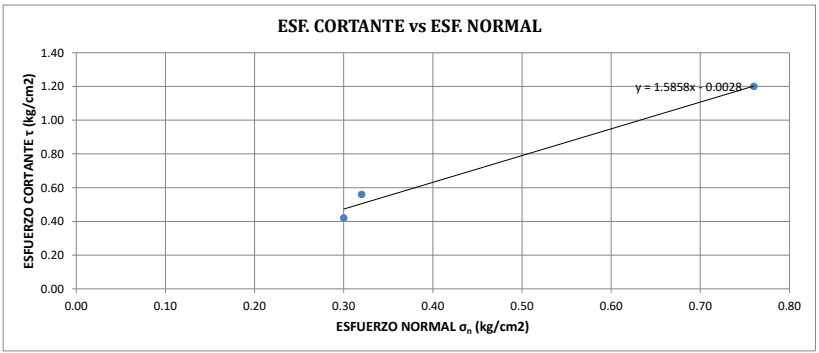
CORTE DIRECTO

NTP 339.171





Esfuerzo normal	Esfuerzo cortante
0.32	0.30
0.56	0.42
1.2	0.76



0.30	**0.32**	0.76
0.42	**0.56**	1.2

Cohesión = 12.78 KN/m2
Ángulo de fricción interna = 29.97°

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA

Proyecto: EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025

Ubicación: PROVINCIAS CANAS - CHUMBIVILCAS, DEPARTAMENTO CUSCO

Solicita: Br. EDITH ANALU USCAMAYTA ASLLA

Br. MILAGROS YANINA PARI QUISPE

Calicata: C-02

Fecha: 18 de Abril del 2026

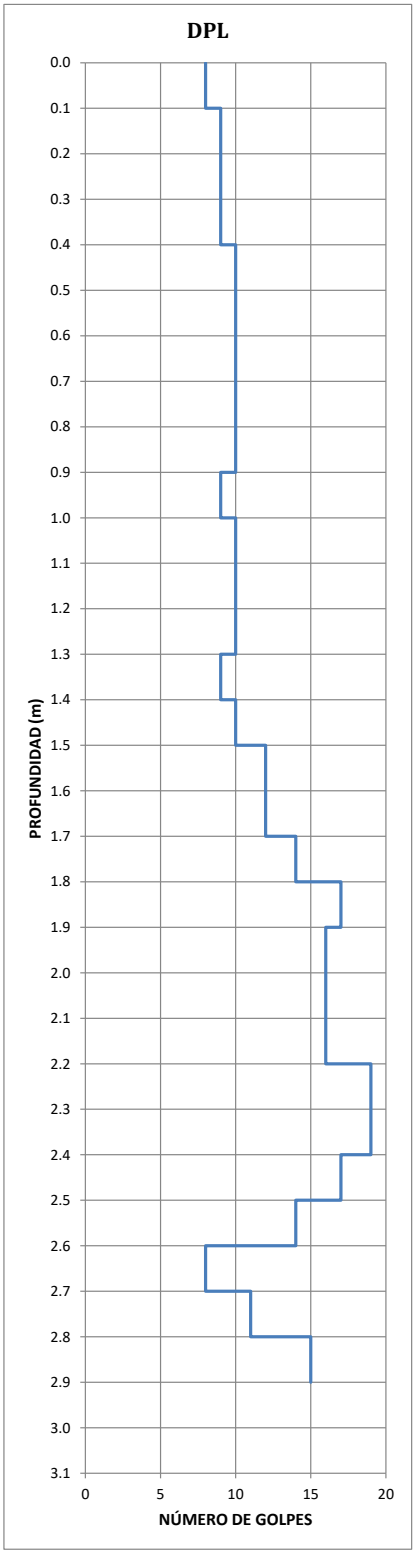
Profundidad: 3.00 m

PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)

NTP 339.159

DPL

PROFUNDIDAD (m)	NRO DE GOLPES
0.10	8
0.20	9
0.30	9
0.40	9
0.50	10
0.60	10
0.70	10
0.80	10
0.90	10
1.00	9
1.10	10
1.20	10
1.30	10
1.40	9
1.50	10
1.60	12
1.70	12
1.80	14
1.90	17
2.00	16
2.10	16
2.20	16
2.30	19
2.40	19
2.50	17
2.60	14
2.70	8
2.80	11
2.90	15



CORRELACIÓN ENTRE DPL Y SPT

$$W_0 = N * W * H = q_{din} * A * E$$

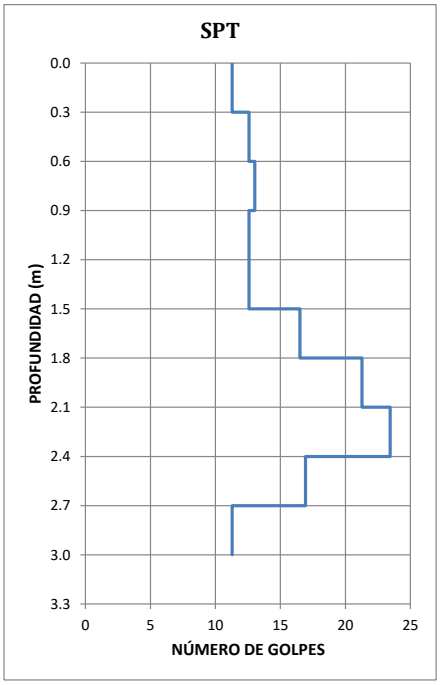
$$q_{din} = \frac{N_{SPT} * W_{SPT} * H_{SPT}}{A_{SPT} * E_{SPT}} = \frac{N_{DPL} * W_{DPL} * H_{DPL}}{A_{DPL} * E_{DPL}}$$

$$N_{SPT} = N_{DPL} * \frac{W_{DPL} * H_{DPL}}{A_{DPL} * E_{DPL}} * \frac{A_{SPT} * E_{SPT}}{W_{SPT} * H_{SPT}}$$

Tipo Penetrómetro	DPL	SPT
Peso de Martillo W (kg)	10.00	63.50
Altura de Caída H (cm)	50.00	76.20
Área de Punta A (cm2)	4.82	20.27
Espesor de Hinca E (cm)	30.00	30.00

SPT

PROFUNDIDAD (m)	NRO DE GOLPES
0.30	11.29
0.60	12.59
0.90	13.02
1.20	12.59
1.50	12.59
1.80	16.50
2.10	21.27
2.40	23.44
2.70	16.93
3.00	11.29



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA

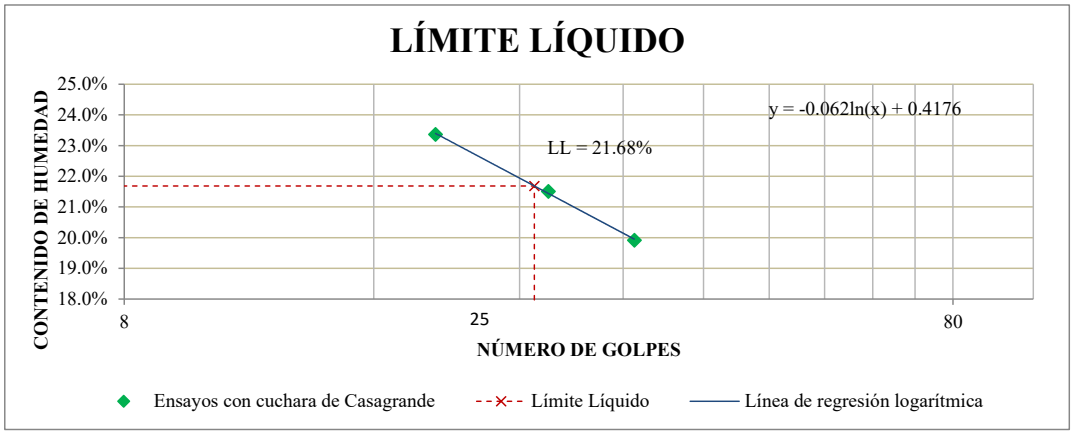
Proyecto: TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025
Ubicación: PROVINCIAS CANAS - CHUMBIVILCAS, DEPARTAMENTO CUSCO
Solicita: Br. EDITH ANALY USCAMAYTA ASLLA
Br. MILAGROS YANINA PARI QUISPE
Fecha: 18 de Abril del 2026

Calicata: C-02
Profundidad: 3.00 m

LÍMITE LÍQUIDO

NTP 339.129

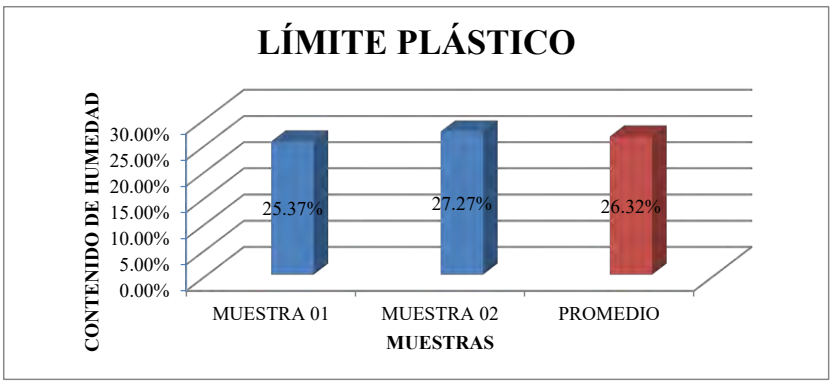
DESCRIPCIÓN	MUESTRA 01	MUESTRA 02	MUESTRA 03
NÚMERO DE GOLPES	**33**	**26**	**19**
Peso de Capsula (gr)	6.5	6.4	6.4
Peso de Capsula + Muestra Húmeda (gr)	**23.3**	**23.8**	**23.4**
Peso de Capsula + Muestra Seca (gr)	**20.5**	**20.7**	**20.2**
Peso del Agua (gr)	2.79	3.08	3.22
Peso de la Muestra Seca (gr)	14.01	14.32	13.78
CONTENIDO DE HUMEDAD	**19.91%**	**21.51%**	**23.37%**



LÍMITE PLÁSTICO

NTP 339.129

DESCRIPCIÓN	MUESTRA 01	MUESTRA 02
Peso de Capsula (gr)	6.7	6.7
Peso de Capsula + Muestra Húmeda (gr)	**15.1**	**15.1**
Peso de Capsula + Muestra Seca (gr)	**13.4**	**13.3**
Peso del Agua (gr)	1.70	1.80
Peso de la Muestra Seca (gr)	6.70	6.60
CONTENIDO DE HUMEDAD	**25.37%**	**27.27%**



LÍMITE LÍQUIDO = 21.68%
LÍMITE PLÁSTICO = 26.32%
-ÍNDICE DE PLASTICIDAD = 4.64%

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA

EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO

Proyecto: TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025
Ubicación: PROVINCIAS CANAS - CHUMBIVILCAS, DEPARTAMENTO CUSCO
Solicita: Br. EDITH ANALY USCAMAYTA ASLLA
Br. MILAGROS YANINA PARI QUISPE
Fecha: 18 de Abril del 2026

