

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS

**COMPORTAMIENTO GEOLÓGICO - GEOTÉCNICO DE LOS TALUDES
CRÍTICOS DE LA CARRETERA SAN MARCOS – JOSÉ SABOGAL,
PROGRESIVA: KM. 11+000 – KM. 15+000;
CAJAMARCA**

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Geólogo

Autor:

Bach. López Becerra César Rafael

Asesor:

Dr. Ing. Rodríguez Cruzado Segundo Reinaldo

Cajamarca - Perú

2025

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. Investigador: CÉSAR RAFAEL LÓPEZ BECERRA

DNI: 46167082

Escuela Profesional: Ingeniería Geológica

2. Asesor: Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado

Facultad: Ingeniería

3. Grado académico o título profesional

Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor

4. Tipo de Investigación:

Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico

5. Título de Trabajo de Investigación:

COMPORTAMIENTO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO DE LOS TALUDES CRÍTICOS DE LA
CARRETERA SAN MARCOS – JOSÉ SABOGAL, PROGRESIVA: KM 11+000 – KM 15+000;
CAJAMARCA

6. Fecha de evaluación: 5 enero 2025

7. Software antiplagio: TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)


8. Porcentaje de Informe de Similitud: 7%

1. Código Documento: oid: 3117:419387833

2. Resultado de la Evaluación de Similitud:

APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 6 de enero de 2025



Firmado digitalmente por:
BAZAN DIAZ Laura Sofia
FAU 20148258601 soft
Motivo: En señal de
conformidad
Fecha: 06/01/2025 14:11:54-0500

FIRMA DEL ASESOR

Nombres y Apellidos

Dr. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado

DNI: 26722961

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI



ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TITULO : "COMPORTAMIENTO GEOLÓGICO - GEOTÉCNICO DE LOS TALUDES CRÍTICOS DE LA CARRETERA SAN MARCOS - JOSÉ SABOGAL, PROGRESIVA KM. 11+000 - KM. 15+000; CAJAMARCA"

ASESOR : Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0023-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 08 de enero de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **diecisiete días del mes de enero de 2025**, siendo las once horas (11:00 a.m.) en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica (Ambiente 4J - 210), de la Facultad de Ingeniería se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
Vocal : M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.
Secretario : M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada "COMPORTAMIENTO GEOLÓGICO - GEOTÉCNICO DE LOS TALUDES CRÍTICOS DE LA CARRETERA SAN MARCOS - JOSÉ SABOGAL, PROGRESIVA KM. 11+000 - KM. 15+000; CAJAMARCA", presentado por el Bachiller en Ingeniería Geológica CÉSAR RAFAEL LÓPEZ BECERRA, asesorado por el Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : **5** PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : **11** PTS.
EVALUACIÓN FINAL : **16** PTS **DIECISEIS** (En letras)

En consecuencia, se lo declara **APROBADO** con el calificativo de **Dr. E.C.J.E.I.R.** acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las **12:00 p.m.** horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
Presidente

M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.
Secretario

M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.
Vocal

Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Asesor

DEDICATORIA

A mis padres Julia y Manuel las personas más importantes en mi vida, quienes siempre me guían, apoyan y alientan a ser una persona de bien, a mis hermanos por su confianza, fortaleza y sinceridad, que cada día me demuestran con su apoyo incondicional, en tomar esta decisión trascendental en mi vida hacia el éxito profesional, “Gracias por todo familia”.

CL.

AGRADECIMIENTO

Agradezco con el más sincero respeto y consideración a la Universidad Nacional de Cajamarca, por haberme tenido en sus claustros universitarios llenos de sabiduría, conocimiento y ética profesional.

En particular a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica, por ser parte del aprendizaje profesional, a los catedráticos que dedicaron su tiempo y dedicación en brindar su enseñanza en el campo de la geología.

Un agradecimiento muy especial al Dr. Reinaldo Rodríguez Cruzado por el soporte y apoyo constante brindado durante el desarrollo de la tesis.

CL.

ÍNDICE GENERAL

ÍTEM	Pág.
DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO.....	ii
ÍNDICE GENERAL.....	iii
ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	ix
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii

CAPÍTULO I INTRODUCCION

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
2.1.1 Antecedentes Internacionales	3
2.1.2 Antecedentes Nacionales	4
2.1.3 Antecedentes Locales	5
2.2 BASES TEÓRICAS.....	6
2.2.1 Criterio Empírico del Macizo Rocoso	6
2.2.1.1 Índice de Calidad de Roca (RQD)	6
2.2.1.2 Valoración de la Masa Rocosa (RMR)	6
2.2.1.3 Índice Geológico de Resistencia (GSI).....	7
2.2.2 Identificación de Tipos de Inestabilidades en Taludes	9
2.2.3 Movimiento de Ladera.....	10
2.2.4 Caídas de Rocas	11
2.2.5 Deslizamientos.....	12
2.2.5.1 Deslizamiento de Traslación.....	12
2.2.5.2 Deslizamiento Rotacional	13
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	13

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	16
3.2	ACCESIBILIDAD	16
3.3	CLIMA.....	19
3.4	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	20
3.5	TIPO, NIVEL, DISEÑO Y MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	21
3.5.1	Población	21
3.5.2	Muestra	22
3.5.3	Unidad de Análisis.....	22
3.6	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	22
3.6.1	Etapa de Recopilación de Información	22
3.6.2	Etapa de Cartografiado	23
3.6.3	Etapa de Laboratorio.....	23
3.6.4	Etapa de Gabinete y Procesamiento.....	23
3.6.5	Etapa de Interpretación e Informe Final	24
3.7	EQUIPOS, MATERIALES Y SOPORTE COMPUTACIONAL	24
3.7.1	Equipos	24
3.7.2	Materiales	24
3.7.3	Soporte Computacional.....	25
3.8	HIDROLOGÍA	25
3.9	HIDROGEOLOGÍA.....	28
3.10	MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES	28
3.11	GEOLOGÍA REGIONAL	29
3.12	GEOLOGÍA LOCAL	31
3.12.1	Grupo Goyllarisquizga.....	32
3.12.2	Grupo Crisnejas	36
3.12.3	Depósitos Cuaternarios	37
3.13	UNIDADES MORFOGENÉTICAS.....	40
3.14	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	42
3.15	GEODINÁMICA	47

3.16	GEOTECNIA	50
3.16.1	Estación E-1	51
3.16.2	Estación E-2	57
3.16.3	Estación E-3	63
3.16.4	Estación E-4	68

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	73
4.2	CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS	79

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	CONCLUSIONES	80
5.2	RECOMENDACIONES	82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		83
ANEXOS		86

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Índice de calidad de la roca (RQD)	6
Cuadro 2. Calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR89.....	7
Cuadro 3. Índice Geológico de Resistencia (GSI).....	9
Cuadro 4. Coordenadas del tramo de investigación de la carretera	16
Cuadro 5. Acceso a la zona de estudio.....	19
Cuadro 6. Parámetros de la microcuenca – estimando el tiempo de concentración de agua.....	26
Cuadro 7. Cuantificación porcentual de las unidades morfogenéticas y orográficas, de la carretera: San Marcos – José Sabogal.....	42
Cuadro 8. Categorización porcentual de las unidades morfogenéticas.	75
Cuadro 9. Constantes elásticas utilizando el criterio de linealización del método de equivalencia de áreas.	76
Cuadro 10. Estimación cuantitativa y cualitativa del macizo rocoso	77
Cuadro 11. Parámetros geotécnicos de suelos.....	77
Cuadro 12. Resultados de probabilidad de ruptura en rocas por software Dips.....	78
Cuadro 13. Resultados del factor de seguridad en rocas.	78
Cuadro 14. Resultados del factor de seguridad en suelos por software Slide.	78

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Caracterización del macizo rocoso	8
Figura 2. Principales tipos de rupturas de bloques en taludes.....	10
Figura 3. Estimación de la clasificación detallada del RHR.....	11
Figura 4. Movimientos que pueden tomar una roca al desprenderse del talud	12
Figura 5. Nomenclatura de un deslizamiento.....	12
Figura 6. Ruta de accesibilidad a la zona de investigación.....	17
Figura 7. Zona de investigación (A): Punto de inicio. (B): Punto final.....	18
Figura 8. Progresiva Km. 15+000 – Centro poblado San Francisco.....	19
Figura 9. Diagrama estadístico meteorológica - San Marcos.	20
Figura 10. Precipitación máxima en 24 horas – Estación San Marcos.	27
Figura 11. Histograma de precipitación máxima anual – Estación San Marcos.....	27
Figura 12. Progresiva Km. 11+100 – Formación Chimú.....	32
Figura 13. Progresiva Km. 11+250 – Formación Santa.....	33
Figura 14. Progresiva Km. 11+500 – Formación Carhuaz	34
Figura 15. Progresiva Km. 12+900 – Areniscas blanquecinas	35
Figura 16. Progresiva Km. 13+250 – Formación Chúlec	36
Figura 17. Depósito Aluvial ubicado en la progresiva Km. 13+440	37
Figura 18. Depósito Coluvial ubicado en la progresiva Km. 11+600.....	38
Figura 19. Depósito Coluvio-Aluvial.....	39
Figura 20. Depósito Coluvial, ubicado en la Formación Carhuaz	40
Figura 21. Vista de la geomorfología de la zona de investigación	41
Figura 22. A. Espejo de falla Inversa Sinestral (IxSx).....	43
Figura 23 A. Plano de falla NxDx en la Formación Carhuaz	44
Figura 24. A. Falla IxDx. en la Formación Farrat.....	45
Figura 25. A. Plano de falla de cinemática Normal Dextral (NxDx).....	46
Figura 26. Falla normal ubicada en la Formación Chúlec	47
Figura 27. Escarpe principal de falla, formado en la Formación Carhuaz.....	48
Figura 28. Delimitación del deslizamiento circular de pie	49
Figura 29. Caídas de rocas en la Formación Chúlec	50
Figura 30. Estación geotécnica E-1.....	52
Figura 31. Estación geotécnica E-1. Probabilidad de ruptura	53

Figura 32. Estación geotécnica E-1. Probabilidad de ruptura en cuña.....	54
Figura 33. Estación geotécnica E-1. Probabilidad de ruptura por vuelco	55
Figura 34. Estación geotécnica E-1. A. Block diagrama	56
Figura 35. Estación geotécnica E-1. A. Block diagrama – Swedge.....	56
Figura 36. Estación geotécnica E-2. Relación de esfuerzos principales	58
Figura 37. Estación geotécnica E-2. Probabilidad de ruptura planar.....	59
Figura 38. Estación geotécnica E-2. Probabilidad de ruptura en cuña.....	60
Figura 39. Estación geotécnica E-2. Probabilidad de ruptura por vuelco	61
Figura 40. Estación geotécnica E-2. A. Block diagrama	62
Figura 41. Estación geotécnica E-2. A. Block diagrama – Swedge.....	62
Figura 42. Sección transversal desde la progresiva: Km.11+385 a Km.11+820	63
Figura 43. Estación geomecánica 3. Diseño geométrico de talud.....	64
Figura 44. Estación geomecánica 3. Modelo numérico	65
Figura 45. Estación geomecánica 3. Modelo numérico (Slide), utilizando el método de equilibrio límite.....	66
Figura 46. Estación geomecánica 3. Modelo numérico (Slide), utilizando el método de equilibrio límite.....	67
Figura 47. Sección transversal.	68
Figura 48. Estación geomecánica 4. Diseño geométrico de talud.....	69
Figura 49. Estación geomecánica 4. Modelo numérico (Slide).	70
Figura 50. Estación geomecánica 4. Modelo numérico (Slide), utilizando el método de equilibrio límite,.....	71
Figura 51. Estación geomecánica 4. Modelo numérico (Slide)	72

LISTA DE ABREVIATURAS

WGS-84	:	Sistema Geodésico Mundial 1984.
UTM	:	Universal Transversal de Mercator.
Ingemmet	:	Instituto geológico minero y metalúrgico del Perú.
Osinergmin	:	Organismo supervisor de la inversión en energía y minería.
Senamhi	:	Servicio nacional de meteorología e hidrología del Perú.
Geocatmin	:	Sistema de información geológico y catastro minero.
Minedu	:	Ministerio de educación
RHRS	:	Sistema de estimación del peligro de caídas de rocas.
GEMMA	:	Grupo de estándares para movimiento de masa.
MIVOE	:	Manual para la inspección visual de obras de estabilización.
GEMM	:	Grupo de estudios en minería & medioambiente.
Ingeopres	:	Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente
MDT	:	Modelo digital del terreno.
MDE	:	Modelo digital de elevaciones.
MDP	:	Modelo digital de pendientes.
M-C	:	Morh-Coulomb.
H-B	:	Hoek-Brown.
σ_{ci}	:	Resistencia a la compresión uniaxial.
$\sigma_{3máx}$:	Tensión de confinamiento.
$\sigma't$:	Resistencia a la tracción
σ'_{ct}	:	Resistencia global.
σ_n	:	Esfuerzo normal.
σ'_{cm}	:	Resistencia del macizo rocoso.
σ_0	:	Esfuerzo vertical.
mi	:	Constante de Hoek & Brown.
mb	:	Constante de Hoek & Brown.
s, a	:	Constantes de Hoek & Brown.
ϕ	:	Ángulo de fricción.
Ei	:	Módulo de deformación de laboratorio de la matriz rocosa.
Em	:	Módulo de deformación.
RQD	:	Índice de calidad de roca.