Calicata: C-02
Profundidad: 3.00 m

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO

NTP 339.128

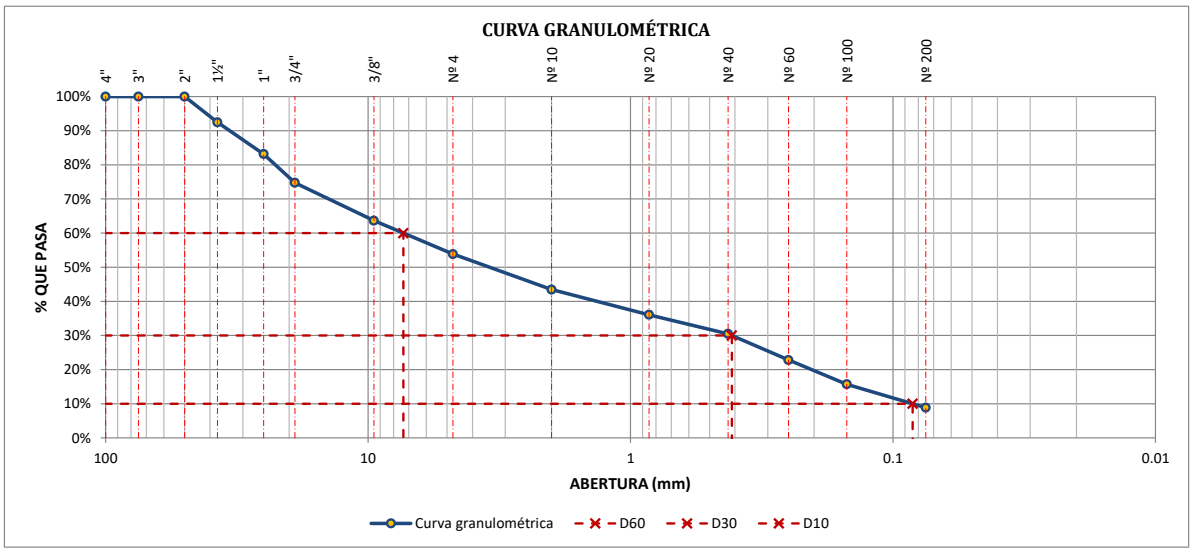
MATERIAL NO LAVADO	
Peso total de la muestra =	2,345.00 gr
Peso de la fracción de grava =	0.00 gr
Peso de la fracción de arena y finos =	2345.00 gr

FRACCIÓN DE MATERIAL LAVADO	
Peso de la fracción antes del lavado =	2345.00 gr
Peso de la fracción después de lavar =	2284.30 gr
% de la fracción lavada =	100.00%

TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO EN FRACCIÓN LAVADA	CORRECCIÓN EN FRACCIÓN LAVADA	% RETENIDO CORREGIDO EN FRACCIÓN LAVADA	% RETENIDO CORREGIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
4"	100	0.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
3"	75	0.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
2"	50	0.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
1½"	37.5	174.50	7.64%	0.08%	7.72%	7.52%	7.52%	92.48%
1"	25	216.72	9.49%	0.10%	9.59%	9.34%	16.86%	83.14%
3/4"	19	194.78	8.53%	0.09%	8.62%	8.39%	25.25%	74.75%
3/8"	9.5	257.56	11.28%	0.12%	11.39%	11.10%	36.35%	63.65%
Nº 4	4.75	227.45	9.96%	0.10%	10.06%	9.80%	46.15%	53.85%
Nº 10	2	241.50	10.57%	0.11%	10.68%	10.41%	56.55%	43.45%
Nº 20	0.850	171.48	7.51%	0.08%	7.59%	7.39%	63.94%	36.06%
Nº 40	0.425	129.35	5.66%	0.06%	5.72%	5.57%	69.52%	30.48%
Nº 60	0.250	178.21	7.80%	0.08%	7.88%	7.68%	77.20%	22.80%
Nº 100	0.150	164.95	7.22%	0.08%	7.30%	7.11%	84.30%	15.70%
Nº 200	0.075	158.63	6.94%	0.07%	7.02%	6.84%	91.14%	8.86%
Cazuela	-	145.60	6.37%	0.07%	6.44%	6.27%	97.41%	-
Lavado	-	60.70	-	-	-	2.59%	100.00%	-
FRACCIÓN RETENIDA EN LAVADO		**2260.73**	**98.97%**	**1.03%**	**100.00%**	**97.41%**		
TOTAL		**2321.43**	**%ERROR = 1.03% Ok!**		**-**	**100.00%**		

Fracciones de Grava, Arena y Finos de la Muestra	
% de grava (Retiene Tamiz Nº 4) =	46.15%
% de arena (Pasa Nº 4 y Ret. Nº 200) =	44.99%
% de finos (Pasa Tamiz Nº 200) =	8.86%
Total:	100.00%

Fracción Gruesa	
% de grava =	50.64%
% de arena =	49.36%
Total =	100.00%



TAMAÑO MÁXIMO ABSOLUTO = 2"

TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL = 1½"

D60 = 7.34 mm
D30 = 0.41 mm
D10 = 0.084 mm

Cu = 87.17
Cc = 0.274

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA

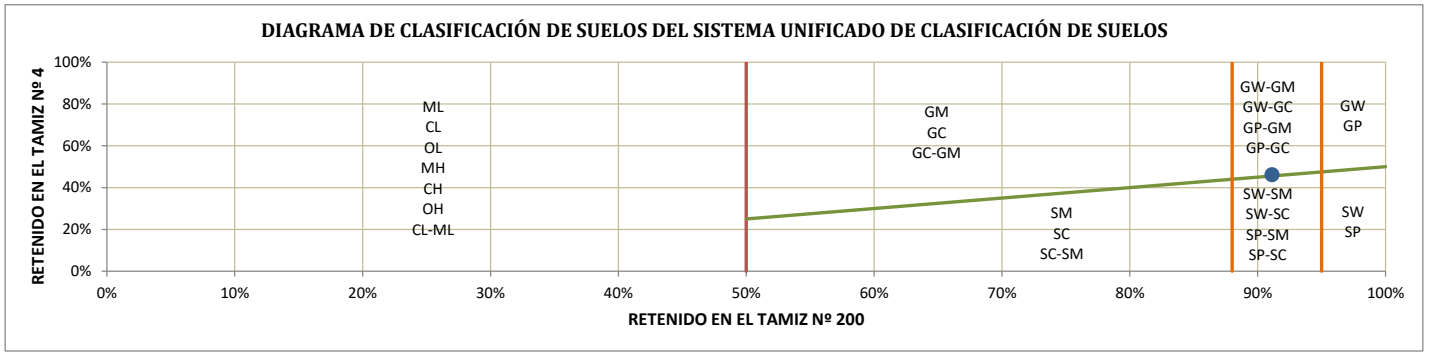
Proyecto: EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025
Ubicación: PROVINCIAS CANAS - CHUMBIVILCAS, DEPARTAMENTO CUSCO
Solicita: Br. EDITH ANALY USCAMAYTA ASLLA
Br. MILAGROS YANINA PARI QUISPE
Fecha: 18 de Abril del 2026

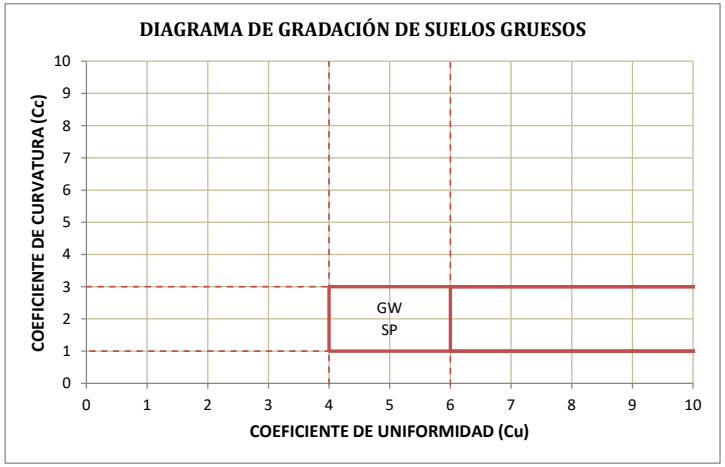
Calicata: C-02
Profundidad: 3.00 m

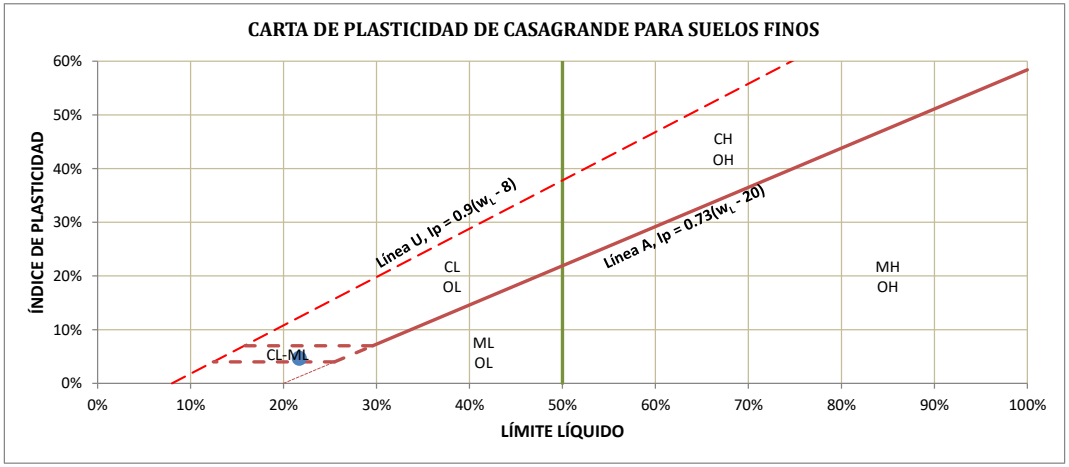
SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)

NTP 339.134

DATOS PARA CLASIFICACIÓN	
DE GRANULOMETRÍA	
% de Gruesos =	91.14%
% de Finos =	8.86%
Total =	100.00%
% de Grava =	46.15%
% de Arena =	44.99%
Total =	91.14%
Fracción Gruesa	
% de Grava =	50.64%
% de Arena =	49.36%
Total =	100.00%
Coeficientes	
Cu =	87.17
Cc =	0.274
DE LÍMITES DE CONSISTENCIA	
LL =	21.68%
LP =	26.32%
IP =	4.64%
Otros Datos	
Tipo =	







GP - GC = GRAVA MAL GRADUADA CON ARCILLA LIMOSA Y ARENOSA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA

Proyecto: EVALUACION GEOTECNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025
Ubicación: PROVINCIAS CANAS - CHUMBIVILCAS, DEPARTAMENTO CUSCO
Solicita: Br. EDITH ANALY USCAMAYTA ASLLA
Br. MILAGROS YANINA PARI QUISPE
Fecha: 18 de Abril del 2026

Calicata: C-02
Profundidad: 3.00 m

DENSIDAD EN CAMPO POR EL MÉTODO DEL CONO DE ARENA

NTP 339.143

DATOS DE LA ARENA	
Tipo de Arena utilizada:	Calibrada
Peso Unitario de la Arena (gr/cm^3) =	1.44

DATOS DEL ENSAYO	
Número de Cono	2
Peso del Frasco + Cono antes de usarlo (gr)	7495.00
Peso del Frasco + Cono después de usarlo (gr)	4082.00
Peso del Suelo Húmedo (gr)	4025.00
Peso de la Arena Utilizada, hueco + cono (gr)	3413.00
Peso de la Arena en el Cono (gr)	455.00
Peso de la Arena en el Hueco (gr)	2958.00
Volumen del Hueco (cm^3)	2089.50
Densidad Natural Húmeda (gr/cm^3)	1.93

CONTENIDO DE HUMEDAD	
Peso de Capsula (gr)	46.70
Peso de Capsula + Muestra Húmeda (gr)	169.50
Peso de Capsula + Muestra Seca (gr)	159.34
Peso del Agua (gr)	10.16
Peso de la Muestra Seca (gr)	97.70
Contenido de Humedad	10.40%

DENSIDAD NATURAL HUMEDA = 1.93 gr/cm3

DENSIDAD NATURAL SECA = 1.74 gr/cm3

PESO ESPECIFICO = 19.30 KN/m3

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA

Proyecto: EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025
Ubicación: PROVINCIAS CANAS - CHUMBIVILCAS, DEPARTAMENTO CUSCO
Solicita: Br. EDITH ANALY USCAMAYTA ASLLA
Br. MILAGROS YANINA PARI QUISPE
Fecha: 18 de Abril del 2026

Calicata: C-02
Profundidad: 3.00 m

CORTE DIRECTO

NTP 339.171

Velocidad de Deformación Horizontal =	1.00 mm/min

MUESTRA 1	
Altura incial	2cm
Lado de la caja	60mm
Área incial	36
Densidad seca	1.6
Humedad incial	11.11%

MUESTRA 2	
Altura incial	2cm
Lado de la caja	60mm
Área incial	36cm2
Densidad seca	1.6
Humedad incial	11.12%

MUESTRA 3	
Altura incial	2cm
Lado de la caja	60mm
Área incial	36cm2
Densidad seca	1.6
Humedad incial	11.11%

DEFORMÍMETRO DE LONGITUD DE CORTE	Esfuerzo normal Desplazamiento horizontal	0.25 Esfuerzo de cote	Esfuerzo normal Desplazamiento horizontal	0.51 Esfuerzo de cote	Esfuerzo normal Desplazamiento horizontal	1.02 Esfuerzo de cote
mm						
0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.40	0.58	0.11	0.58	0.18	0.58	0.30
0.60	1.16	0.15	1.16	0.27	1.16	0.45
0.80	1.74	0.17	1.74	0.33	1.74	0.58
1.00	2.32	0.19	2.32	0.36	2.32	0.66
1.50	2.90	0.21	2.90	0.39	2.90	0.68
2.00	3.48	0.21	3.48	0.42	3.48	0.69
2.50	4.06	0.22	4.06	0.44	4.06	0.68
3.00	4.64	0.23	4.64	0.46	4.64	0.68
3.50	5.22	0.23	5.22	0.45	5.22	0.68
4.00	5.80	0.22	5.80	0.44	5.80	0.67
4.50	6.38	0.23	6.38	0.43	6.38	0.66
5.00	6.96	0.23	6.96	0.42	6.96	0.67
5.50	7.54	0.23	7.54	0.42	7.54	0.66
6.00	8.12	0.24	8.12	0.41	8.12	0.66
6.50	8.70	0.23	8.70	0.41	8.70	0.67
7.00	9.28	0.24	9.28	0.40	9.28	0.67
7.50	9.86	0.25	9.86	0.40	9.86	0.65
8.00	10.44	0.25	10.44	0.40	10.44	0.64
8.50	11.02	0.25	11.02	0.39	11.02	0.65
9.00	11.60	0.25	11.60	0.39	11.60	0.66
9.50	12.18	0.25	12.18	0.39	12.18	0.66
10.00	12.76	0.25	12.76	0.39	12.76	0.67
10.50	13.34	0.25	13.34	0.39	13.34	0.67
11.00	13.93	0.24	13.93	0.38	13.93	0.65
11.50	14.51	0.23	14.51	0.36	14.51	0.68
12.00	15.09	0.24	15.09	0.36	15.09	0.67
12.50	15.67	0.25	15.67	0.38	15.67	0.66
13.00	16.25	0.24	16.25	0.38	16.25	0.67
13.50	16.83	0.23	16.83	0.38	16.83	0.68

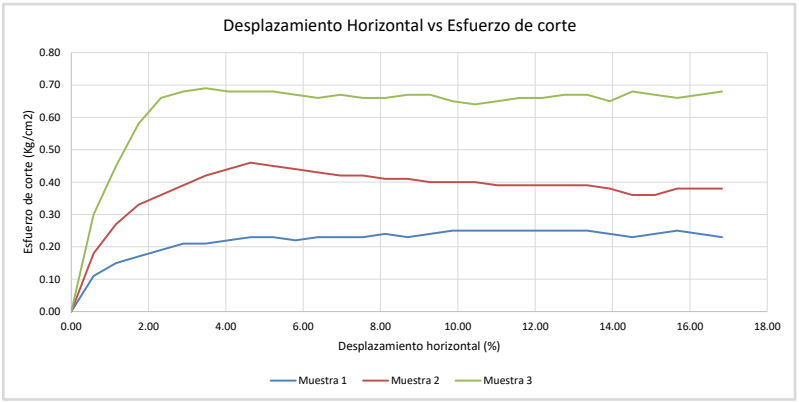
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA

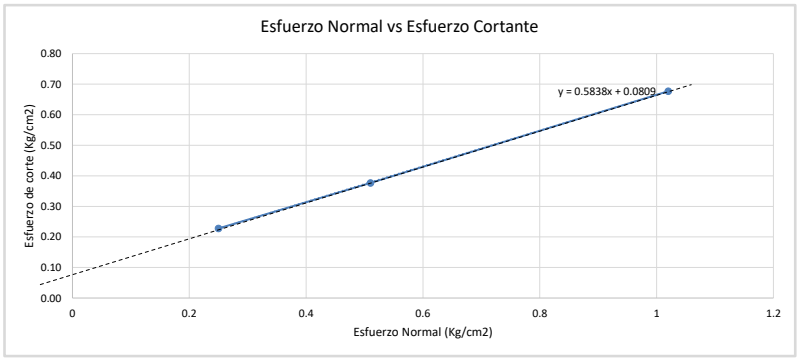
Proyecto: EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025
Ubicación: PROVINCIAS CANAS - CHUMBIVILCAS, DEPARTAMENTO CUSCO
Solicita: Br. EDITH ANALY USCAMAYTA ASLLA
Br. MILAGROS YANINA PARI QUISPE
Fecha: 18 de Abril del 2026

Calicata: C-02
Profundidad: 3.00 m

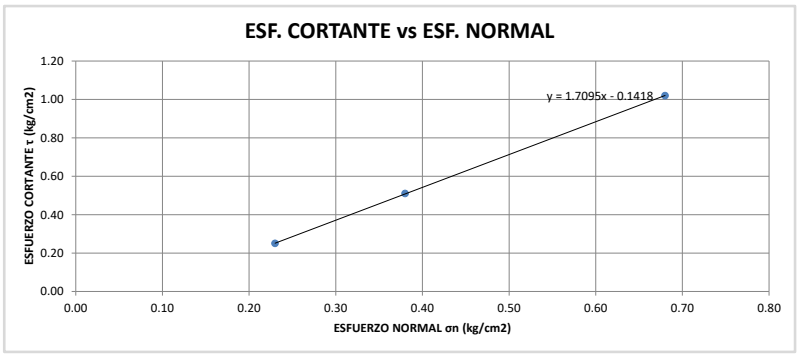
CORTE DIRECTO

NTP 339.171





Esfuerzo normal	Esfuerzo cortante
0.25	0.23
0.51	0.38
1.02	0.68



Esfuerzo cortante	**0.23**	**0.38**	0.68
Esfuerzo normal	**0.25**	**0.51**	1.02

Cohesión = 8.09 KN/m2
Ángulo de fricción interna = 29.64°

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA

Proyecto: EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025

Ubicación: PROVINCIAS CANAS - CHUMBIVILCAS, DEPARTAMENTO CUSCO

Solicita: Br. EDITH ANALU USCAMAYTA ASLLA
Br. MILAGROS YANINA PARI QUISPE

Calicata: C-03

Fecha: 18 de Abril del 2026

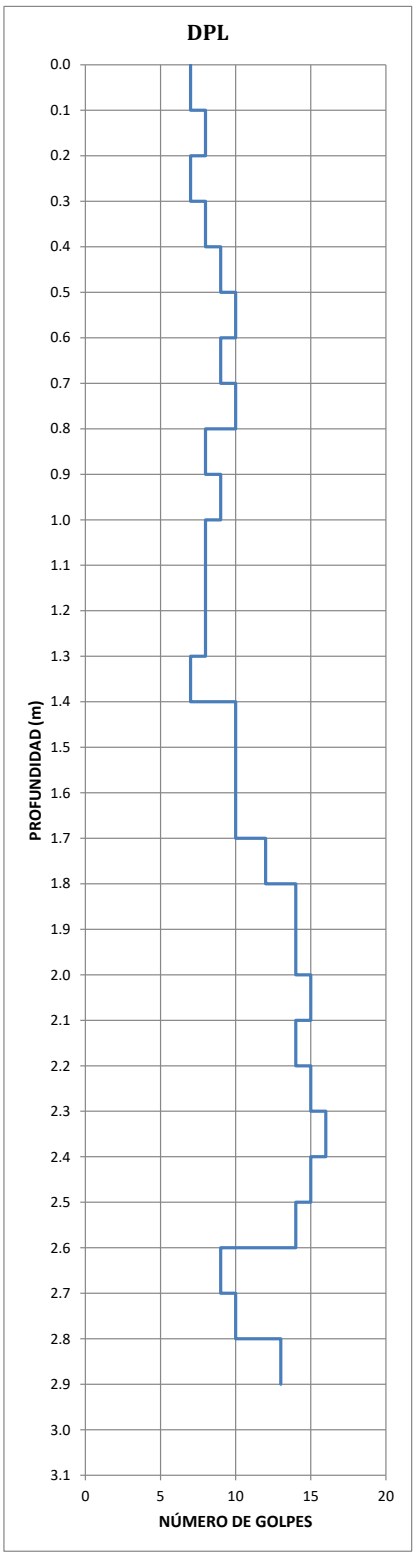
Profundidad: 3.00 m

PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)