LISTA DE ABREVIATURAS

RMR	:	Valoración de la masa rocosa.
GSI	:	Índice de Resistencia Geológica.
Ψ_T	:	Buzamiento del talud
Jc	:	Factor de estado de diaclasa.
Sh	:	Sísmica horizontal
Sv	:	Sísmica vertical
ND	:	Número de discontinuidades.
D-1	:	Número de junta.
Dr.	:	Profundidad de la masa desplazada.
Lr.	:	Longitud de la superficie de falla.
Phi	:	Ángulo de fricción.
ρ_s	:	Densidad de la roca
L (m.)	:	Longitud de tramo
Emax (KJ)	:	Energía cinética máxima
T.T	:	Tensiones totales.
T.E	:	Tensiones efectivas.
T.E + S	:	Tensiones efectivas + sismicidad.
Cu	:	Coeficiente uniformidad
Cc	:	Coeficiente de curvatura
SUCS	:	Sistema unificado de clasificación de suelos.
LL	:	Límite líquido.
LP	:	Límite plástico.
IP	:	Índice de plasticidad.
Ma.	:	Millones de años
Nx	:	Falla normal
Ix	:	Falla inversa
Sx	:	Falla sinestral
Dx	:	Falla dextral
T/P	:	Tensión/compresión
Ohm	:	Ohmio
Tc	:	Tiempo de concentración.
I	:	Intensidad de precipitación

RESUMEN

La investigación fue desarrollada en la carretera del distrito de José Manuel Quiroz – Ichocán, provincia de San Marcos, departamento de Cajamarca. La litología está emplazada en rocas del Mesozoico – Cretáceo Inferior, constituido por el Grupo: Goyllarisquizga, Formación Inca y Crisnejas (Formación Chúlec); y Cenozoico – Cuaternario. El sistema estructural muestra la ocurrencia de esfuerzos tectónicos compresivos principales de orientación SW-NE, plegando del Cretáceo Inferior formando el sinclinal, en la Formación Chúlec en la progresiva Km. 14+090. La hidrología presenta acumulaciones de aguas de escorrentía e infiltraciones de los cerros: Mun Mun y Michal, delimitado por 15 microcuencas, donde $T_c > 5$ min, constituyen recepciones de agua más prolongadas y zonas estables, en cambio $T_c < 5$ min, están generando eventos geodinámicos como: Deslizamientos, caídas de rocas, cárcavas y cono de detritos, en las laderas y taludes. Constituido por dos unidades hidrogeológicas: Acuífero sedimentario, evidenciándose en las Familias: Chimú y Farrat, y acuífero fisurado sedimentario en las Familias: Santa, Carhuaz, Inca y Chúlec. La geotecnia en cambio muestra que la E-1 y E-2 (Roca) son rocas de calidad: Regular a buena, que supera $FS > 1.50$, con probabilidad de ruptura $< 10\%$ en cuña y planar, sin embargo, la ruptura por vuelco muestra valores altos $> 50\%$ de inestabilidad (D-1 y D-2), ocasionando caídas de rocas. En cambio, los taludes compuestos de material residual son inestables: E-3 y E4, remediándolos con: Gaviones, perfilado de corte (Talud y ladera) y mejoramiento del suelo, reportando $FS > 1.20$, mediante el método de equilibrio límite.

PALABRAS CLAVES: Litología, hidrología, inestabilidad, geodinámica, factor de seguridad.

ABSTRACT

The investigation was carried out on the highway in the district of José Manuel Quiroz – Ichocán, province of San Marcos, department of Cajamarca. The lithology is located in rocks from the Mesozoic – Lower Cretaceous, made up of the Group: Goyllarisquizga, Inca Formation and Crisnejas (Chúlec Formation); and Cenozoic – Quaternary. The structural system shows the occurrence of main compressive tectonic stresses of SW-NE orientation, folding of the Lower Cretaceous forming the syncline, in the Chúlec Formation at the progressive Km. 14+090. The hydrology presents accumulations of runoff water and infiltrations from the hills: Mun Mun and Michal, delimited by 15 microbasins, where $T_c > 5$ min, constitute longer water receptions and stable zones, however $T_c < 5$ min, are generating events geodynamics such as: Landslides, rock falls, gullies and debris cones, on slopes and slopes. Consisting of two hydrogeological units: sedimentary aquitard (Fms.: Chimú and Farrat) and fissured sedimentary aquifer (Fms.: Santa, Carhuaz, Inca and Chúlec). Geotechnics, on the other hand, shows that E-1 and E-2 (Rock) are rocks of quality: Regular to good, exceeding $FS > 1.50$, with a probability of rupture $< 10\%$ in wedge and planar, however, the rupture by Overturning shows high values $> 50\%$ of instability (D-1 and D-2), causing rock falls. On the other hand, the slopes composed of residual material are unstable: E-3 and E4, remediating them with: Gabions, cutting profiling (Slope and slope) and soil improvement, reporting $FS > 1.20$, using the limit equilibrium method.

KEY WORDS: Lithology, hydrology, instability, geodynamics, safety factor.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La carretera ubicada entre la ciudad de San Marcos y el poblado de José Sabogal, desde la progresiva Km. 11+000 a la progresiva Km. 15+000, se encuentra sobre afloramientos rocosos del Cretácico Inferior constituidos por estructuras anticlinales y sinclinales constituidos por cuarcitas, areniscas, limolitas, calizas, margas y arcillolitas intensamente fracturadas, dando lugar a muchas familias de discontinuidades; además están fuertemente meteorizadas: física y químicamente. Además, encontramos depósitos cuaternarios aluviales y coluvio-aluviales, todos ellos afectados por precipitaciones, infiltraciones y probabilidad sísmica que dan lugar a la disminución de la resistencia y cohesión de los materiales presentes, evidenciándose en el tramo zonas geotécnicamente críticas e inestables. En los macizos rocosos encontramos deslizamientos planares y formación de cuñas, y en los depósitos cuaternarios se evidencian deslizamientos circulares o curvo-cilíndricos. Siendo necesario definir el comportamiento geomecánico y geotécnico en los tramos críticos de los macizos rocosos y depósitos cuaternarios.

Es por ello que en la presente investigación se plantea la siguiente pregunta ¿Cuáles son las condiciones de inestabilidad geotécnica de los macizos rocosos y depósitos cuaternarios en la la carretera entre la progresiva: Km. 11+000 a la progresiva Km. 15+000, que comunica la ciudad de San Marcos con el poblado de José Sabogal?; teniendo como hipótesis que la inestabilidad geotécnica está determinada por el comportamiento geomecánico de los macizos rocosos constituidos por areniscas cuarzosas, areniscas, limolitas, calizas, margas y arcillolita; afectados por alto fracturamiento y fuerte meteorización, y los depósitos cuaternarios aluviales, coluviales y coluvio-aluviales, por fenómenos geodinámicos. Además, son afectados por las variables detonantes como la precipitación-infiltración y sismicidad, las cuales generan disminución de las resistencias en la cohesión y fricción dentro de las discontinuidades y planos de deslizamiento; teniendo como finalidad que la investigación busca definir qué condiciones están generando las zonas potenciales de inestabilidad, formando con el tiempo, peligros y riesgos a los pobladores, peatones y transportistas que utilizan esta vía

a José Sabogal. Para tener la veracidad se dará a conocer el cartografiado geológico-geotécnico y su implicancia con las variables detonantes.

Por lo consiguiente se plantea como objetivo principal, analizar la inestabilidad geotécnica de los macizos rocosos y depósitos cuaternarios en la carretera entre las progresivas Km. 11+000 a Km. 15+000 desde la ciudad de San Marcos hasta el poblado de José Sabogal; y como objetivos específicos; realizar el cartografiado geológico – estructural, determinar las propiedades geomecánicas de los macizos rocosos en los taludes críticos, definir las condiciones hidrológicas y sísmicas, calcular el factor de seguridad de los taludes críticos y zonificación de inestabilidad geotécnica de los taludes del tramo de la carretera en investigación.

El contenido de los capítulos se detalla a continuación:

En el capítulo II, se encuentra los antecedentes internacionales, nacionales y locales; bases teóricas y definición de términos básicos, lo cual nos servirá de sustento y base de la investigación. En el capítulo III, se describe los materiales y métodos usados en esta investigación, ubicación geográfica, accesibilidad, clima, metodología, técnicas e instrumentos para la respectiva recolección de datos y la descripción detallada del procesamiento de la información, dentro del contexto geológico; se detalla la geología, hidrología, geohidrología, geología estructural y geodinámica. En el capítulo IV se detalla el análisis y discusión de resultados con la interpretación de datos obtenidos en campo y presentando los resultados con la contrastación de la hipótesis decretando la veracidad de la misma. En el capítulo V se encuentra las conclusiones y recomendaciones que ayudarán a futuras investigaciones.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1 Antecedentes Internacionales

López y Paramo (2012), investigaron la: “Corrección de un talud de margas en el Alto de Foradada del Toscar”, en el eje Pirenaico entre Campo y Ainsa en la provincia de Huesca que une las comarcas de Ribagorza y El Sobrarbe. Los taludes presentan calizas margosas con $B_z = 70^\circ$ a 80° , y anisotropía altamente peligrosa; con Depósitos Coluviales de características: Blandas, muy alterable y erosionable.

Rosales et al (2011), realizó el estudio: “Análisis de la amenaza de caída de rocas a partir del estudio de huellas de impacto sobre carreteras”. La zona se localiza en la vía que une Medellín – Santa Fe de Antioquia, sector La Volcana. Geomecánicamente los taludes de la margen: **Izquierda** presentan $H = 20$ m y $\Psi_T = 60^\circ$ a 70° a favor de la pendiente; generando caída de rocas de 1 m^3 de volumen; y **derecha** presenta: $H = 50$ m. y $\Psi_T = 70^\circ$ a 80° , a favor de la pendiente, generando caída de rocas 2 m^3 . influenciada por los flujos de agua constante.

Seisdedos et al (2011), realizó el estudio: “Análisis de estabilidad de la ladera izquierda del embalse de Navarra”. presentando inestabilidades de la ladera izquierda del embalse e implicaciones de sismicidad. La estabilidad se verificó por el FS por la influencia de: Agua (Sin agua, con la cota del embalse a 590 msnm., y cota del embalse 590 msnm. + saturación BMB del 20%; obteniendo $FS = 1.99$, 1.94 y 1.85), propiedades de los materiales (Los FS están entre: 1.43 y 2.00) y acción de la sismicidad.

Fraustro (1998), investigó “Derrumbes, deslizamientos y expansión lateral del suelo provocados por la sismicidad en el graben de Cuautepec: Región sur de la Sierra de Guadalupe, en la ciudad de México”. Está ubicado en el sector central de la cuenca de México, seccionada por fallas: Normales y laterales que forman estructuras de pilar y fosa, formadas en el Plioceno temprano. Por consiguiente, el Depósito Fluvio-lacustre y volcánica se formó en la depresión de la misma cuenca, con relictos lacustres.

2.1.2 Antecedentes Nacionales

Arellano (2021), planteó “Solución para deslizamiento de plataforma carretera departamental Acobamba – Palmayo – San Pedro de Cajas – Condorin tramo Km. 05+250 a Km. 05+950”. La evaluación hidrológica muestra precipitaciones máximas desde los años: 1964 a 2013, con valores mínimos y máximos: 4.40 mm. y 137.10 mm. La geotecnia clasificó como materiales: SM a SC, no presenta niveles freáticos hasta la profundidad de 7.45 m., obteniendo un FS de: 1.797 - Estático y 1.356 - Pseudoestático.

Carrillo (2015), en la tesis: “Evaluación de zonas susceptibles a movimiento en masa del tipo deslizamiento en el centro poblado de Carampa, distrito de Pazos, provincia de Tayacaja, región Huancavelica, aplicando el protocolo de CENEPRED”. Las clasificaciones geomecánicas reportan cinco estaciones de calidad buena. El análisis cinemático por ruptura planar se origina por la junta J2 (D/DD) = 28°/226°, obteniendo el FS en condiciones: Totales = 0.342 a 1.073 y pseudoestático = 0.154 a 1.073, definiéndolas como zonas inestables.

Predes (2000), elaboró el “Estudio de riesgo y propuesta de prevención de la quebrada Pedregal”. Se encuentra emplazado en un cuerpo intrusivo del Batolito Andino, predominado granodioritas entre dioritas y aplitas, sin embargo, las geoestructuras forman acumulaciones de bloques de 1.00 m. a 1.50 m., en las vertientes se concentran Depósitos Aluvionales cuaternarios antiguos ligados a crisis climática importante que han rellenado y arrastrado la quebrada Pedregal, formando huaycos y socavamientos desde: 10 m. a 30 m.

2.1.3 Antecedentes Locales

Novoa (2019), realizó la Tesis: “Evaluación geotécnica para determinar la inestabilidad de los taludes en la carretera del tramo Chilete – Puente Muyuna”. Los taludes de la carretera están emplazados en el anticlinal Piedra Grande, del flanco derecho de orientación NE-SW, en el flanco izquierdo se evidencian derrames andesíticos seudoestratificados del Volcánico Chilete, siendo cubierto por Depósitos: Fluviales, Aluviales y Coluviales. Los cartografiados geomecánicos presentó 10 estaciones con probabilidad de ruptura planar y 4 por ruptura en cuña.

Rodríguez (2016), en su tesis de maestría definió: el “Método de investigación geológico-geotécnico para el análisis de inestabilidad de laderas por deslizamientos. Zona Ronquillo-Corisorgona, Cajamarca - Perú”. Está delimitado por geoestructuras con orientación SW con buzamientos: 20° a 40°, y discontinuidades de orientación NE y SE, ocasionando paleodeslizamiento tipo cóncavo-cilíndrico de 500 m. de longitud y 50° de pendiente máxima de superficie de falla y deslizamientos menores con pendientes: 9° a 18°, controlando el comportamiento con valores: $c = 167 \text{ KN/m}^2$. y $\phi = 22^\circ$, de calidad de roca: Mala a regular, con FS: 0.524 a 1.336 y 1.038 a 1.610.

Montoya (2014), en la tesis: “Evaluación geotécnica de los taludes de la carretera Cruz Blanca - El Gavilán”. El comportamiento litomorfoestructural es complejo debido a la presencia de estructuras fuertemente disturbadas que originan plegamientos, fallamientos y alto fracturamiento, ocasionando inestabilidades. La geomecánica lo clasificó en rocas y suelos, definiendo suelos tipo: SC, GM y GP, con $C_u = 11.33$ a 84.67 y $C_c = 0.54$ a 3.24. obteniendo $FS < 1$, corroborando las zonas inestables actuales que se generan en los taludes.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 Criterio Empírico del Macizo Rocoso

2.2.1.1 Índice de Calidad de Roca (RQD)

Se realiza mediante mapeo geomecánico por línea de detalle registrando las discontinuidades expuestas en las paredes de afloramientos superficiales o excavaciones subterráneas, que intersectan o cortan dicha línea (Osinergmin, 2017), obteniéndose un espaciado promedio de las juntas (Número de discontinuidades divididas por longitud transversal). Bieniawski (1989) ha vinculado el espaciado promedio de las discontinuidades al RQD. Cabe de señalar que el RQD máximo corresponde a la relación propuesta por Priest y Hundson. El RQD se puede estimar a partir del espaciado promedio de las discontinuidades basado en la siguiente ecuación de Priest y Hundson (1976):

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

λ = Número de discontinuidades/ Longitud

Cuadro 1. Índice de calidad de la roca (RQD).

RQD (%)	Calidad de Roca
< 25	Muy mala
25 - 50	Mala
50 - 75	Regular
75 - 90	Buena
90 - 100	Excelente

Fuente: Deere, (1967).

2.2.1.2 Valoración de la Masa Rocosa (RMR)

Desarrollada por Bieniawski en 1973, con actualizaciones en 1979 y 1989, constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite a su vez relacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos del macizo rocoso y de excavación y sostenimiento en túneles. Tiene en cuenta los siguientes parámetros geotécnicos (González, 2002):

- 1 Resistencia uniaxial de la matriz rocosa.
- 2 Grado de fracturamiento en términos del RQD.
- 3 Espaciado de las discontinuidades.
- 4 Condiciones de las discontinuidades.
- 5 Condiciones hidrogeológicas.
- 6 Orientación de las discontinuidades con respecto a la excavación.

El puntaje total del RMR, está definido por:

$$\text{RMR} = (1 + 2 + 3 + 4 + 5) - 6$$

Cuadro 2. Calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR89.

Clase	Calidad de Roca	Valoración RMR	Cohesión (Kg/cm ² .)	Ángulo de fricción
I	Muy mala	100 – 81	> 4	> 45°
II	Mala	80 – 61	3 – 4	35° – 45°
III	Regular	60 – 41	2 -3	25° – 35°
IV	Buena	40 – 21	1 – 2	15° – 25°
V	Excelente	< 20	< 1	< 15°

Fuente: González de Vallejo, (2002).

2.2.1.3 Índice Geológico de Resistencia (GSI)

Cabe señalar que el índice GSI fue originalmente desarrollado con la finalidad de obtener parámetros para el criterio de falla de Hoek y Brown, por lo que Gonzales de Vallejo recurre a las equivalencias del GSI con RMR para recomendar y dimensionar el sostenimiento. Las tablas resultan ser muy prácticas para ser empleadas en los proyectos geomecánicas, sin embargo, corresponderá al personal especializado del área de geomecánica de cada empresa los procedimientos y aplicaciones (Osinergmin, 2017).

Inicialmente fue desarrollada por Hoek y Brown (1997), basada en estimaciones de modelos simples, que coinciden con las condiciones reales.

Las observaciones debían ser realizadas por: Geólogos o Ingenieros geólogos cuantificadores o con mucha experiencia. La cuantificación de los cuadros GSI se basa en dos parámetros bien establecidos: las condiciones de las discontinuidades y estructura.

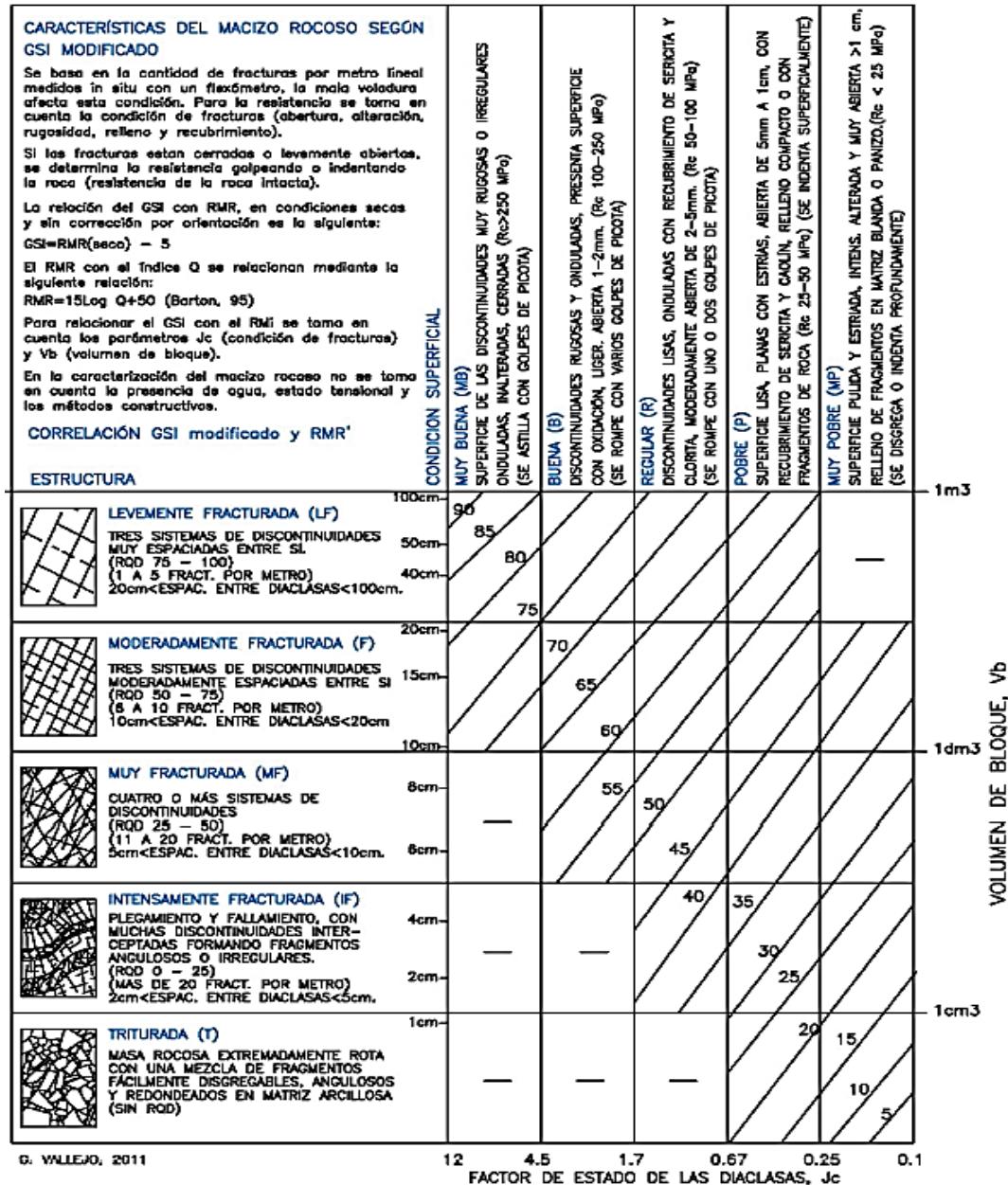


Figura 1. Vallejo, (2011). Caracterización del macizo rocoso según GSI modificado.

Fuente: Osinergmin, (2017).

Cuadro 3. Índice Geológico de Resistencia (GSI).

Calidad del macizo	Tipo	GSI
Muy mala	V	0 - 20
Mala	IV	21 - 40
Regular	III	41 - 60
Buena	II	61 - 80
Muy buena	I	81 - 100

Fuente: Hoek, (2002).

2.2.2 Identificación de Tipos de Inestabilidades en Taludes

Los diferentes tipos de rotura en taludes están asociados a diferentes estructuras geológicas y es importante que el diseñador del talud pueda reconocer los problemas potenciales de estabilidad durante las etapas iniciales del proyecto. Algunos de los patrones estructurales que deben identificarse al examinar los diagramas de polos. La Figura 2., muestra los cuatro tipos de rupturas a considerar y los diagramas de polos típicos de las condiciones geológicas que pueden conducir a tales roturas (Wyllie y Mah, 2004).

Tener en cuenta que, al evaluar la estabilidad, la cara de corte del talud debe incluirse en el gráfico estereográfico, ya que el deslizamiento solo puede ocurrir como resultado del movimiento hacia la cara libre creada por el corte. La importancia de distinguir entre estos cuatro tipos de roturas en taludes es que existe un tipo específico de análisis de estabilidad para cada uno, como se muestra a continuación, y es esencial que se utilice el método de análisis correcto en el diseño (Wyllie y Mah, 2004).

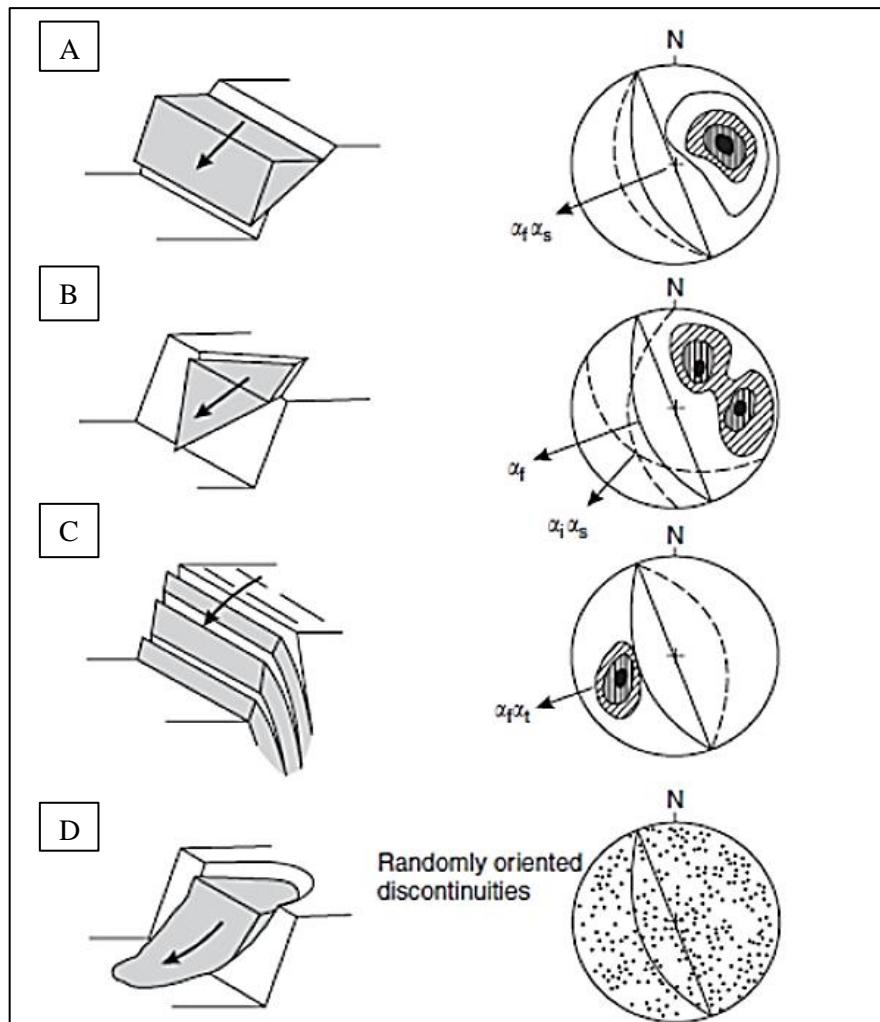


Figura 2. Principales tipos de rupturas de bloques en taludes y condiciones geológicas estructurales que causan estas rupturas:

(A) Rotura planar en roca que presenta juntas persistentes en el mismo sentido del frente del talud, y que se orienta paralelamente a la cara libre; (B) Ruptura por cuña formada por dos discontinuidades que se intersectan; (C) Ruptura por vuelco originado por roca de buena calidad que contiene discontinuidades de buzamiento vertical en el mismo sentido de la cara libre del talud; y (D) Ruptura circular se origina en roca muy débil o muy fracturada con discontinuidades orientadas al azar (Wyllie y Mah, 2004).

2.2.3 Movimiento de Ladera

Los procesos geológicos y climáticos que afectan a la superficie terrestre crean el relieve y definen la morfología de las laderas, que van modificando a lo largo del tiempo para adaptarse a nuevas condiciones geológicas o climáticas. Por lo general, las laderas adoptan pendientes naturales cercanas al equilibrio; ante el cambio de condiciones, su morfología se modifica buscando de nuevo el equilibrio.

En este contexto, los movimientos de ladera pueden entenderse como los reajustes del terreno para conseguir el equilibrio ante un cambio de condiciones (González, 2002).

2.2.4 Caídas de Rocas

Las caídas de rocas son un riesgo importante tanto en las explotaciones mineras a cielo abierto, en carreteras y autopistas, así como en núcleos familiares habitados de montaña. Vienen generalmente propiciados por algún fenómeno climático como elevadas precipitaciones y meteorización, vibratorio (voladuras, pequeños sismos) o de meteorización y erosión que hacen variar las fuerzas que actúan sobre la roca o degradan su resistencia. Una vez iniciado el fenómeno de inestabilidad el principal parámetro que controla la trayectoria del bloque en su caída es la geometría del talud, típico en zonas de topografía abrupta (Oyanguren y Alejano, 2004).

Categoría			Criterio de valoración y puntuación				
			3 Puntos	9 Puntos	27 Puntos	81 Puntos	
Altura del talud			25 pies (7.6 m)	50 pies (15.2 m)	75 pies (22.9 m)	100 pies (30.5 m)	
Efectividad de la cuneta de recepción			Buena	Moderada	Limitada	Nula	
Riesgo medio vehicular (AVR)			25% del tiempo	50% del tiempo	75% del tiempo	100% del tiempo	
Porcentaje de la visibilidad (SD) frente a la distancia de reacción (DSD)			Suficiente visibilidad (100% DSD)	Moderada visibilidad (80% DSD)	Visibilidad limitada (60% DSD)	Visibilidad muy limitada (40% DSD)	
Anchura de la calzada incluido el arcén			44 pies (13.4 m)	36 pies (11.0 m)	28 pies (8.5 m)	20 pies (6.1 m)	
Geología	Caso 1	Condición estructural	Juntas discontinuas con orientación favorable	Juntas discontinuas con orientación variable	Juntas discontinuas con orientación adversa	Juntas continuas con orientación adversa	
		Fricción de la roca	Rugosa e irregular	Ondulada	Plana	Con relleno	
	Caso 2	Diferencias en características erosivas	Pocas diferencias en los rasgos erosivos	Ocasionales diferencias en los rasgos erosivos	Muchas diferencias en los rasgos erosivos	Grandes diferencias en los rasgos erosivos	
		Diferencias en la velocidad de erosión	Poca diferencia	Moderada diferencia	Gran diferencia	Extrema diferencia	
Tamaño del bloque individual			1 pie (0.3 m)	2 pies (0.6 m)	3 pies (0.9 m)	4 pies (1.2 m)	
Volumen de rocas a caer por evento			3 yardas ³ (2.3 m ³)	6 yardas ³ (4.6 m ³)	9 yardas ³ (6.9 m ³)	12 yardas ³ (9.2 m ³)	
Clima y presencia de agua en el talud			Baja a moderada precipitación; sin períodos de heladas, ni agua en el talud	Moderada precipitación ó con períodos cortos de heladas ó presencia intermitente de agua en el talud	Alta precipitación ó con largos períodos de heladas ó presencia continua de agua en el talud	Alta precipitación y largos períodos de heladas ó continua presencia de agua en el talud y largos períodos de heladas	
Historia de caída de bloques			Pocas caídas	Caídas ocasionales	Muchas caídas	Caídas constantes	

Figura 3. Estimación de la clasificación detallada del RHRs

(Traducido de Pierson et al 1990).