NTP 339.159

DPL

PROFUNDIDAD (m)	NRO DE GOLPES
0.10	7
0.20	8
0.30	7
0.40	8
0.50	9
0.60	10
0.70	9
0.80	10
0.90	8
1.00	9
1.10	8
1.20	8
1.30	8
1.40	7
1.50	10
1.60	10
1.70	10
1.80	12
1.90	14
2.00	14
2.10	15
2.20	14
2.30	15
2.40	16
2.50	15
2.60	14
2.70	9
2.80	10
2.90	13



CORRELACIÓN ENTRE DPL Y SPT

$$W_0 = N * W * H = q_{din} * A * E$$

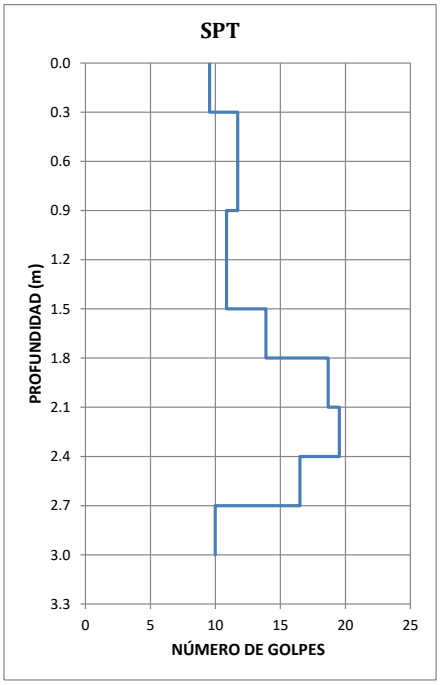
$$q_{din} = \frac{N_{SPT} * W_{SPT} * H_{SPT}}{A_{SPT} * E_{SPT}} = \frac{N_{DPL} * W_{DPL} * H_{DPL}}{A_{DPL} * E_{DPL}}$$

$$N_{SPT} = N_{DPL} * \frac{W_{DPL} * H_{DPL}}{A_{DPL} * E_{DPL}} * \frac{A_{SPT} * E_{SPT}}{W_{SPT} * H_{SPT}}$$

Tipo Penetrómetro	DPL	SPT
Peso de Martillo W (kg)	10.00	63.50
Altura de Caída H (cm)	50.00	76.20
Área de Punta A (cm2)	4.82	20.27
Espesor de Hinca E (cm)	30.00	30.00

SPT

PROFUNDIDAD (m)	NRO DE GOLPES
0.30	9.55
0.60	11.72
0.90	11.72
1.20	10.85
1.50	10.85
1.80	13.89
2.10	18.67
2.40	19.54
2.70	16.50
3.00	9.99



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA

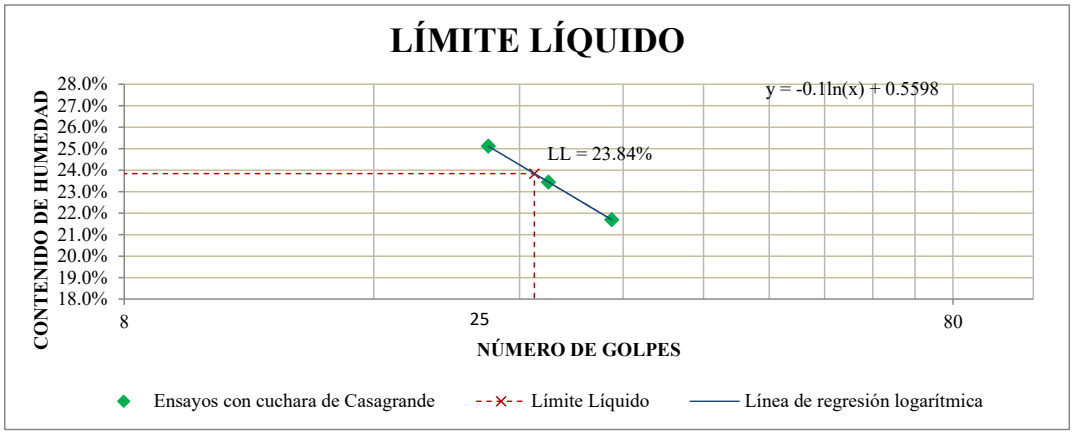
Proyecto: TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025
Ubicación: PROVINCIAS CANAS - CHUMBIVILCAS, DEPARTAMENTO CUSCO
Solicita: Br. EDITH ANALY USCAMAYTA ASLLA
Br. MILAGROS YANINA PARI QUISPE
Fecha: 18 de Abril del 2026

Calicata: C-03
Profundidad: 3.00 m

LÍMITE LÍQUIDO

NTP 339.129

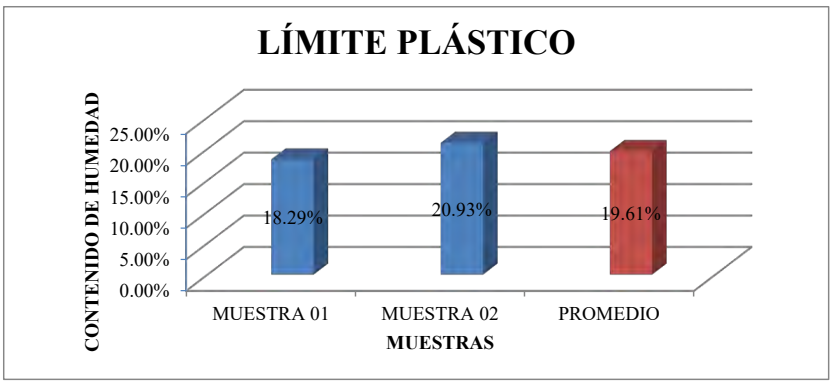
DESCRIPCIÓN	MUESTRA 01	MUESTRA 02	MUESTRA 03
NÚMERO DE GOLPES	**31**	**26**	**22**
Peso de Capsula (gr)	31.7	27.9	30.7
Peso de Capsula + Muestra Húmeda (gr)	**49.9**	**44.6**	**49.5**
Peso de Capsula + Muestra Seca (gr)	**46.6**	**41.5**	**45.7**
Peso del Agua (gr)	3.23	3.17	3.78
Peso de la Muestra Seca (gr)	14.89	13.52	15.05
CONTENIDO DE HUMEDAD	**21.69%**	**23.45%**	**25.12%**



LÍMITE PLÁSTICO

NTP 339.129

DESCRIPCIÓN	MUESTRA 01	MUESTRA 02
Peso de Capsula (gr)	6.3	6.5
Peso de Capsula + Muestra Húmeda (gr)	**14.1**	**14.1**
Peso de Capsula + Muestra Seca (gr)	**12.9**	**12.8**
Peso del Agua (gr)	1.20	1.31
Peso de la Muestra Seca (gr)	6.56	6.26
CONTENIDO DE HUMEDAD	**18.29%**	**20.93%**



LÍMITE LÍQUIDO = 23.84%
LÍMITE PLÁSTICO = 19.61%
ÍNDICE DE PLASTICIDAD = 4.23%

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA

EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO

Proyecto: TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025
Ubicación: PROVINCIAS CANAS - CHUMBIVILCAS, DEPARTAMENTO CUSCO
Solicita: Br. EDITH ANALY USCAMAYTA ASLLA
Br. MILAGROS YANINA PARI QUISPE
Fecha: 18 de Abril del 2026

Calicata: C-03
Profundidad: 3.00 m

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO

NTP 339.128

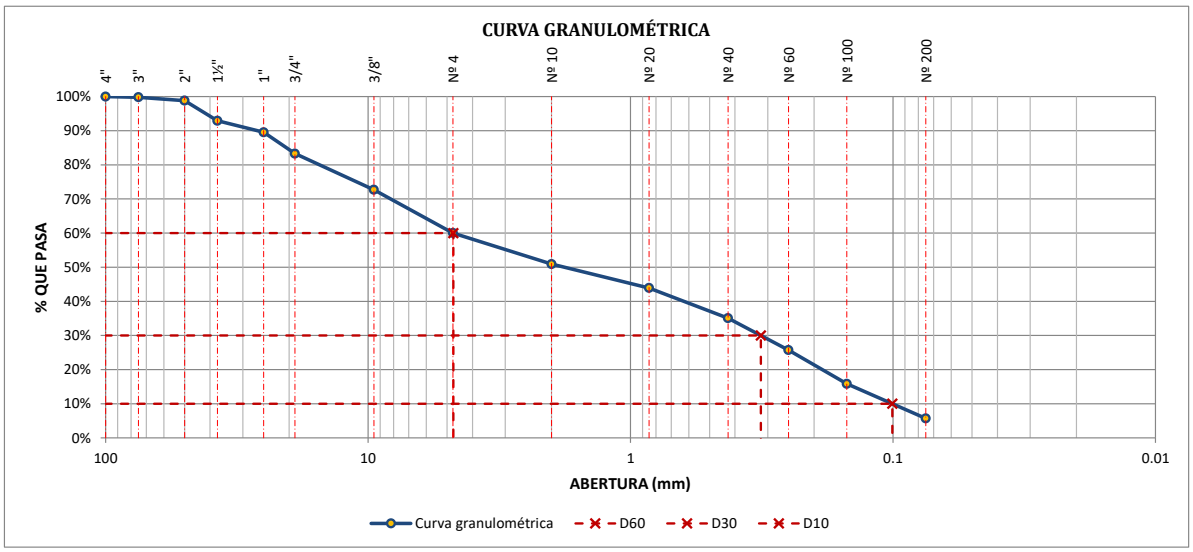
MATERIAL NO LAVADO	
Peso total de la muestra =	2,814.20 gr
Peso de la fracción de grava =	0.00 gr
Peso de la fracción de arena y finos =	2814.20 gr

FRACCIÓN DE MATERIAL LAVADO	
Peso de la fracción antes del lavado =	2814.20 gr
Peso de la fracción después de lavar =	2714.60 gr
% de la fracción lavada =	100.00%

TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO EN FRACCIÓN LAVADA	CORRECCIÓN EN FRACCIÓN LAVADA	% RETENIDO CORREGIDO EN FRACCIÓN LAVADA	% RETENIDO CORREGIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
4"	100	0.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%
3"	75	5.30	0.20%	0.00%	0.20%	0.19%	0.19%	99.81%
2"	50	27.95	1.03%	0.00%	1.03%	1.00%	1.19%	98.81%
1½"	37.5	165.43	6.09%	0.03%	6.12%	5.90%	7.09%	92.91%
1"	25	94.63	3.49%	0.01%	3.50%	3.38%	10.47%	89.53%
3/4"	19	174.73	6.44%	0.03%	6.46%	6.24%	16.70%	83.30%
3/8"	9.5	297.45	10.96%	0.05%	11.00%	10.61%	27.32%	72.68%
Nº 4	4.75	354.40	13.06%	0.06%	13.11%	12.65%	39.96%	60.04%
Nº 10	2	255.70	9.42%	0.04%	9.46%	9.12%	49.09%	50.91%
Nº 20	0.850	195.78	7.21%	0.03%	7.24%	6.99%	56.08%	43.92%
Nº 40	0.425	248.40	9.15%	0.04%	9.19%	8.86%	64.94%	35.06%
Nº 60	0.250	261.54	9.63%	0.04%	9.68%	9.33%	74.27%	25.73%
Nº 100	0.150	276.59	10.19%	0.04%	10.23%	9.87%	84.14%	15.86%
Nº 200	0.075	284.63	10.49%	0.04%	10.53%	10.16%	94.30%	5.70%
Cazuela	-	60.50	2.23%	0.01%	2.24%	2.16%	96.46%	-
Lavado	-	99.60	-	-	-	3.54%	100.00%	-
FRACCIÓN RETENIDA EN LAVADO		**2703.03**	**99.57%**	**0.43%**	**100.00%**	**96.46%**		
TOTAL		**2802.63**	**%ERROR = 0.43% Ok!**		**-**	**100.00%**		

Fracciones de Grava, Arena y Finos de la Muestra	
% de grava (Retiene Tamiz Nº 4) =	39.96%
% de arena (Pasa Nº 4 y Ret. Nº 200) =	54.34%
% de finos (Pasa Tamiz Nº 200) =	5.70%
Total:	100.00%

Fracción Gruesa	
% de grava =	42.38%
% de arena =	57.62%
Total =	100.00%



TAMAÑO MÁXIMO ABSOLUTO = 4"	TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL = 1½"

D60 = 4.73 mm
D30 = 0.32 mm
D10 = 0.101 mm

Cu = 47.06
Cc = 0.213

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA

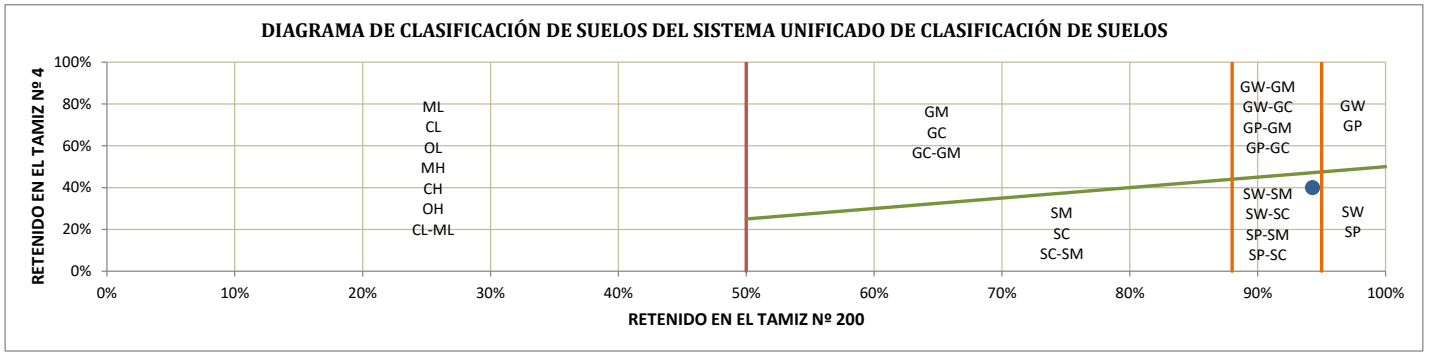
Proyecto: EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025
Ubicación: PROVINCIAS CANAS - CHUMBIVILCAS, DEPARTAMENTO CUSCO
Solicita: Br. EDITH ANALY USCAMAYTA ASLLA
Br. MILAGROS YANINA PARI QUISPE
Fecha: 18 de Abril del 2026

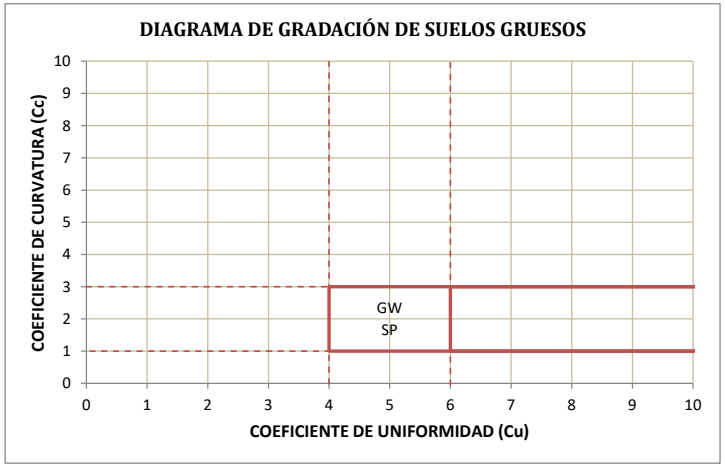
Calicata: C-03
Profundidad: 3.00 m

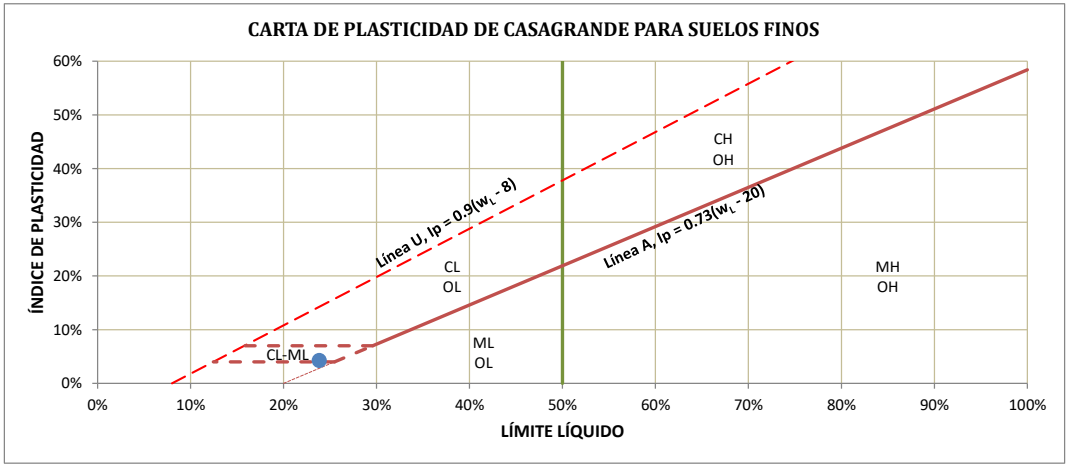
SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)

NTP 339.134

DATOS PARA CLASIFICACIÓN	
DE GRANULOMETRÍA	
% de Gruesos =	94.30%
% de Finos =	5.70%
Total =	100.00%
% de Grava =	39.96%
% de Arena =	54.34%
Total =	94.30%
Fracción Gruesa	
% de Grava =	42.38%
% de Arena =	57.62%
Total =	100.00%
Coeficientes	
Cu =	47.06
Cc =	0.213
DE LÍMITES DE CONSISTENCIA	
LL =	23.84%
LP =	19.61%
IP =	4.23%
Otros Datos	
Tipo =	







SP - SC = ARENA MAL GRADUADA CON ARCILLA LIMOSA Y GRAVOSA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA

Proyecto: EVALUACION GEOTECNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025
Ubicación: PROVINCIAS CANAS - CHUMBIVILCAS, DEPARTAMENTO CUSCO
Solicita: Br. EDITH ANALY USCAMAYTA ASLLA
Br. MILAGROS YANINA PARI QUISPE
Fecha: 18 de Abril del 2026

Calicata: C-03
Profundidad: 3.00 m

DENSIDAD EN CAMPO POR EL MÉTODO DEL CONO DE ARENA

NTP 339.143

DATOS DE LA ARENA	
Tipo de Arena utilizada:	Calibrada
Peso Unitario de la Arena (gr/cm^3) =	1.44

DATOS DEL ENSAYO	
Número de Cono	4
Peso del Frasco + Cono antes de usarlo (gr)	7495.00
Peso del Frasco + Cono después de usarlo (gr)	4072.00
Peso del Suelo Húmedo (gr)	4025.00
Peso de la Arena Utilizada, hueco + cono (gr)	3423.00
Peso de la Arena en el Cono (gr)	435.00
Peso de la Arena en el Hueco (gr)	2988.00
Volumen del Hueco (cm^3)	2134.50
Densidad Natural Húmeda (gr/cm^3)	1.89

CONTENIDO DE HUMEDAD	
Peso de Capsula (gr)	46.70
Peso de Capsula + Muestra Húmeda (gr)	168.50
Peso de Capsula + Muestra Seca (gr)	157.30
Peso del Agua (gr)	11.20
Peso de la Muestra Seca (gr)	103.40
Contenido de Humedad	10.83%

DENSIDAD NATURAL HUMEDA = 1.89 gr/cm3

DENSIDAD NATURAL SECA = 1.70 gr/cm3

PESO ESPECIFICO = 18.9 KN/m3

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA

Proyecto: EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025
Ubicación: PROVINCIAS CANAS - CHUMBIVILCAS, DEPARTAMENTO CUSCO
Solicita: Br. EDITH ANALY USCAMAYTA ASLLA
Br. MILAGROS YANINA PARI QUISPE
Fecha: 18 de Abril del 2026

Calicata: C-03
Profundidad: 3.00 m

CORTE DIRECTO

NTP 339.171

Velocidad de Deformación Horizontal =	1.00 mm/min

MUESTRA 1	
Altura incial	2cm
Lado de la caja	60mm
Área incial	36
Densidad seca	1.61
Humedad incial	11.11%

MUESTRA 2	
Altura incial	2cm
Lado de la caja	60mm
Área incial	36cm2
Densidad seca	1.61
Humedad incial	11.12%

MUESTRA 3	
Altura incial	2cm
Lado de la caja	60mm
Área incial	36cm2
Densidad seca	1.61
Humedad incial	11.11%

DEFORMÍMETRO DE LONGITUD DE CORTE	Esfuerzo normal	0.32
	Desplazamiento horizontal	Esfuerzo de cote
mm		
0.20	0.00	0.00
0.40	0.58	0.11
0.60	1.16	0.15
0.80	1.74	0.17
1.00	2.32	0.19
1.50	2.90	0.21
2.00	3.48	0.22
2.50	4.06	0.23
3.00	4.64	0.24
3.50	5.22	0.24
4.00	5.80	0.23
4.50	6.38	0.23
5.00	6.96	0.23
5.50	7.54	0.23
6.00	8.12	0.24
6.50	8.70	0.24
7.00	9.28	0.24
7.50	9.86	0.24
8.00	10.44	0.25
8.50	11.02	0.25
9.00	11.60	0.25
9.50	12.18	0.25
10.00	12.76	0.25
10.50	13.34	0.25
11.00	13.93	0.24
11.50	14.51	0.23
12.00	15.09	0.24
12.50	15.67	0.25
13.00	16.25	0.24
#¡REF!	16.83	0.24