Fuente: Oyanguren y Alejano, 2004.

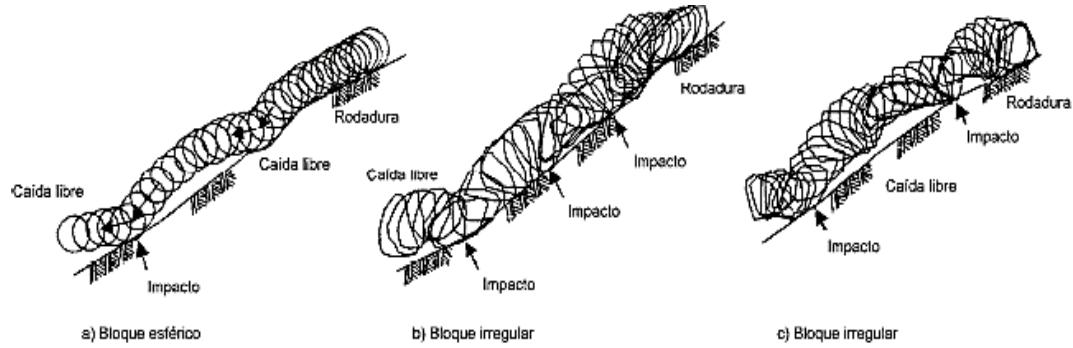


Figura 4. Movimientos que pueden tomar una roca al deprenderse del talud (Ministerio de fomento, 1996).

Fuente: Oyanguren y Alejano, 2004.

2.2.5 Deslizamientos

Es un movimiento ladero debajo de una masa de suelo o roca, cuyo desplazamiento ocurre predominante a lo largo de una superficie de falla, o de una delgada zona en donde ocurre una gran deformación cortante (GEMMA, 2007).

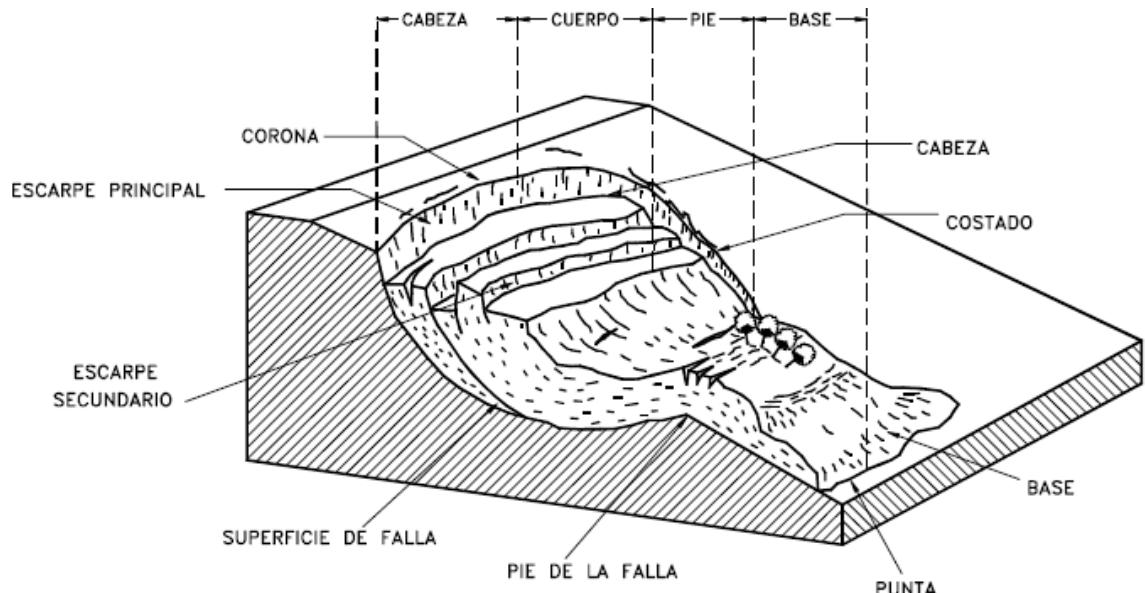


Figura 5. Nomenclatura de un deslizamiento.

Fuente: Suárez, (2009).

2.2.5.1 Deslizamiento de Traslación

El deslizamiento de translación es un movimiento de la masa que se desplaza hacia fuera o hacia abajo, a lo largo de una superficie más o menos plana o ligeramente ondulada y tiene muy poco o nada de movimiento de rotación o volteo tienen generalmente, una

relación Dr/Lr de menos de 0.1. Son comúnmente controlados por superficies de debilidad tales como fallas, juntas, fracturas, planos de estratificación y zonas de cambio de estado de meteorización que corresponden en términos cuantitativos a cambios en la resistencia al corte de los materiales o por el contacto entre la roca y materiales blandos o coluviones. En muchos deslizamientos de traslación la masa se deforma y/o rompe y puede convertirse en flujo (Suárez, 2009).

2.2.5.2 Deslizamiento Rotacional

En un deslizamiento rotacional la superficie de falla es formada por una curva cuyo centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo del movimiento. Visto en planta el deslizamiento posee una serie de agrietamientos concéntricos y cóncavos en la dirección del movimiento. El movimiento produce un área superior de hundimiento y otra inferior de deslizamiento generándose comúnmente, flujos de materiales por debajo del pie del deslizamiento (Suárez, 2009).

Este tipo de mecanismo es característico de suelos cohesivos homogéneos y de macizos rocosos intensamente fracturados. En materiales arcillosos, especialmente si hay presencia de agua, el pie puede evolucionar hacia un deslizamiento de tierras o colada de tierras (Corominas, 2000).

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Abandonado: Estado de actividad de un movimiento en masa en el cual la causa de la inestabilidad del movimiento ha dejado de actuar (GEMMA, 2007).

Agrietamiento: Causadas por esfuerzos de tensión o de compresión sobre masas de suelo o roca, o por desecación de materiales arcillosos (GEMMA, 2007).

Análisis de equilibrio límite: Se basa exclusivamente en la descomposición de fuerzas o momentos actuantes sobre la ladera en estudio y que condicionan su estabilidad. Este tipo de análisis se realiza tanto en suelos como en roca para evaluar la estabilidad de la ladera ante deslizamientos (Lara y Sepúlveda, 2008).

Asentamiento: Desplazamiento vertical relativo del suelo ante la imposición de cargas, la disipación de presiones, acción del drenaje. Los asentamientos afectan de manera grave la estabilidad de las estructuras (MIVOE, 2006).

Cementación: Proceso de consolidación de los materiales fragmentarios (Bloques, gravas, arenas, limos y arcillas) por acción de un material más fino, o una solución al cual se le denomina matriz, y por un proceso inicial de diagénesis (Dávila, 2011).

Comportamiento hidrogeológico: Es el contenido y flujo de agua en los macizos rocosos teniendo gran influencia en su comportamiento, teniendo en cuenta: Niveles freáticos, direcciones de flujo, infiltración y surgencias (Rodríguez, 2007).

Deslizamiento: Son movimientos ladera abajo de una masa de suelo, detritos o roca, la cual ocurre sobre una superficie reconocible de ruptura. Con frecuencia, la formación de grietas transversales es la primera señal de la ocurrencia de este tipo de movimientos, las cuales se localizan en la zona que ocupará el escarpe principal (Alcántara, 2000).

Factor de seguridad: Equilibrio entre las fuerzas actuantes y las fuerzas resistentes, entre las cuales es determinante la fuerza de gravedad (Suarez, 2009).

Geodinámica: Parte de la geología física o geomorfología que estudia los fenómenos geológicos que provocan modificaciones en la superficie terrestre por acción de los esfuerzos tectónicos internos (geodinámica interna) o esfuerzos externos (geodinámica externa) (Dávila, 2011).

Infiltración: Capacidad de penetración de las aguas (mayormente lluvias) en las rocas y/o suelos, o de cualquier otro fluido (Dávila, 2011).

Ladera: Una ladera constituye una superficie inclinada del relieve terrestre que une o enlaza con la menor distancia posible una línea divisoria de aguas con el fondo de un valle o con una superficie llana y amplia o de gradiente muy bajo (Calvo Cases, 1987).

Resolución: Grado de claridad de los detalles de una foto o una imagen. La resolución está definida por la finura de los granos sensibles de la película o del papel y la escala.

En sensoramiento remoto se define como picsel o pixel y es el tamaño mínimo de un objeto del terreno a ser reproducido en la imagen (Dávila, 1992).

Subsidiencia: Descenso vertical lento de la superficie de un terreno debido a la fuerza de la gravedad, o a efectos de consolidación de suelos por descenso de nivel freático (GEMMA, 2007).

Talud: Cualquier superficie inclinada respecto a la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de tierra, bien sea en forma natural o como consecuencia de la intervención humana en una obra de ingeniería (Batista et al 2012).

Vulnerabilidad: Es el grado de daño o perdidas potenciales en un elemento o conjunto de elementos como consecuencia de la ocurrencia de un fenómeno de intensidad determinada (González de Vallejo, 2002).

Zona de falla: Se trata de una estructura frágil compuesta por innumerables planos de falla, sub-paralelos a marcadamente oblicuos entre sí, interconectados y estrechamente espaciados. En algunos sectores la zona de falla puede tener zonas de brecha o harina de falla (Lillo y Oyarzun, 2013).

Zonas críticas: Delimitación espacial que hace referencia del estado actual respecto a variables físicas y temporales (Dávila, 2011).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

Geográficamente la zona de investigación de los taludes de la carretera se encuentra a ESE de la ciudad de Cajamarca, perteneciente al departamento de Cajamarca, provincia de San Marcos y distrito de José Manuel Quiroz – Ichocán, ubicado en los andes peruanos del norte entre las cadenas montañosas: Occidental y central, encontrándose delimitado por el río Marañón en la margen izquierda. Correspondiente al cuadrángulo de San Marcos (15 - g), con coordenadas: Sistema UTM – DATUM – WGS-84 – ZONA - 17S.

Cuadro 4. Coordenadas del tramo de investigación de la carretera:
San Marcos – José Sabogal.

Progresiva	Este (m.)	Norte (m.)	Cota (msnm.)
Km. 11 + 000	822389	9183828	3167.000
Km. 15 + 000	825276	9183841	2991.000

3.2 ACCESIBILIDAD

El acceso al área de estudio se llevó a cabo desde la ciudad de Cajamarca con orientación ESE hasta la provincia de San Marcos, luego siguiendo con orientación SE al distrito de Ichocán, siendo definida por carretera pavimentada y asfaltada en ambos tramos; luego cambiando bruscamente a orientación ENE, siguiendo una carretera afirmada hasta llegar al cruce: San Marcos – José Sabogal y Pamplona, en condiciones muy malas la vía. Ubicándose en la progresiva Km. 11+000, en la parte alta y punto de inicio de la investigación.

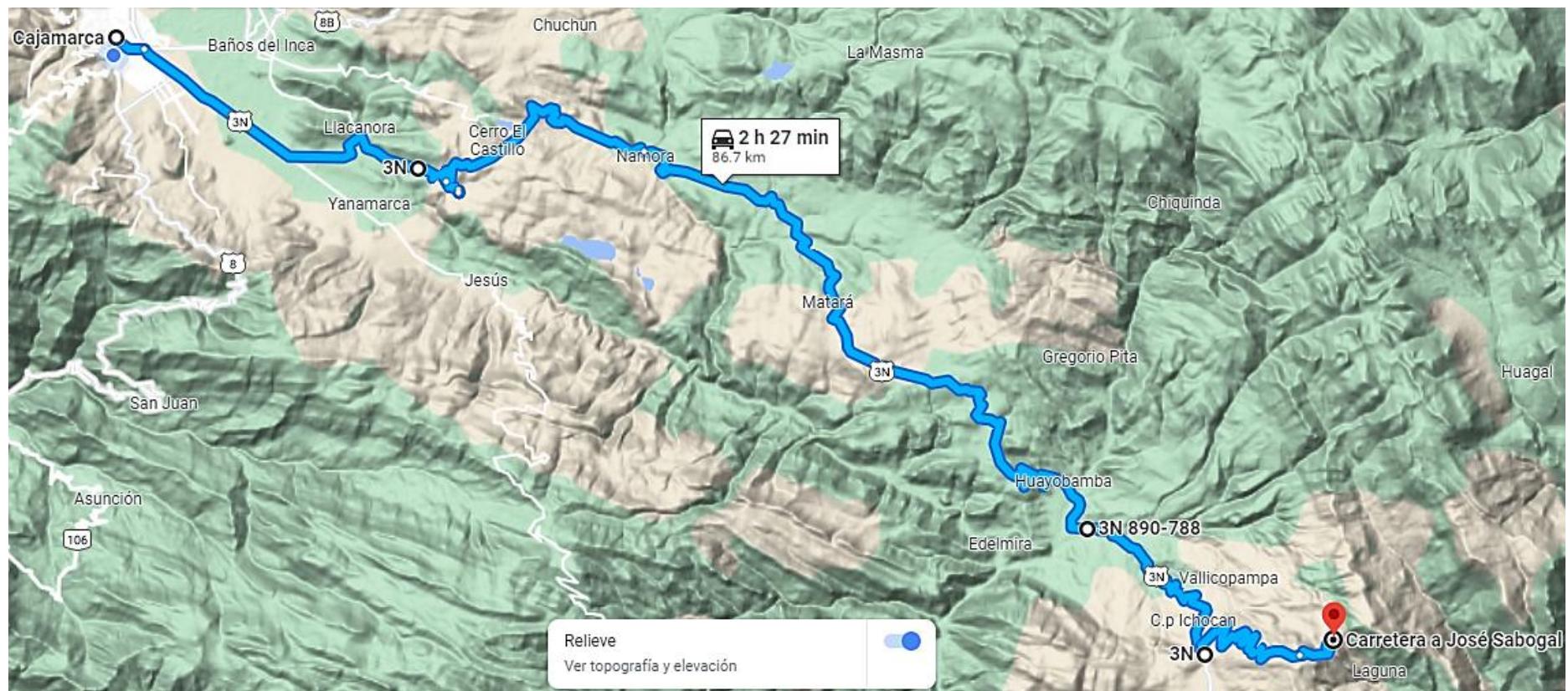


Figura 6. Ruta de accesibilidad.