Esfuerzo normal	0.53
Desplazamiento horizontal	Esfuerzo de cote
0.00	0.00
0.58	0.18
1.16	0.27
1.74	0.33
2.32	0.36
2.90	0.39
3.48	0.42
4.06	0.44
4.64	0.46
5.22	0.45
5.80	0.44
6.38	0.43
6.96	0.42
7.54	0.42
8.12	0.41
8.70	0.41
9.28	0.40
9.86	0.40
10.44	0.40
11.02	0.39
11.60	0.39
12.18	0.39
12.76	0.39
13.34	0.39
13.93	0.38
14.51	0.36
15.09	0.36
15.67	0.38
16.25	0.38
16.83	0.38

Esfuerzo normal	1.11
Desplazamiento horizontal	Esfuerzo de cote
0.00	0.00
0.58	0.30
1.16	0.45
1.74	0.58
2.32	0.66
2.90	0.66
3.48	0.66
4.06	0.66
4.64	0.67
5.22	0.68
5.80	0.69
6.38	0.68
6.96	0.67
7.54	0.68
8.12	0.67
8.70	0.67
9.28	0.66
9.86	0.65
10.44	0.66
11.02	0.66
11.60	0.67
12.18	0.68
12.76	0.66
13.34	0.66
13.93	0.67
14.51	0.68
15.09	0.68
15.67	0.66
16.25	0.67
16.83	0.68

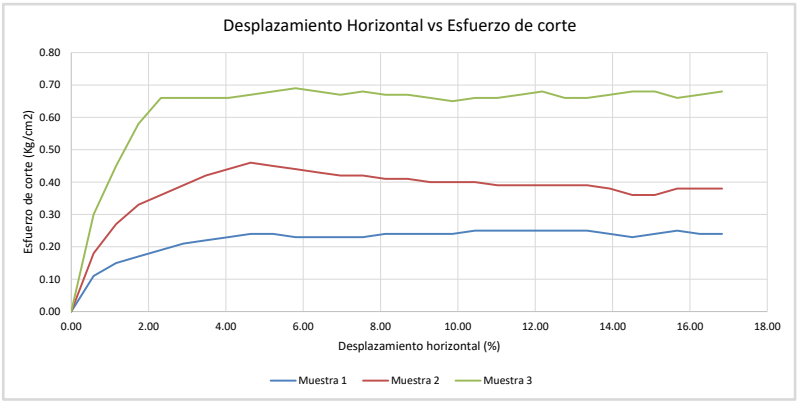
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA

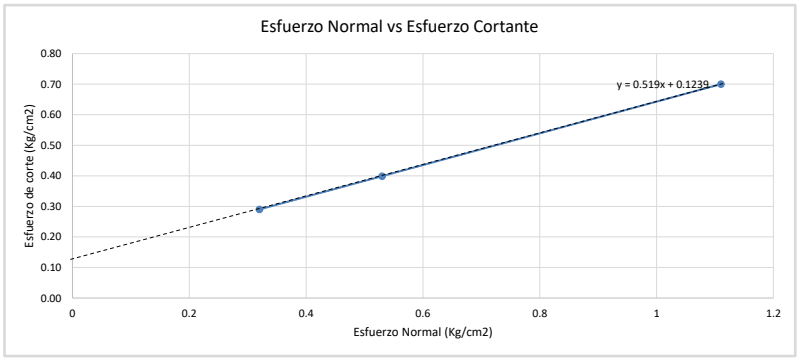
Proyecto: EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025
Ubicación: PROVINCIAS CANAS - CHUMBIVILCAS, DEPARTAMENTO CUSCO
Solicita: Br. EDITH ANALY USCAMAYTA ASLLA
Br. MILAGROS YANINA PARI QUISPE
Fecha: 18 de Abril del 2026

Calicata: C-03
Profundidad: 3.00 m

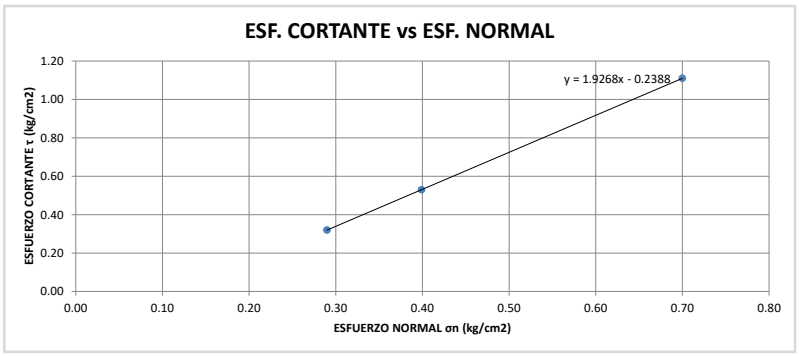
CORTE DIRECTO

NTP 339.171





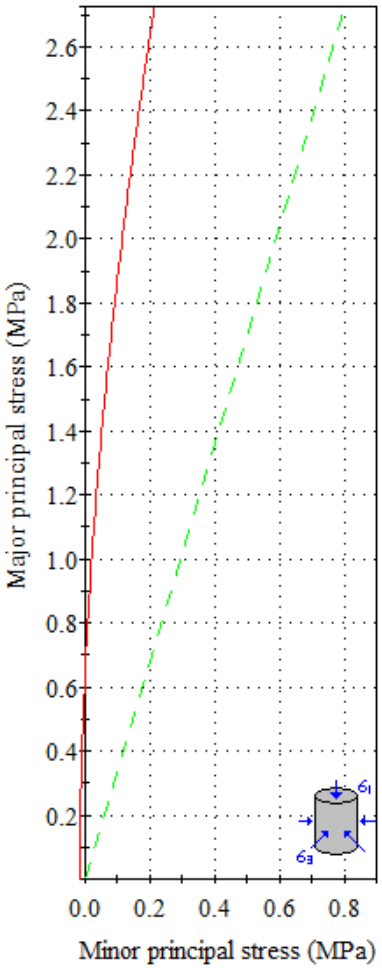
Esfuerzo normal	Esfuerzo cortante
0.32	0.29
0.53	0.40
1.11	0.70



Esfuerzo cortante	**0.29**	**0.40**	0.70
Esfuerzo normal	**0.32**	**0.53**	1.11

Cohesión = 12.39 KN/m2
Ángulo de fricción interna = 30°

TALUD N° 01



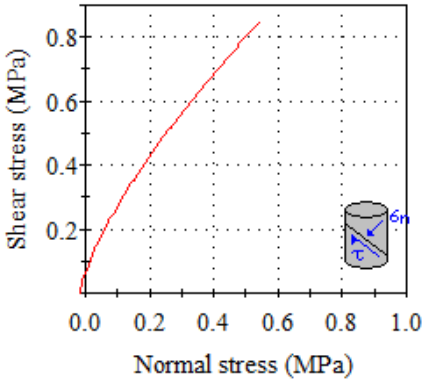
Arenisca

Hoek-Brown Classification
intact uniaxial compressive strength = 30 MPa
GSI = 48 mi = 17 Disturbance factor = 0.7

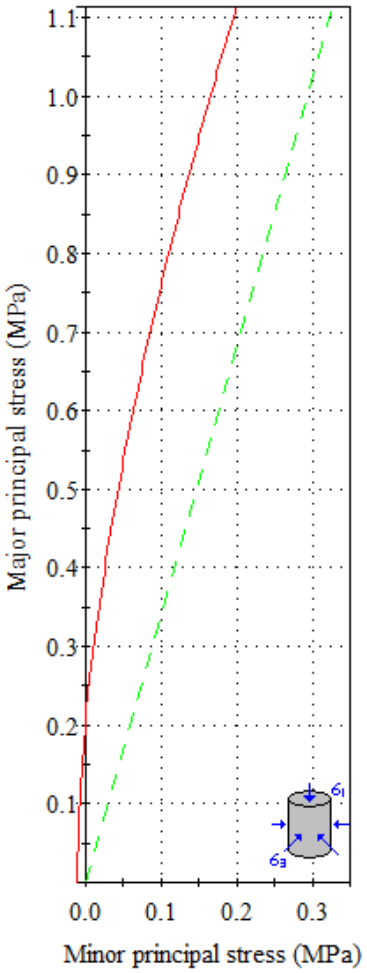
Hoek-Brown Criterion
mb = 0.976 s = 0.0005 a = 0.507

Mohr-Coulomb Fit
cohesion = 0.128 MPa friction angle = 54.56 deg

Rock Mass Parameters
tensile strength = -0.016 MPa
uniaxial compressive strength = 0.659 MPa
global strength = 3.867 MPa
modulus of deformation = 3173.03 MPa



TALUD N° 01



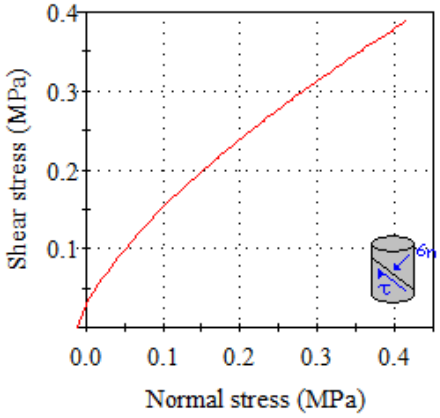
Pizarra

Hoek-Brown Classification
intact uniaxial compressive strength = 20 MPa
GSI = 38 mi = 7 Disturbance factor = 0.7

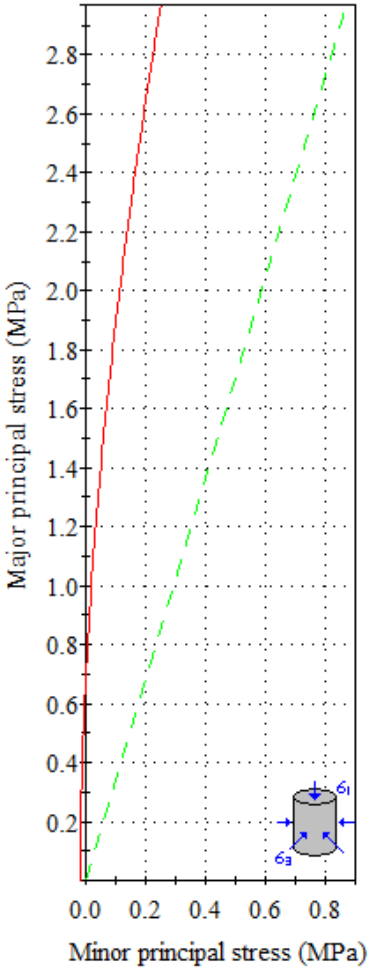
Hoek-Brown Criterion
mb = 0.232 s = 0.0001 a = 0.513

Mohr-Coulomb Fit
cohesion = 0.064 MPa friction angle = 39.60 deg

Rock Mass Parameters
tensile strength = -0.011 MPa
uniaxial compressive strength = 0.199 MPa
global strength = 1.199 MPa
modulus of deformation = 1456.90 MPa



TALUD N° 02



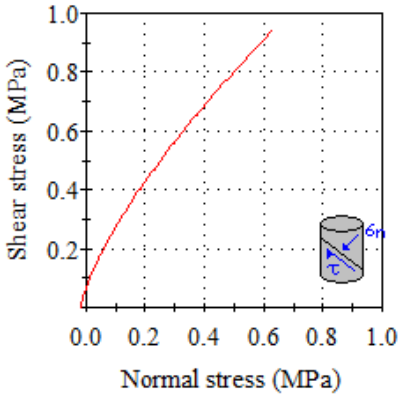
Arenisca

Hoek-Brown Classification
intact uniaxial compressive strength = 30 MPa
GSI = 48 mi = 17 Disturbance factor = 0.7

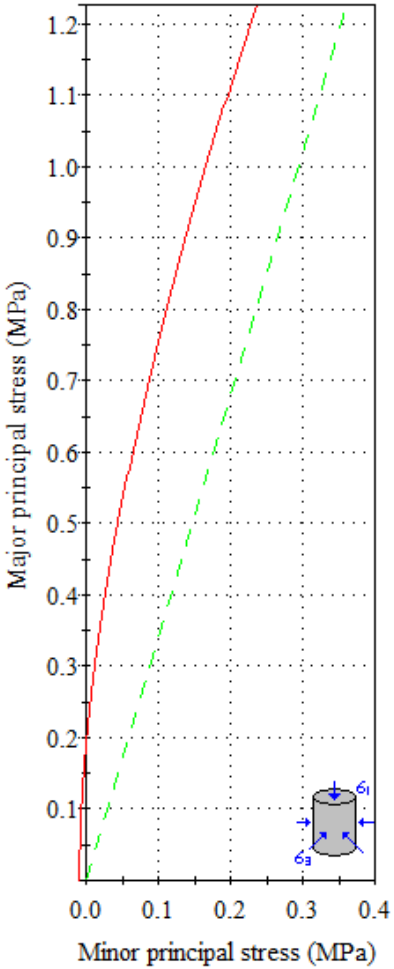
Hoek-Brown Criterion
mb = 0.976 s = 0.0005 a = 0.507

Mohr-Coulomb Fit
cohesion = 0.139 MPa friction angle = 53.41 deg

Rock Mass Parameters
tensile strength = -0.016 MPa
uniaxial compressive strength = 0.659 MPa
global strength = 3.867 MPa
modulus of deformation = 3173.03 MPa



TALUD N° 02



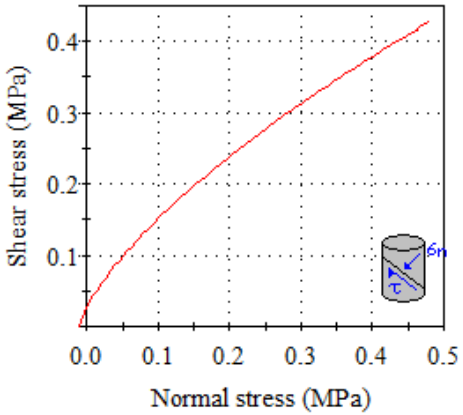
Pizarra

Hoek-Brown Classification
intact uniaxial compressive strength = 20 MPa
GSI = 38 mi = 7 Disturbance factor = 0.7

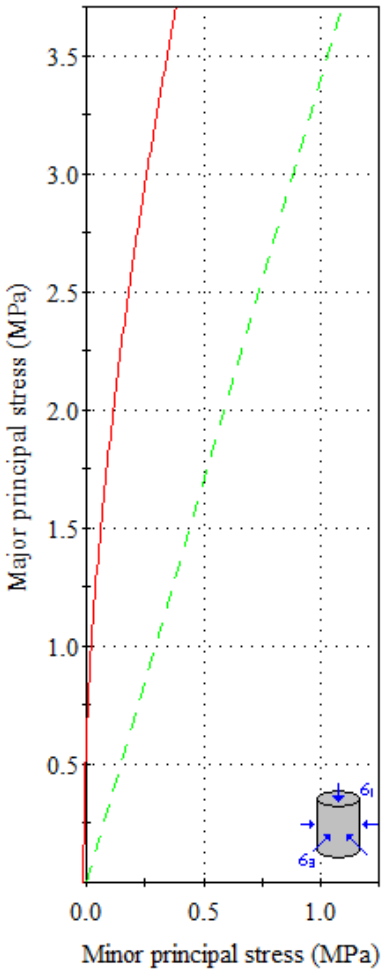
Hoek-Brown Criterion
mb = 0.232 s = 0.0001 a = 0.513

Mohr-Coulomb Fit
cohesion = 0.070 MPa friction angle = 38.27 deg

Rock Mass Parameters
tensile strength = -0.011 MPa
uniaxial compressive strength = 0.199 MPa
global strength = 1.199 MPa
modulus of deformation = 1456.90 MPa



TALUD N° 03



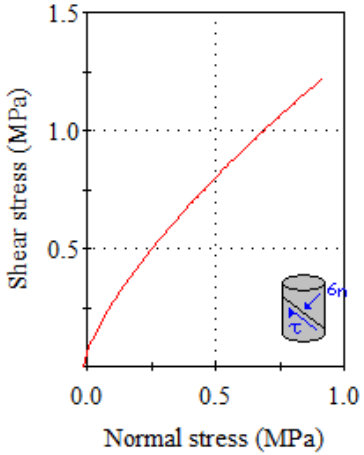
Arenisca

Hoek-Brown Classification
intact uniaxial compressive strength = 30 MPa
GSI = 48 mi = 17 Disturbance factor = 0.7

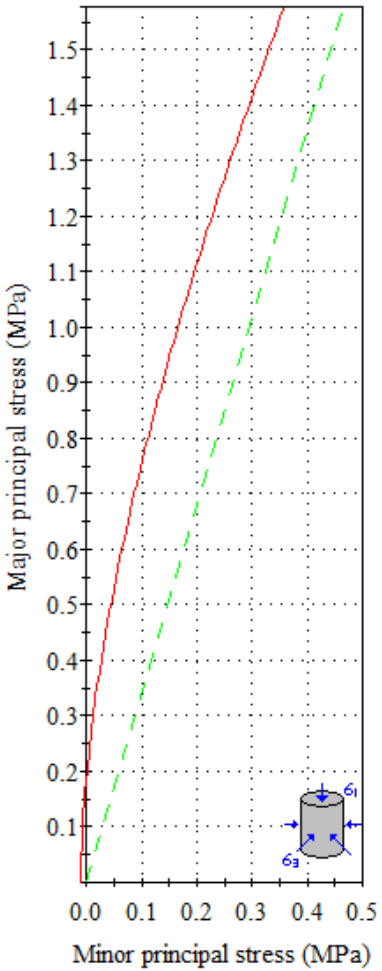
Hoek-Brown Criterion
mb = 0.976 s = 0.0005 a = 0.507

Mohr-Coulomb Fit
cohesion = 0.176 MPa friction angle = 50.36 deg

Rock Mass Parameters
tensile strength = -0.016 MPa
uniaxial compressive strength = 0.659 MPa
global strength = 3.867 MPa
modulus of deformation = 3173.03 MPa



TALUD N° 03



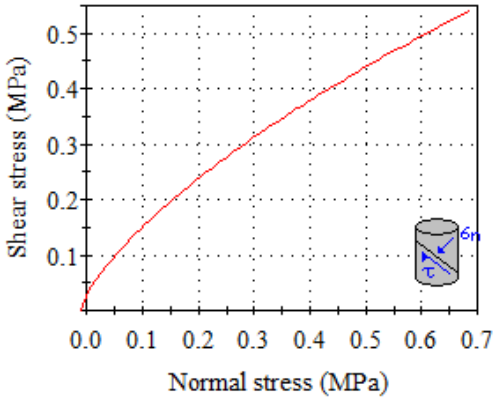
Pizarra

Hoek-Brown Classification
intact uniaxial compressive strength = 20 MPa
GSI = 38 mi = 7 Disturbance factor = 0.7

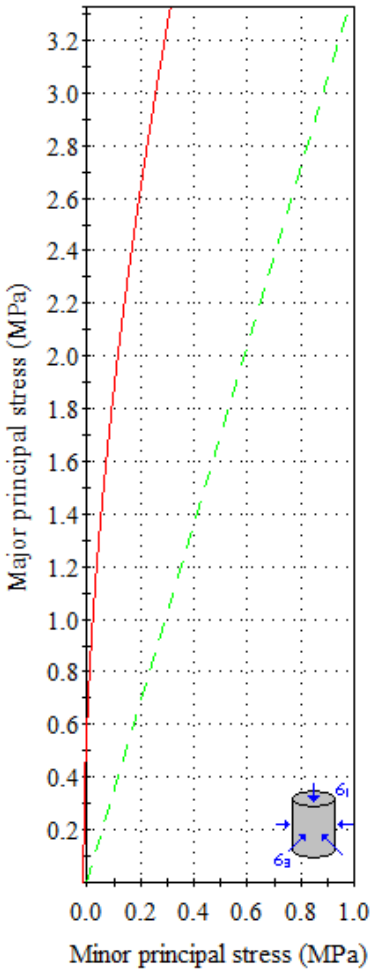
Hoek-Brown Criterion
mb = 0.232 s = 0.0001 a = 0.513

Mohr-Coulomb Fit
cohesion = 0.089 MPa friction angle = 34.90 deg

Rock Mass Parameters
tensile strength = -0.011 MPa
uniaxial compressive strength = 0.199 MPa
global strength = 1.199 MPa
modulus of deformation = 1456.90 MPa



TALUD N° 04



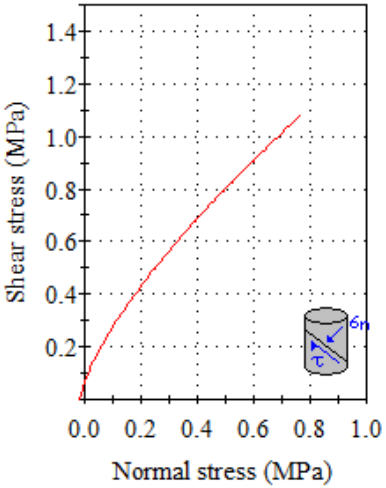
Arenisca

Hoek-Brown Classification
intact uniaxial compressive strength = 30 MPa
GSI = 48 mi = 17 Disturbance factor = 0.7

Hoek-Brown Criterion
mb = 0.976 s = 0.0005 a = 0.507

Mohr-Coulomb Fit
cohesion = 0.157 MPa friction angle = 51.86 deg

Rock Mass Parameters
tensile strength = -0.016 MPa
uniaxial compressive strength = 0.659 MPa
global strength = 3.867 MPa
modulus of deformation = 3173.03 MPa



EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025



FOTOGRAFÍA Nº 01

En la fotografía se observa un corte de talud adyacente a una vía afirmada, donde aflora un macizo rocoso el cual presenta un grado de fracturamiento, meteorización y depósitos coluvial-deluvial.