Fuente: Google Maps, 2024



Figura 7. Zona de investigación (A): Punto de inicio y (B): Punto final.
Fuente: Bing Maps, 2024

Cuadro 5. Acceso a la zona de estudio.

Tramo		Estado de Vía	Vía	Transporte	Recorrido	
De	A				Distancia (Km.)	Tiempo (h.)
Cajamarca	San Marcos	Buena	Terrestre	Camioneta	65+000	01:43
San Marcos	Ichocán	Buena	Terrestre	Camioneta	10+300	00:18
Ichocán	Km. 11+000	Muy mala	Terrestre	Camioneta	11+400	00:26
Total					86+700	02:27



Figura 8. Progresiva Km. 15+000 – Centro poblado San Francisco.

3.3 CLIMA

La zona investigación presenta veranos: Largos, cómodos y nublados; e inviernos: Cortos, fríos, secos y parcialmente nublados. Durante el transcurso del año, presenta temperaturas: Templadas (dura 4 meses, del 28 de octubre al 28 de febrero, con temperatura máxima es más 20°C), cálidas (enero, con temperatura máxima 21°C y mínima 10°C), fresca (del 06 de junio al 09 de agosto, con temperaturas menores a 18°C) y fría (Julio, con temperatura mínima 6°C y máxima 18°C). Generalmente varía de 6°C a 21°C, por el caserío Molino de viento, y rara vez baja a menos de 4°C o sube a más 24°C en el caserío San Francisco. La precipitación lo categoriza en temporada: Más mojada (Dura 6.9 meses, de 6 de octubre a 2 de mayo, con probabilidad de más del 17% de un día será mojado) y seca (Dura 5 meses, del 2 de mayo al 6 de octubre); siendo lo más común durante el año solo lluvia, con una probabilidad máxima del 34 %. La estación meteorológica utilizada es la estación: San Marcos, departamento: Cajamarca, provincia: San Marcos y distrito: Pedro Gálvez, con latitud: 7°19'20.97"S, Longitud: 78°10'21.88"W y altitud: 2,293 msnm. Tipo: Automática – meteorológica. Código: 4725E206 (Senamhi, 2024), utilizada para los cálculos hidráulicos.

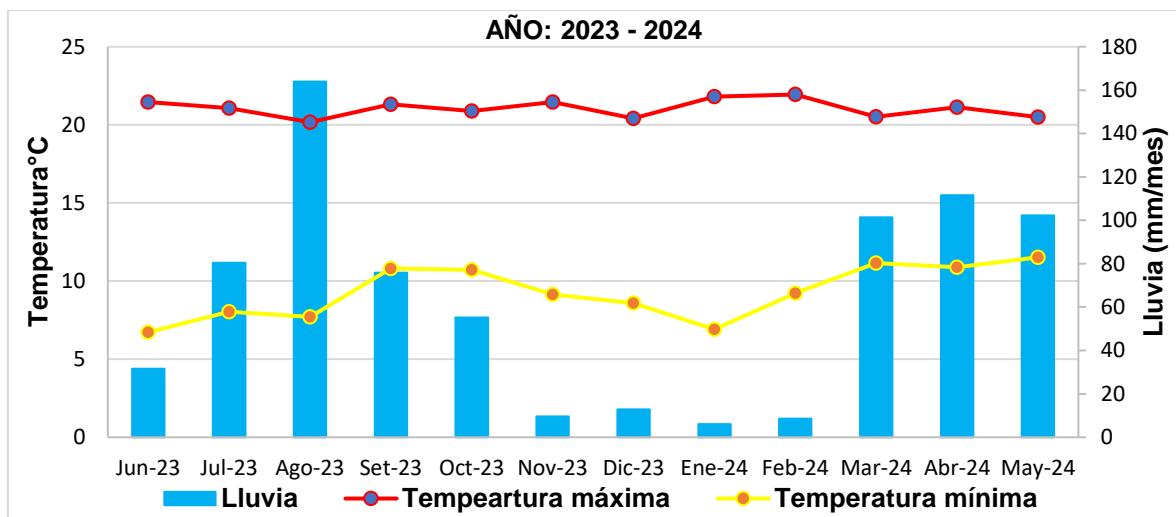


Figura 9. Diagrama estadístico meteorológico - San Marcos.

Fuente: SENAMHI, (2024).

3.4 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La tesis de investigación de la carretera: San Marcos – José Sabogal, está fundamentada y sostenida, en tres pilares importantes: Ciencia, conocimiento científico e investigación científica.

Ciencia: Fue retroalimentada con las salidas de campo generando nuevo conocimiento del entorno: Geológico, geotécnico, geoestructuras y geodinámico, enriqueciendo el conocimiento intelectual, por haber evidenciado cambios importantes en el contexto geológico local de la tesis.

Conocimiento científico: Fue data por observación y ocurrencias en la carretera, relacionados con variables: Litológicas-geoestructurales, precipitación-infiltración y sismicidad; experimentando por qué se está generando inestabilidades secuenciales en los taludes y laderas de la carretera, mediante campañas de cartografiado secuenciales en función del requerimiento de información pragmática de análisis e interpretación.

Investigación científica: Se basó en producir conocimiento y resolver problemas, evaluando y mejorando, mediante recolección y análisis de datos, en el entorno geológico-geotécnico.

3.5 TIPO, NIVEL, DISEÑO Y MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

No experimental: Me enfoqué a ver las ocurrencias en el ambiente natural, para validar la información pre-adquirida en la etapa de gabinete, sin embargo, fué de vital importancia para interpretar y analizar, las ocurrencias en la zona de investigación relacionadas primeramente con la tectónica de deformación andina, por visualizar grandes cambios litológicos.

Transversal: Los taludes y laderas de la carretera muestra fenómenos geodinámicos en constante actividad como: deslizamientos, cárcavas, rupturas en roca y caídas de rocas. Recopilándose información de campo: Cuantitativa y cualitativa, reforzándola con la variable precipitación con la estación meteorológica de San Marcos desde el año: 1984 a 2013, visualizando las variaciones climáticas que ocurren la zona de estudio y la incidencia con las variables de la investigación.

Analítica: Lo fundamenté primeramente en la parte observacional, en función de las variables propuestas, para definir las causas que generan inestabilidades en el entorno litológico y los efectos que están causando y pueden causar a los pobladores y al transporte público que diariamente utilizan esta vía de uso distrital.

Deductivo - inductivo: El método inductivo, se basó en la obtención de información mediante evidencia de campo, plasmadas por registros geológicos-geotécnicos para validar la información, constituidas por: Mediciones, coordenadas y litologías, mostrando información: Concretas y reales, de la ocurrencia de taludes y laderas. Sin embargo, el método deductivo se complementó con las causas que están originando los movimientos de masas y que consecuencias generarían a largo plazo si no se logra remediar geotécnicamente la inestabilidad.

3.5.1 Población

Está conformada por los taludes y laderas que une la carretera: San Marcos – José Sabogal, desde la progresiva: Km. 11+000 – Km. 15+000, conformados por: basamento rocoso o depósito residuales.

3.5.2 Muestra

El muestreo se fundamentó en etapas: Secuenciales y puntuales, abarcando desde el cartografiado: Litológico, geoestructural y geodinámico, definiendo y clasificando el área de investigación, para obtener la muestra en función de información: cualitativas (basadas en observaciones, evidencias, interpretación y apuntes, del entorno de la investigación) y cuantitativas (conformada por muestreos representativos de rocas y suelos, para obtener su clasificación geotécnica, mediante métodos numéricos validé su comportamiento cinemático), mediante estos enfoques se logró determinar que variables están generando la inestabilidades de los taludes de la carretera.

3.5.3 Unidad de Análisis

Está conformada por el conjunto de variables: Litológicas - geoestructurales, precipitación - infiltración y sismicidad, que darán el fundamento científico investigatorio, en el entorno geodinámico de las inestabilidades de la carretera: San Marcos – José Sabogal, acompañadas de estudios: exploratorios y descriptivos.

3.6 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.6.1 Etapa de Recopilación de Información

Me basé en la recopilación de información de fuentes de almacenamiento disponibles, que contengan información de calidad y relación con el tema planteado en la tesis.

Esta recopilación está conformada por: libros, seminarios, simposium, artículos científicos, acompañados de entidades de actualización de información constante como: INGEMMET, GEOCATMIN, OSINERGMIN, SENAMHI y MINEDU; brindando al investigador o usuario información digital tipo: vectorial, gráfica, numérica, satelital u ortofotos; vinculadas a programas matemáticos como: ArcGis, SASPlanet, Global mapper, AutoCAD, Google Earth Pro. Siendo fundamental para: Delimitación del área, acceso, cartografiado y avance; de la zona de estudio.

3.6.2 Etapa de Cartografiado

Estuvo conformado por secuencias de cartografiado a Esc.: 1/7,600 en relación a variables: Litológicas - geoestructurales, precipitación - infiltración, sismicidad e inestabilidad. En consecuencia, cada variable tipo diferente metodología de obtención de información como: Litológicas - geoestructurales, define los contactos litológicos de cada formación geológica acompañados de fallamientos tectónicos, logrando interrumpir o desplazar la secuencia estratigráfica; La precipitación - infiltración, se evidencia por medio de quebradas activas influenciadas por niveles freáticos o escorrentía superficial, dando a conocer por qué se está generando los movimientos de masa; sismicidad, esta influencia en la zona sísmica definiendo la aceleración máxima espectral que tiene la zona de estudio; e inestabilidad, se visualizó las ocurrencias que se está generando la inestabilidad por factores: Externos e internos que conforman los taludes y laderas. Para lograr obtener información de cada variable descrita, se conformó brigadas de avance distribuidas por días y semanas, mediante caminatas correlacionando información real de campo, que fueron plasmadas en la tesis de investigación.

3.6.3 Etapa de Laboratorio

Estuvo conformado por muestreos de rocas o suelos, concernientes a muestras representativas de cada litología para el análisis e interpretación, obteniendo valores importantes: Cuantitativos y cualitativos, para el diseño numérico o matemático.

3.6.4 Etapa de Gabinete y Procesamiento

Esta etapa brinda información detallada recopilada de las etapas anteriores, mediante: Agrupamiento, seleccionamiento, delimitación, ubicación y edición de planos, constituyendo la redacción de la tesis. Sin embargo, el procesamiento está conformado por: Data estadística, numérica y porcentual, en algunos casos, para visualizar la variación historia como de la variable precipitación - infiltración agrupando la delimitación de la microcuenca y ver el comportamiento hídrico a cada microcuenca de zonamiento. En consecuencia, la imagen satelital, MDE, MDT, MDP y MDA; plasman la calidad de información procesada por cada etapa.

3.6.5 Etapa de Interpretación e Informe Final

Se manifiesta en la redacción de la tesis, mostrando información detallada en cada acápite, con interpretaciones: Puntuales, consistentes y analíticas, que dan la validez necesaria, debido a las técnicas de procesamiento y recolección de información de campo, siendo verificadas adecuadamente, mediante planos temáticos, cuadros y figuras, mostrando la calidad de información y también las remediaciones idóneas en la zona de investigación.

3.7 EQUIPOS, MATERIALES Y SOPORTE COMPUTACIONAL

Fueron categorizadas en tres grupos por: Equipos, materiales y soporte computacional, mostrando la secuencia en la elaboración del marco metodológico para obtención de información.

3.7.1 Equipos

Los equipos utilizados cumplen un rol importantísimo en la obtención de información. Realizando en gabinete previas observaciones, manipulaciones y lecturas de cada equipo y su calibración correspondiente si lo requiere, para así evitar errores en la toma de datos. Los equipos estuvieron conformados por: GPS Garmin, cámara fotográfica, martillo Schmidt, brújula geotécnica, protactor, rayador, lupa y picota.

3.7.2 Materiales

Constituyen la base importante de campo, gabinete y procesamiento, enfocado a: Apuntar, describir, dibujar y delimitar, netamente influencia los cartografiados mediante: Codificaciones, grosores y tonalidades que serán plasmados en la tesis. Los materiales fueron conformados por: Registro geológico-geotécnico, imágenes satelitales, carta geológica (15-g), colores, plumones, lápices, borrador, corrector, tajador, regla, lapiceros, libreta de campo, ácido clorhídrico, wincha, portapapeles y flexómetro.

3.7.3 Soporte Computacional

El soporte computacional ayudo en la investigación a transmitir información vectorial mediante: Planos, figuras y cuadros, obtenidas por la utilización de softwares numéricos como: Word, Excel, Adobe AcrobatDC, SASPlanet, Google Earth Pro, Google Maps, Global Mapper, ArcGis, AutoCAD, Faultkin, Slide, RocData, Dips, RocPlane y Swedge,

3.8 HIDROLOGÍA

Localmente la fisiografía del área de investigación está delimitada por la quebrada Piochutranca, ubicándose paralelo al eje de carretera a 2,285 m. de distancia para evacuación de aguas. Geomorfológicamente, la carretera se ubica en una ladera de orientación W-E, generándose acumulación de aguas de escorrentía por los cerros: Mun Mun y Michal, en orientación: SW y SE, evacuando sus aguas a cunetas y posteriormente a alcantarillas, que derivan al S, siguiendo su curso aguas abajo por la quebrada Pamplona, hasta llegar a la quebrada Piochutranca.