FOTOGRAFÍA Nº 02

Se observa un talud altamente fracturado con presencia de bloques sueltos, en la parte de la corona se distingue depósito coluvial.

EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025



FOTOGRAFÍA Nº 03

Vista detalladamente de las familias de discontinuidades en el macizo rocoso, indicio de presencia de infiltración por precipitación pluvial.



FOTOGRAFÍA Nº 04

Se observa un plano de discontinuidad expuesto a la intemperie donde muestra claramente el cambio que realiza la presencia de precipitación pluvial, el viento y el sol alterando la arenisca, lo cual reduce la resistencia de la estabilidad del talud.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025





FOTOGRAFÍA Nº 05

Se observa un talud con presencia de vegetación densa, en el fondo de la cavidad se aprecia un afloramiento de agua subterránea .



FOTOGRAFÍA Nº 06

Se observa una cárcava activa por erosión hídrica en el talud de ladera, en la base se aprecia una estructura de concreto como una alcantarilla, el cual indica un flujo de agua recurrente que representa un peligro constante.

EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025



FOTOGRAFÍA Nº 07

En la fotografía se observa el afloramiento de un macizo rocoso altamente fracturado y meteorizado, en el cual se realizo la obtención de datos de campo.



FOTOGRAFÍA Nº 08

En la imagen se observa la arenisca altamente meteorizada.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025



FOTOGRAFÍA Nº 09

Se observa un talud con depósito cuaternario coluvial y presencia de bloques de arenisca expuestos con peligro de desprendimiento.

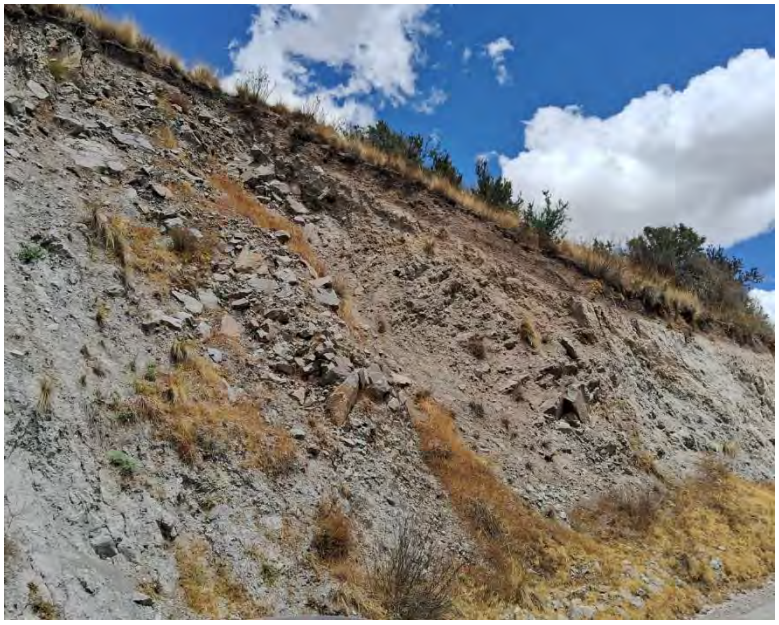


FOTOGRAFÍA Nº 10

Se observa un talud de corte vial que expone un contacto heterogéneo entre el macizo rocoso altamente fracturado y depósito coluvial de matriz areno-limosa.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025



FOTOGRAFÍA Nº 11

Se observa un talud de alta pendiente, donde se expone macizo rocoso altamente fracturado con depósito coluvial en la corona y en la base.



FOTOGRAFÍA Nº 12

En la fotografía se observa un talud que presenta una morfología de pendiente alta, con presencia de vegetación y se aprecia bloques expuestos lo que evidencia que haya ocurrido desprendimientos.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025



FOTOGRAFÍA Nº 13

Vista panorámica con dirección de SW, que muestra una morfología de una ladera de montaña con pendiente fuerte a muy fuerte, donde se aprecia los taludes críticos a evaluar.



FOTOGRAFÍA Nº 14

Se observa una ladera de montaña de alta pendiente con presencia de bolones un relieve de erosión diferencial.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025



FOTOGRAFÍA Nº 15

Vista panorámica con dirección al N, se aprecia una morfología de cañón profundo con laderas de fuerte pendiente, evidenciando un flanco izquierdo escarpado y un flanco derecho cubierto por depósitos coluviales.



FOTOGRAFÍA Nº 16

Se observa presencia de conglomerados con clastos mayores a 1.5 cm, perteneciente al Grupo Puno.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025



FOTOGRAFÍA Nº 17

Se observa un talud de material semiconsolidado con material coluvial y fragmentos de roca, se aprecia procesos de erosión por escorrentía pluvial superficial.



FOTOGRAFÍA Nº 18

En la fotografía se observa fragmentos de roca dispersos en un talud de moderada pendiente con peligro de caída de rocas hacia la carretera .

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025



FOTOGRAFÍA Nº 19

Se observa un afloramiento de agua subterránea, el cual presenta un factor desencadenante de inestabilidad .



FOTOGRAFÍA Nº 20

En la fotografía se muestra macizo rocoso de arenisca con laminación horizontal de grano fino a medio, medianamente fracturada e intemperizado.

EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025



FOTOGRAFÍA Nº 21

En la fotografía se muestra fragmento de roca arenisca de grano medio a grueso con clastos de 1.5 cm.



FOTOGRAFÍA Nº 22

En esta fotografía se observa el ensayo de la gravedad específica o también llamado peso específico relativo, el cual se realiza utilizando picnómetros de agua, según la NTP 339.131.

EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025



FOTOGRAFÍA Nº 23

En la fotografía se observa la medición con la brújula tipo Brunton, para obtener el rumbo y buzamiento de las discontinuidades del macizo rocoso.



FOTOGRAFÍA Nº 24

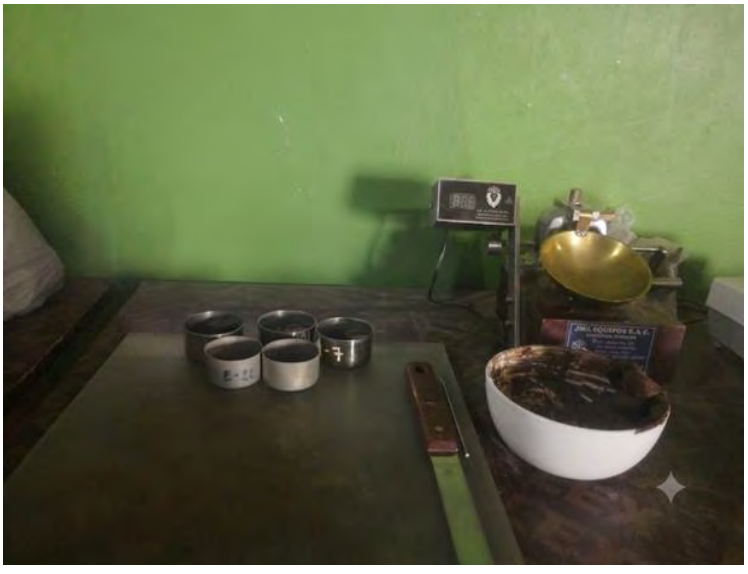
En la fotografía se muestra el uso del GPS, para la toma de las coordenadas.

EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025



FOTOGRAFÍA Nº 25

En la fotografía se observa la elaboración del cuarteo de la muestra, según la NTP 339.089. del cual se recepciona la muestra mas representativa.



FOTOGRAFÍA Nº 26

Se observa los equipos para hacer los ensayos de Límite de Atterberg, como la cuchara de casa grande, ranurador, pocillo y espátula que se utilizan para hacer el ensayo de límite líquido; placa de vidrio, de comparación o calibrador para hacer el ensayo de limite plástico.

EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025



FOTOGRAFÍA Nº 27

Se observa el ensayo de Límite de Atterberg, las 3 cápsulas de fondo contienen porciones de pasta de suelo extraídas de la cuchara de casa grande, las 2 capsulas del frente contienen los bastoncitos de suelo moldeado manualmente.



FOTOGRAFÍA Nº 28

Se observa las cápsulas normalizadas para hacer los ensayos de Límites de Atterberg, para luego ser llevadas al horno durante 24 horas.

EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025



FOTOGRAFÍA Nº 29

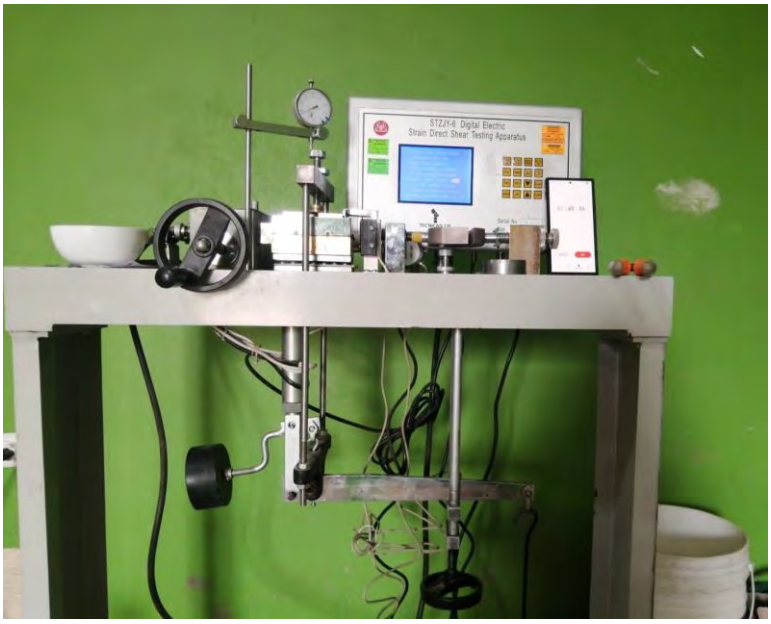
Se observa la elaboración del ensayo de límite líquido realizado con la cuchara de casa grande, evaluando en cuantos golpes se cierra la ranura del material, según la NTP 339.129.



FOTOGRAFÍA Nº 30

Se observa la elaboración del ensayo de límite plástico realizando los bastones con un diámetro de 3mm, para obtener la plasticidad del material, según la NTP 339.129.

EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES DEL KM 56 Y 57 DEL TRAMO CARRETERO TUNGASUCA – LIVITACA, REGIÓN CUSCO 2025



FOTOGRAFÍA Nº 31

En la fotografía se observa el equipo de corte directo y el proceso de como se instala, según la NTP 339.171.



FOTOGRAFÍA Nº 32

Se observa el equipo de corte directo, midiendo el tiempo según la norma NTP 339.171, donde indica que se debe medir cada 15 segundo durante 15 minutos.