El origen de la quebrada Piochutranca, se origina en el flanco derecho del cerro Quinua a 3,200 msnm. y el centro poblado Piraychina a 3,160 msnm. La evacuación de sus aguas tiene orientación WNW-ESE, siguiendo su curso intercepta a los 2,557 msnm. con la quebrada Pamplona (Se origina a los 3,200 msnm. con orientación NW-SE, con longitud 2,588 m.), siguiendo su mismo curso, luego cambiando bruscamente de orientación NW-SE, con longitud 6,293 m., interceptando a los 2,264 msnm con la quebrada Malca, cambiando de nombre a río Shirac con orientación WNW-ESE, interceptación a los 1,900 msnm. con la quebrada Sunco, siguiendo con el mismo nombre río Shirac, con longitud 6,950 m., evacuando sus aguas a los 1,400 msnm. al río Crisnejas, cambiando de orientación SW-NE bruscamente, con longitud de 23,600 m., desembocando sus aguas al río Marañón (Nace en el SW del departamento de Huánuco en la Provincia de Lauricocha) a los 1,050 msnm. con orientación SSE-NNW, recorriendo aproximadamente 253,284.50 m. interceptando con el río Chinchipe a los 390 msnm. con orientación NE-SW, siendo el principal afluente del río Amazonas, desembocando en el Océano Atlántico. Los valles de estas quebradas tienen rasgos de una fuerte erosión, representados por su forma transversal en U y su morfometría.

La delimitación de la microcuenca define 1.31 km². de área, agrupando a 15 microcuenca, para los análisis de parámetros hidráulicos, plasmando que la MC-6 y MC-10, constituyen el tiempo más prolongado de la aportación de agua a las obras hidráulicas. En consecuencia, la interpretación muestra que el $T_c < 5$ min, están generando eventos geodinámicos progresivos relacionados con deslizamiento de: Laderas y taludes, mostrando comparaciones lógicas con lo evidenciado en campo. Sin embargo, se obtuvo $P_{p\max} = 49.70$ mm., $P_{p\min} = 23.20$ mm. y $P_{panual} = 190.40$ mm.

Cuadro 6. Parámetros de la microcuenca – estimando el tiempo de concentración de agua.

Nombre de cuenca	Área (km ² .)	Longitud del cauce principal (km.)	Cota mayor (msnm.)	Cota menor (msnm.)	Pendiente (m/m)	Tc (min.)
MC - 1	0.031	0.130	3,205.000	3,167.000	0.290	3.201
MC - 2	0.031	0.110	3,219.000	3,166.000	0.480	2.488
MC - 3	0.048	0.264	3,313.000	3,155.000	0.600	4.909
MC - 4	0.066	0.404	3,386.000	3,148.000	0.590	7.006
MC - 5	0.120	0.508	3,419.000	3,137.000	0.560	8.419
MC - 6	0.156	0.751	3,442.000	3,137.000	0.410	12.476
MC - 7	0.029	0.264	3,252.000	3,145.000	0.400	5.470
MC - 8	0.105	0.612	3,453.000	3,137.000	0.520	10.098
MC - 9	0.111	0.560	3,452.000	3,129.000	0.580	9.115
MC - 10	0.136	0.668	3,415.000	3,108.000	0.460	11.063
MC - 11	0.050	0.329	3,349.000	3,105.000	0.740	5.656
MC - 12	0.194	0.402	3,406.000	3,066.000	0.850	6.176
MC - 13	0.093	0.415	3,239.000	3,028.000	0.510	7.298
MC - 14	0.097	0.393	3,231.000	3,013.000	0.550	6.840
MC - 15	0.047	0.335	3,182.000	2,981.000	0.620	5.830

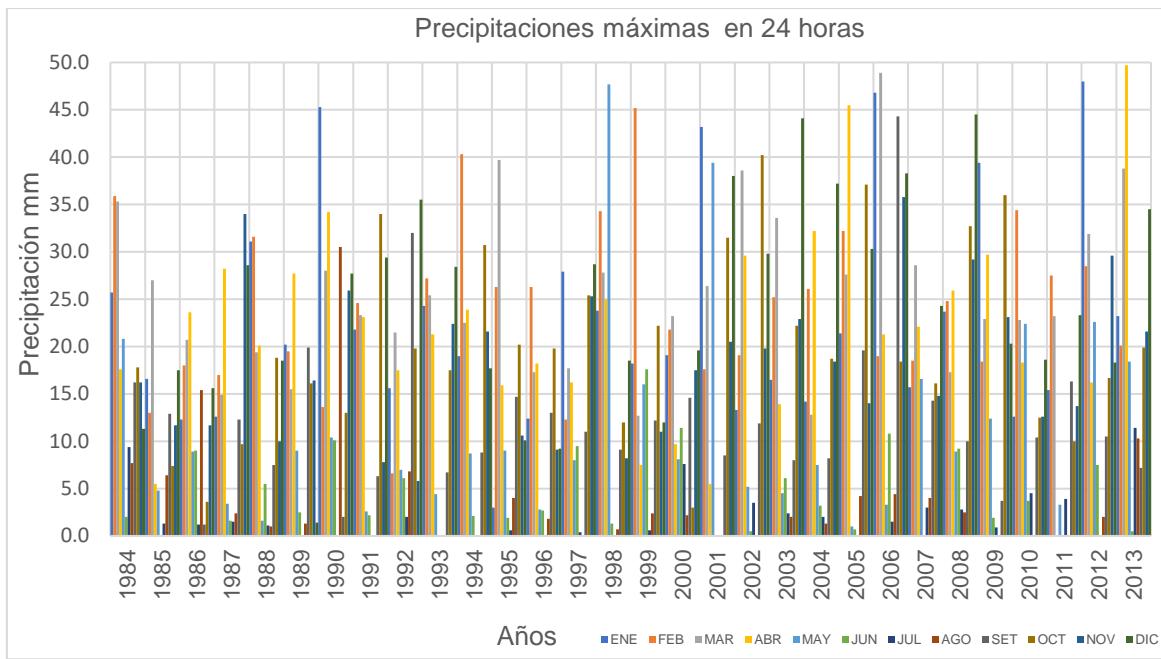


Figura 10. Precipitación máxima en 24 horas – Estación San Marcos.
Fuente: Senamhi, (2024).

De acuerdo con las Figuras: 10 y 11, se da conocer las precipitaciones máximas en los años: 1990, 1998, 1999, 2005, 2006, 2012 y 2013, superando 45 mm/año, definiendo la mayor recarga de precipitación de la zona de estudio y balance hídrico.

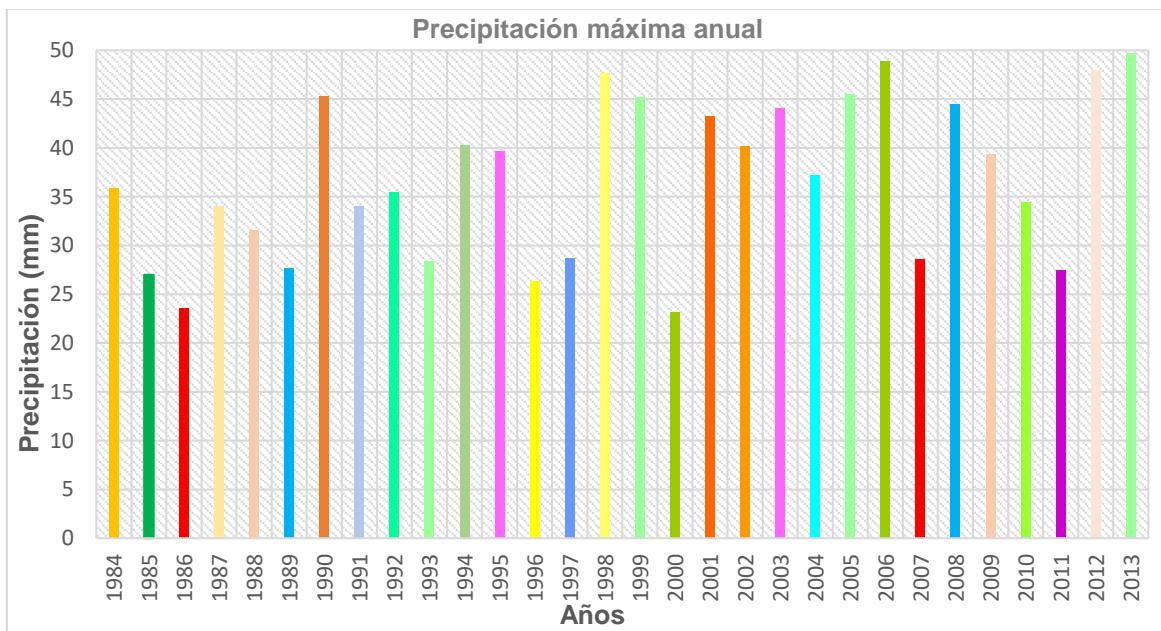


Figura 11. Histograma de precipitación máxima anual – Estación San Marcos.
Fuente: Senamhi, (2024).

3.9 HIDROGEOLOGÍA

Hidrogeológicamente los Taludes y laderas, del flanco izquierdo de la carretera se encuentran influenciados por dos unidades hidrogeológicas: Acuitardos sedimentarios en las Familias: Chimú y Farrat, y acuíferos fisurados con horizontes de rocas arcillosas en las Familias: Santa, Carhuaz, Inca y Chúlec), perjudicando la estabilidad en varios tramos de la carretera, visualizándose por emanaciones de agua subterránea como filtraciones: Corona, pie y cara libre del talud, ya sea en taludes compuestos en roca (primaria y secundaria) o suelo. El grado de saturación de las partes superiores de la ladera, afectando a Depósitos: coluviales, aluviales y coluvio-aluviales. Actualmente las infiltraciones están afectando la estabilidad, generando deslizamientos progresivos de las laderas y taludes, no teniendo ningún tipo de control ni limpieza de alcantarillas y cunetas, para mitigar estos impactos de estabilidad.

3.10 MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES

El modelo digital del área de estudio, está definida por la descarga de imágenes satelitales de alta resolución con el software SASPlanet, de diferentes años: 2016, 2017, 2019 y 2020; mediante la utilización de computadoras y softwares para el procesamiento de información de gabinete y campo, basándose en la superposición de las imágenes satelitales mediante la combinación de bandas espétacales para obtener imágenes de mayor calidad o nitidez, visualizando el área de influencia: Directa e indirecta de la zona de investigación.

Sin embargo, el procesamiento satelital también fue correlacionado con los cartografiados de campo obteniendo valores: Cualitativos y cuantitativos, mostrando información importante para el análisis de información para obtener planos que demuestren el comportamiento litomorfoestructural y geodinámico, del área de investigación. El análisis de datos está conformado por: Reportes litológicos, geoestructurales, hidrológicos e hidrogeológicos, geomorfológicos y geodinámicos, con los métodos indirectos de generación de MDE, siendo mejorados por la introducción de datos auxiliares como: Curvas de nivel, puntos de acotación y líneas estructurales, destacándose vectores como: puntos, líneas y polígonos, para mejores presentaciones.

Posteriormente se fundamentó en estructuras numéricas de información que representan la distribución espacial obtenidas del software global mapper de la altitud del terreno en un MDE, mediante el modelo: Vectorial (Por contornos, basado en polilíneas que describen la trayectoria de las curvas de nivel, separadas en intervalos adecuados garantizando la exactitud del modelo numérico; y TIN conformando una red de triángulos por interpolaciones constituyendo del modelamiento 3D de la superficie del terreno) y raster (Esta fundamentada por el modelo vectorial TIN por medio de una red regular de malla cuadrada, obteniendo la creación de archivos raster por áreas de sombras para generar el modelo digital de terreno (MDT) y modelo digital elevaciones (MDE), así obteniendo unidades morfogenéticas consistentes con la realidad topográfica, que se relacionan con el análisis morfotopométrico, definiéndose cuatro unidades morfogenéticas: Planicies, lomadas, laderas y escarpas. Sin embargo, también se ha relacionado con el modelo digital altitudinal (MDA), constituyendo superficies de contorno por agrupación altitudinal).

3.11 GEOLOGÍA REGIONAL

Está constituida por la facie sedimentaria de la Cordillera Occidental Peruana, con unidades rocosas cuyas edades van desde el Mesozoico (Jurásico - Cretácico) hasta el Cenozoico (Paleógeno – Neógeno – Cuaternario), e intrusivos profundos siendo generalmente: Andesitas, dioritas, tonalitas y granodioritas, constituyendo la prolongación el batolito de la costa relacionado con el precámbrico. Por lo contrario, las rocas más antiguas están representadas por la edad Permo - Triásica, aflorando al NE del cuadrángulo de San Marcos en el río Marañón (Reyes, 1980).

Geomorfológicamente presenta la secuencia más baja representada por materiales clásticos del Grupo Mitú del Paleozoico Superior, descansando discordantemente sobre las filitas del Complejo Marañón, cubiertas por calizas del Triásico-Liásicas del Grupo Pucará. Ocurrido durante la edad: Titoniana y Neocomiano – Aptiano, en la parte occidental de la cuenca la depositación de 3,000 m. de sedimento (Chicama - Farrat), en contraste con lo acontecido en la plataforma o Geoanticlinal del Marañón, donde se han depositado 300 m. de materiales clásticos continentales del Grupo Goyllarisquizga. En consecuencia, desde el Albiano (Formación: Inca, Chúlec y Pariatambo) a Santoniano (Formación: Celendín y Chota), la parte occidental recibió más de 2,000 m. de sedimentos calcáreos, mientras que la parte oriental posteriormente sumergida, la sedimentación fue menor (Reyes, 1980).

Estructuralmente, se reconoció provincias: Pliegues, sobre escurrimientos e imbricada, iniciándose a principios del Jurásico Superior empezaron a formarse la cuenca occidental peruana y el Geosinclinal del Marañón, probablemente influenciadas por fuerzas distensivas con el desarrollo de grandes estructuras: Graven y horst, relacionados directamente con movimientos del zócalo de subsidencia (Occidente) y levantamiento (Oriente). Formadas estas estructuras desde el periodo: Jurásico – Cretáceo; implicó el transporte lateral de orientación SW a NE, de los sedimentos de la cuenca sobre el flanco del geoanticlinal del Marañón, despegadas aparentemente, de algún nivel de las lutitas de la Formación Chicama. Evidenciándose cuatro etapas de deformación o movimiento del ciclo Andino (Reyes, 1980).

El primer movimiento (Epirogénico) deformatorio del Ciclo Andino ocurre en el Cretáceo tardío, caracterizado por el levantamiento de grandes sectores de la cuenca, dando lugar a la acumulación clástica rojiza de la Formación Chota sobre la plataforma. Seguido por el segundo movimiento (Deformación Compresiva principal SW-NE) Deformatorio Andino, durante el Terciario afectó todas las formaciones de la cuenca, originando las principales provincias estructurales, plegándolas intensamente y ocasionando estructuras de corrimiento al nivel de las lutitas de la Formación Chicama, sobre el flanco occidental del Geosinclinal del Marañón, relacionándose con fallas de alto ángulo; y produciéndose cabalgamientos e imbricaciones en el lado oriental (Reyes, 1980).

A continuación, se tuvo una intensa etapa de erosión, seguida de intensa actividad magmática efusiva durante el Terciario: Inferior y medio, representada por más de 2,000 m. de roca volcánica del Grupo Calipuy, originando también cuerpos intrusivos del batolito de la costa. Por consiguiente, en el Terciario (Compresivo menos importante SW-NE, tercer movimiento) medio ocurrió el emplazamiento de los cuerpos intrusivos del Batolito Andino. Sin embargo, en el Oligoceno y luego de un largo periodo de estabilización se formó la superficie de erosión (Superficie Puna), que dio como consecuencia una peneplanización, afectando el basamento y rocas intrusivas y está relacionado con fallamiento de bloques de alto ángulo y mineralización. Iniciando el cuarto movimiento (Epirogénico) Deformatorio Andino (Epirogénico) en forma cíclica, determinó la elevación de la región andina, iniciando en el Mio-Plioceno y continua hasta la actualidad (Reyes, 1980).

Luego de estos movimientos las superficies fueron rellenas con materiales volcánicos (Volcánico Huambo) y sedimentos lacustres las cuencas continentales (Formación Cajabamba). Finalmente, como subproducto de la glaciación plio - pleistocénica, se acumuló por acción fluvial en las partes bajas, una serie de materiales fluvioglaciares (Formación Condebamba) y Depósitos recientes (Reyes, 1980).

3.12 GEOLOGÍA LOCAL

Los taludes que conforman la carretera que une San Marcos – José Sabogal, se encuentra emplazada sobre un sinclinal, de orientación NE-SW y estructuras de fallas de orientación NW-SE. Ubicándose en el Mesozoico – Cretácico Inferior, constituido por dos grupos: Goyllarisquizga, el cual se formó sobre la cuenca de un mar somero, influenciada por el intercambio de aguas bien oxigenadas. A medida que se hundía la cuenca se llenaba por materiales clásticos, manteniendo su homogeneidad los estratos, debido a su tranquilidad de deposición y Crisnejas origen es un ambiente más profundo, constituido por Calizas, Tabulares y nodulares, margas e intercalaciones de lutitas calcáreas.

Estratigráficamente presenta secuencias de areniscas, cuarcitas de color blanquecino de grano redondeado bien compactas, con intercalaciones de arcillolitas de coloraciones rojizas, violáceas a marrones, de textura fisil deleznables; y calizas: Tabulares, nodulares y lenticulares de color gris verduzcas, depositadas secuencialmente con intercalaciones de lutitas calcáreas de coloraciones grises a marrones, de textura fisil altamente deleznables. Presentando espesores muy variables definiendo el grado de estabilidad de los taludes y laderas de la carretera. Por consiguiente, se evidenciaron tramos cubiertos por Depósitos Cuaternarios de la época Holocénica como: Coluviales, aluviales, coluvio-aluviales; compuestos por materiales de fragmentación angulosa a subangulosa, de textura gruesa a fina como:

Bolonería, grava, arena, limo y arcilla, de coloración: rojiza, gris, amarillenta y marrón, dependiendo de la coloración del basamento rocoso afectado por la meteorización, con composiciones: Heterogéneas, desordenadas distribuidas de forma caótica sin selección ni estratificación aparente.

Esta unidad litoestratigráfica, abarca desde la edad Berriasiano al Albiano, conformando rocas del Cretácico Inferior - Mesozoico, hasta Versiliano - Holoceno, desde 145 Ma. hasta la actualidad, ubicándose en la fase tectónica: Mochica, Peruana y Neotectónica.

3.12.1 Grupo Goyllarisquizga

➤ Formación Chimú

Se ubica en la edad Valanginiana, originadas en un ambiente continental deltaico, compuesto por alternancias de areniscas, cuarcitas de grano grueso a fino de textura redondeada bien compactas con cemento silíceo, con espesores de estratos 0.15 m a 0.35 m., constituyendo una gruesa secuencia estratos gruesos de arenisca en el techo de la secuencia; con $Az = N300^\circ$ y $Bz = 60^\circ$ NE, intercaladas con secuencias estratigráficas de lutitas de coloraciones grises a plomas de espesor 0.20 m. a 0.30 m. Presentando un grosor la Formación Chimú entre 80 m. a 600 m., abarcando desde la progresiva: Km. 11+000 a Km. 11+160 (Geología regional), delimitadas por: planicies y lomadas, geomorfológicamente, con referencia en el caserío Molino de viento.



Figura 12. Progresiva Km. 11+100 – Formación Chimú, ubicada en el flanco izquierdo de la carretera compuesta por estratos de areniscas de grano grueso a fino estratos: 0.15 m a 0.35 m., con orientación: $Az = N300^\circ$ y $Bz = 60^\circ$ NE.

➤ Formación Santa

Está compuesto de intercalaciones de lutitas, calizas margosas y areniscas gris oscuras, con nódulos calcáreos, formado en un ambiente de deposición de mar somero con transgresión marina. Presentando cambios de facies gradacionales ya que el material calcáreo lateralmente es pelítico, cuando se intemperizada generalmente presenta un tono gris marrón. Presentando consistencia de rocas muy deleznables y de textura frágil de espesores de 0.05 a 0.08 m., altamente meteorizada presentando colores: rojizos, amarillentos a anaranjados, con $Az = N290^\circ$ y $Bz = 52^\circ NE$. Conformado un espesor de 100 m. a 150 m. Abarcando la progresiva: Km. 11+160 a Km. 11+300 (Geología regional).



Figura 13. Progresiva Km. 11+250 – Formación Santa, ubicado en la margen izquierda de la carretera presenta secuencias: Lutáceas y limolíticas de textura frágil a muy frágil, siendo muy susceptible a la meteorización y erosión, de la superficie de roca.

➤ Formación Carhuaz

Está compuesta por arenisca cuarzosas blanquecinas de grano fino el piso de la secuencia estratigráfica, seguida por lutitas de coloraciones: Grises amarillentos a plomas y limolitas de coloraciones: Rojizas, violáceas y verdosas; y areniscas rojizas el techo, con orientación $Az = N305^\circ$ y $Bz = 50^\circ NE$, con espesor estratigráfico de 500 m., abarcando desde la

progresiva: Km. 11+300 a Km. 12+225. Ubicándose en la edad: Haueriviense a Barremiense, formándose en un ambiente de deposición continental y quizás cercano a una zona transicional. Actualmente la secuencia de limolitas, se está produciendo deslizamientos debido a su baja resistencia y por cortar los buzamientos transversamente al eje de la carretera generando constantes inestabilidades desde la progresiva: Km. 11+320 a Km. 13+380 (Geología regional).



Figura 14. Progresiva Km. 11+500 – el talud de corte está conformado por rocas de la Formación Carhuaz, compuesta por estratos de areniscas cuarzosas de espesor: 0.20 m. a 0.30 m. de calidad media.

➤ Formación Farrat

Presenta una potencia estratigráfica de 500 m., formado en un ambiente de deposición Deltaico - Fluvial, constituido por las edades: Barremiense a Aptiano. Litológicamente está conformado por areniscas cuarzosas blanquecinas de grano fino granocrecientes con cemento silíceo, constituido por estratos de espesor: 0.15 m. a 0.30 m., en su secuencia estratigráfica paralela, disminuyendo su espesor en la parte superior de la secuencia estratigráfica.

Se ubica en el flanco izquierdo del sinclinal con orientación Az = N315° y Bz = 60°NE, ubicándose desde la progresiva: Km. 12+225 a Km. 12+730 y Km. 12+795 a Km. 13+070 (Geología regional). Geomorfológicamente conforman: Lomadas, laderas y escarpas, por su esbeltez litológica; sin embargo, actualmente esta formación se encuentra en constante meteorización en varios tramos generando deslizamientos y zonas inestables.



Figura 15. Progresiva Km. 12+900 – Se visualiza areniscas ubicadas en el flanco izquierdo del talud de la carretera de grano fino con espesor: 0.15 m. a 0.25 m. - Formación Farrat.

➤ Formación Inca

Está conformado por intercalaciones de calizas areniscosas, areniscas calcáreas de coloraciones gris rojizas, lutitas ferruginosas y lechos de cuarcitas de coloraciones rojizas, anaranjadas a amarillentas. Estratigráficamente se ubica en la edad Albiana, conformando espesores de 100 m. a 150 m, orientación Az = N298° y Bz = 57°NE, ubicándose desde la progresiva: Km. 13+070 a Km. 13+165 (Geología regional). Esta unidad marca el inicio de la transgresión marina del Cretáceo inferior, por la presencia de fósiles, acotando que se formó en un ambiente marino de poca profundidad de aguas agitadas y muy oxigenadas.

3.12.2 Grupo Crisnejas

➤ Formación Chúlec

Su ambiente de formación se desarrolló en aguas más profundas, conformada por calizas tabulares competentes de espesor de 0.40 m. a 0.60 m.; con alternancias de calizas: nodulares y lenticulares de espesores: 0.15 m. a 0.30 m., con intercalaciones de lutitas de calcáreas de espesor: 0.55 m. a 0.70 m., con coloraciones gris azuladas a crema a gris amarillento, por el intemperismo, presentando aspecto terroso por su fragilidad. Geomorfológicamente conforman: Lomadas y laderas, con pendientes suaves a moderadas. Constituyendo el sinclinal, ubicado en la progresiva: Km. 12+730 a Km. 12+795 y Km. 13+165 a Km. 15+000 (Geología regional). Generalmente con espesor de 200 m. a 250 m., con edad Albiana.



Figura 16. El talud de corte está conformado por basamento rocoso de la Formación Chúlec, ubicado en la progresiva Km. 13+250, constituido por intercalaciones de calizas nodulares a lenticulares, la parte baja y media del talud, con rellenos de lutitas calcáreas y la parte superior de calizas tabulares.

3.12.3 Depósitos Cuaternarios

➤ Aluviales

Está conformado por materiales: grava (05%), arena (15%), limo (35%) y arcilla (45%), de textura frágil, con cementación moderada, con alta a moderada plasticidad, siendo de muy baja resistencia, de coloraciones amarillentas a anaranjadas, relacionados con movimientos geodinámicos como: Deslizamientos, flujos y derrumbes. Siendo muy susceptibles a cambios texturales por la presencia de agua o niveles freáticos, ubicado en varios tramos de la progresiva, constituyendo paleocanales acumulación cuaternaria.



Figura 17. Ubicado en la progresiva Km. 13+440, en el lado izquierdo de la carretera, constituido por materiales deleznables de coloraciones anaranjadas.

➤ Coluviales - Aluviales

Se caracteriza por contener en su litología depositacional: grava (35%), arena (25%), limo (20) y arcilla (20%), compuesto por gravas angulosas a subangulosas de 0.07 m. a 0.04 m., con matriz cementante limosa calcárea conformando una matriz rígida, con cementación moderada, con compacidad muy densa, de origen residual. Presentando coloraciones: Amarillentas, rojizas a blanquecinas, constituyendo taludes estables. Conformando taludes inestables actualmente, formando deslizamientos circulares de pie.



Figura 18. Ubicada en la progresiva Km. 11+600, del lado izquierdo evidenciándose por la saturación de los niveles freáticos en las partes altas de los taludes.

➤ Coluvio-Aluviales

Se encuentran ubicados en laderas y taludes, formando terrazas aluviales depositacionales compuestos por: Bolonería (35%), grava (30%), arena (15%), limo (10%) y arcilla (10%), caracterizándose por contener en su composición de bloques angulosos de roca areniscosa a calcárea, con diámetro promedio de 0.30 m. a 0.15 m. con gravas angulosas, con matriz englobante de: Arena, limo y arcillas, distribuidos de forma caótica. Habiéndose formado por: Alteración, fracturamiento, desintegración insitu y acción de la gravedad; del macizo rocoso acumulándose en las partes bajas formando actualmente: lomadas, laderas y escarpas; caracterizándose por formar conos de escombros o detritos, por su gran proporción de fragmentos de rocas, en relación con los finos.



Figura 19: Depósito Coluvio-Aluvial, constituye conos de detritos, por su gran proporción de fragmentación gruesa, evidenciándose la formación de cárcavas por su sección transversal en forma de V.

➤ Coluviales

Lo conforman afloramientos rocosos de mala a muy mala calidad, expuestos a meteorizaciones: Físicas y químicas, afectando la roca matriz o basamento rocoso, constituyendo zonas muy frágiles y susceptibles a inestabilidades, generando conos de derrubios por su exposición a la erosión. Generalmente se observa en las Formaciones: Chimú, Santa, Farrat y Chúlec, generando zonas de inestabilidad y peligrosidad, por su alto grado de incidencia.



Figura 20: Depósito Coluvial, ubicado en la Formación Carhuaz, generando acumulaciones de rocas: cúbicas a tabulares en el pie del talud.

3.13 UNIDADES MORFOGENÉTICAS

Regionalmente, los afloramientos rocosos y depósitos se encuentran formando dos unidades geomorfológicas: la primera, denominada unidad de franja cordillerana por el alineamiento de cerros: Mun Mun y Michal, en orientación: SW-SE, presentando superficies: Empinadas y escarpadas, definiendo valles jóvenes, con sección transversa en forma de V, delimitados por: Pico, hombrera y collado, constituyendo áreas de erosión constante; y la segunda lo conforma superficies semiplanas a onduladas con pendientes suaves a moderadas, conformando: Terrazas aluviales y valles maduros, ubicándose en las partes bajas de las laderas y taludes

La superficie que presenta actualmente el área de investigación es resultado de procesos: Endógenos (tectónicos), exógenos (erosivos) y geodinámicos, que se han desarrollado y vienen desarrollándose en este territorio a lo largo de millones de años. Sin embargo, la geomorfología local está conformada por procesos geotectónicos de las rocas sedimentarias del Cretáceo Inferior y Cuaternario, por procesos exógenos hasta la actualidad, siendo claramente controlada por la resistencia de las rocas.

El modelamiento superficial está ligado a las unidades litológicas compuestas de afloramientos de rocas sedimentarias, formando: Laderas y escarpas, constituidas por presentar pendientes $> 25^\circ$, en cambio los depósitos cuaternarios se localizan en las partes bajas conformando: Terrazas, planicies y lomadas; configurando superficies suaves a onduladas, están directamente relacionadas con: Procesos de erosión, génesis, edad, geometría y tipo de relieve de las rocas. Clasificándolo en 4 unidades geomorfológicas locales:



Figura 21: Vista de la geomorfología de la zona de investigación de la carretera: San Marcos – José Sabogal.

Las planicies y lomadas, están conformadas por Depósitos: Coluviales, Aluviales y Coluvio-aluviales, constituyendo superficies redondeadas a subredondeadas, con pendientes 0° a 25° . Siendo aprovechadas por los pobladores para la agricultura y ganadería, por ser áreas trabajables y accesibles, constituyendo el 71.11% de las unidades geomorfológicas. Por consiguiente, las laderas y escarpas, presentan pendientes 25° a 90° , constituidos en su totalidad por basamentos rocosos muy resistentes formando fallarones empinados inaccesibles, utilizados por los poblados para pastoreo de caprinos y ovinos. Constituyendo el 20.89% esta unidas geomorfológica.

Cuadro 7. Cuantificación porcentual de las unidades morfogenéticas y orográficas, de la carretera: San Marcos – José Sabogal.

Unidad morfogenética	Orografía	Tramo	Porcentaje (%)
Planicie	Tipo 1	Km. 11+000 - Km. 11+150, Km. 11+235 - Km. 11+410, Km. 11+420 - Km. 11+450, Km. 11+470 - Km. 11+490, Km. 11+551 - Km. 11+568, Km. 11+627 - Km. 11+669, Km. 11+707 - Km. 11+745, Km. 11+838 - Km. 11+848, Km. 11+854 - Km. 11+872, Km. 11+911 - Km. 11+951, Km. 12+960 - Km. 12+099, Km. 12+186 - Km. 12+246, Km. 13+045 - Km. 13+239, Km. 14+208 - Km. 14+375, Km. 14+780 – Km. 15+000.	33.33
Lomada	Tipo 2	Km. 11+150 - Km. 11+200, Km. 11+410 - Km. 11+420, Km. 11+490 - Km. 11+551, Km. 11+568 - Km. 11+627, Km. 11+669 - Km. 11+707, Km. 11+745 - Km. 11+838, Km. 11+848 - Km. 11+854, Km. 11+872 - Km. 11+911, Km. 11+951 - Km. 12+060, Km. 12+099 - Km. 12+186, Km. 12+246 - Km. 12+300, Km. 12+535 - Km. 12+659, Km. 12+759 - Km. 13+025, Km. 13+239 - Km. 13+297, Km. 13+985 - Km. 14+208, Km. 14+375 - Km. 14+560, Km. 14+734 - Km. 14+780.	37.78
Ladera	Tipo 3	Km. 11+200 - Km. 11+235, Km. 11+450 - Km. 11+470, Km. 12+246 - Km. 12+535, Km. 12+659 - Km. 12+759, Km. 13+025 - Km. 13+045, Km. 13+297 - Km. 13+650, Km. 13+726 - Km. 13+726, Km. 14+560 - Km. 14+687, Km. 14+701 - Km. 14+734.	20.00
Escarpa	Tipo 4	Km. 02+650 - Km. 02+726, Km. 02+810 - Km. 02+985, Km. 03+687 - Km. 03+701.	8.89

3.14 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Las geoestructuras presentes muestran la ocurrencia de esfuerzos tectónicos compresivos principales de orientación SW-NE, plegando del Cretácico Inferior formando el sinclinal, ubicándose el eje en la Formación Chúlec en la progresiva Km. 14+090. Sin embargo, los esfuerzos tectónicos liberaron energía acumulada plasmándola en movimientos cinemáticos principales de fallamiento dextral de orientación NNW-SSE, con salto de falla 120 m. las formaciones hacia al SE, desde la progresiva: Km. 12+700 a Km. 15+000, por consiguiente, ocurrió un segundo movimiento tectónico de orientación ENE-WSW, constituido por fallas sinestrales con salto de falla 50 m.

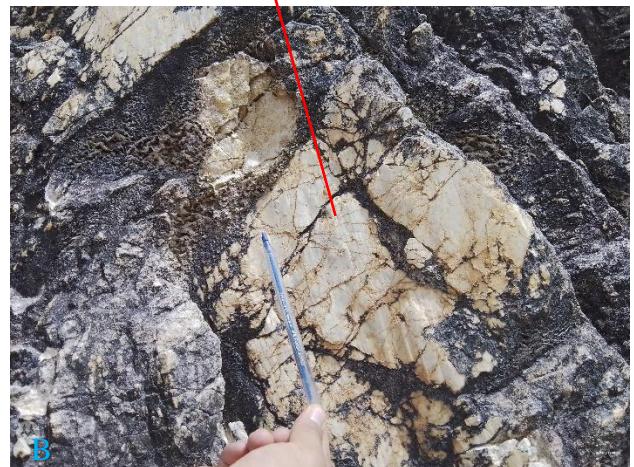


Figura 22: A. Espejo de falla Inversa Sinestral (IxSx) en la cara libre del talud de la Formación Carhuaz, emplazado en las rocas cuarzosas estratificadas. B. Crecimiento de cuarzo masivo en el plano de falla, observándose: Slickensides, estrías y escalones, con orientación SW.

La Figura 22, se ubica en la progresiva Km. 12+425, con plano de falla de orientación $Az = N15^\circ$, $Bz = 71^\circ SE$ y $pitch = 65^\circ$, de cinemática Inversa Sinestral (IxSx), en los tectoglifos: estriados, escalonados y pulidos, en la superficie del cuarzo masivo, con esfuerzos tectónicos (T, P) $\sigma_1(86.20, 22.10)$, $\sigma_2(186.40, 23.60)$ y $\sigma_3 (318, 56.70)$. Por lo contrario, la Figura 23, plasma un plano de falla Normal Dextral (NxDx), con orientación $Az = N35^\circ$, $Bz = 55^\circ SE$ y $pitch = 36^\circ$, esfuerzos tectónicos (T, P) $\sigma_1(4.20, 48.20)$, $\sigma_2(176.70, 41.50)$ y $\sigma_3 (270.0, 3.70)$. Analizando por la teoría de los diedros rectos la Figura 22, es falla inversa y la

Figura 23, es falla dextral. Realizando agrupación de estructuras de fallamiento, mediante la Teoría de Ramsey y Diedros rectos, se obtuvo un alineamiento por falla inversa de orientación NNE-SSW.



Figura 23: A. Plano de falla NxDx en la Formación Carhuaz, ubicado en la progresiva Km. 11+500. B. Estrías de falla cristalizadas con superficie de cuarzo, con orientación NE.



Figura 24: A. Se ubica en la Formación Farrat, en el lado izquierdo de la carretera, presentando falla IxDx. B. Indicadores cinemáticos del espejo de falla.

Los planos de falla de las Figuras: 24 y 25, se encuentran ubicadas en la Formación Farrat en el flanco izquierdo de la carretera en las progresivas: Km. 12+750 (El plano de falla IxDx, tiene con orientación $Az = N150^\circ$, $Bz = 38^\circ SW$ y $pitch = 24^\circ$ y esfuerzos tectónicos (T,P) $\sigma_1(13.70, 22.30)$, $\sigma_2(269.50, 34.20)$ y $\sigma_3(132.10, 47.20)$) y Km. 12+960 (El plano de falla Normal Dextral (NxRx), tiene con orientación $Az = N153^\circ$, $Bz = 62^\circ SW$ y $pitch = 24^\circ$ y esfuerzos tectónicos (T,P) $\sigma_1(115.90, 35.90)$, $\sigma_2(286.50, 53.80)$ y $\sigma_3(22.60, 4.50)$). Sin embargo, la interpretación (Pitch y plunge) de ángulos por: Diedros rectos y cinemática, definen una falla dextral de alineación proyectándose hasta la parte superior del afloramiento rocoso, constituyendo el plano de desplazamiento principal de la Formación Chúlec.



Figura 25: A. Plano de falla de cinemática Normal Dextral ($NxDx$), en la Formación Farrat, ubicada en la progresiva Km. 12+960. B. Orientación del movimiento cinemático del plano de falla mediante indicadores cinemáticos.

Desde la progresiva Km. 13+820 a 14+100, se encuentra delimitados por fallas normales con orientación $Az = N330^\circ$, $Bz = 68^\circ NE$, ubicados en la Formación Chúlec, desplazando la caja piso de 3.50 m. a 4.00 m., como se observa en la Figura 26, en el flanco izquierdo de los taludes de corte, conformando un graben o fosa tectónica, por su comportamiento elástico formó plegamientos coherentes con el tensor de esfuerzo principal, definiendo pliegues de arrastre.



Figura 26: Falla normal ubicada en la Formación Chúlec, con salto de falla 3.50 m.

3.15 GEODINÁMICA

Los cartografiados proporcionaron información precisa de la composición litológica y el comportamiento de los taludes y laderas, clasificándolos como movimientos de masas constituidos por tres grupos: Deslizamientos, cárcavas caídas de rocas, cono de detritos y rupturas (Planares, cuñas y vuelcos), siendo condicionados por agentes: Externos e internos, en el área inestabilizada.

Las inestabilidades fueron causadas por los cambios internos en su composición litológica, mediante sobredimensionamientos de la variable infiltración, produciendo remociones de masas cambiando la geometría del talud o ladera, teniendo relaciones directas con la resistencia interna del material, disminuyendo la cohesión y el ángulo de fricción con la superficie de falla, observándose en zanjas de coronación o agrietamientos en el terreno de 0.10 m. a 0.30 m. paralelas al eje de la carretera, formando escarpes: Principales (1.20 m. de altura), secundarios (0.80 m.), ubicada desde la progresiva: Km. 11+385 a Km. 11+820; siendo la zona de inestabilidad más crítica por su constante desplazamiento del talud y ladera.

Este tramo está conformado por dos movimientos de masa: Activo (Se ubica desde la progresiva: Km. 11+385 a Km. 11+465, formando zonas de acumulación de material viscoso cuaternario con saturación de agua constante, ocupando el pie del talud y también parte de la carretera, definido geodinámicamente como superficie de separación) y reactivado (lo conforma la progresiva: Km. 11+465 a Km. 11+820, evidenciándose por desplazamientos lentos del material cuaternario, siendo afectado de igual manera por el nivel freático la estabilidad de la ladera). En consecuencia, el riesgo geodinámico muestra que la vulnerabilidad es directamente a la afectación a la vía terrestre, con peligro de origen natural.

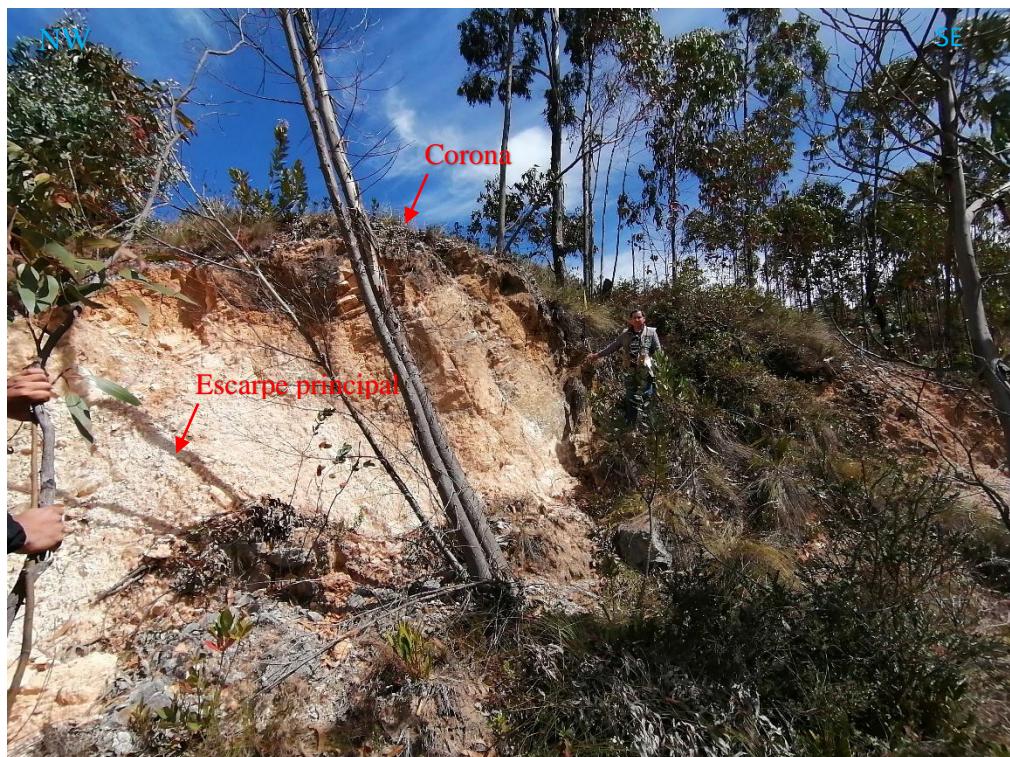


Figura 27: Escarpe principal de falla, formado en la Formación Carhuaz, desplazando a los depósitos: Coluvio-aluvial y Aluvial, ubicada desde la progresiva: Km. 11+385 a Km. 11+820.

Por consiguiente, el escarpe ubicado desde la progresiva: Km. 13+390 a Km. 13+515, está conformado por material limo arcilloso, ocasionando deslizamiento por ser la sección de corte vertical, no estando influenciado por niveles freáticos, salvo si está afectado por escorrentía superficial ocasionando inestabilidades progresivas, pero logando ser mitigadas con una adecuada estabilización. Consecuentemente se observan dos deslizamientos ubicados en las progresivas: Km. 11+205 a 11+260 (Formación Santa) y Km. 12+460 a Km. 12+550 (Formación Farrat), de menor magnitud, pero constituidos por materiales altamente meteorizados.

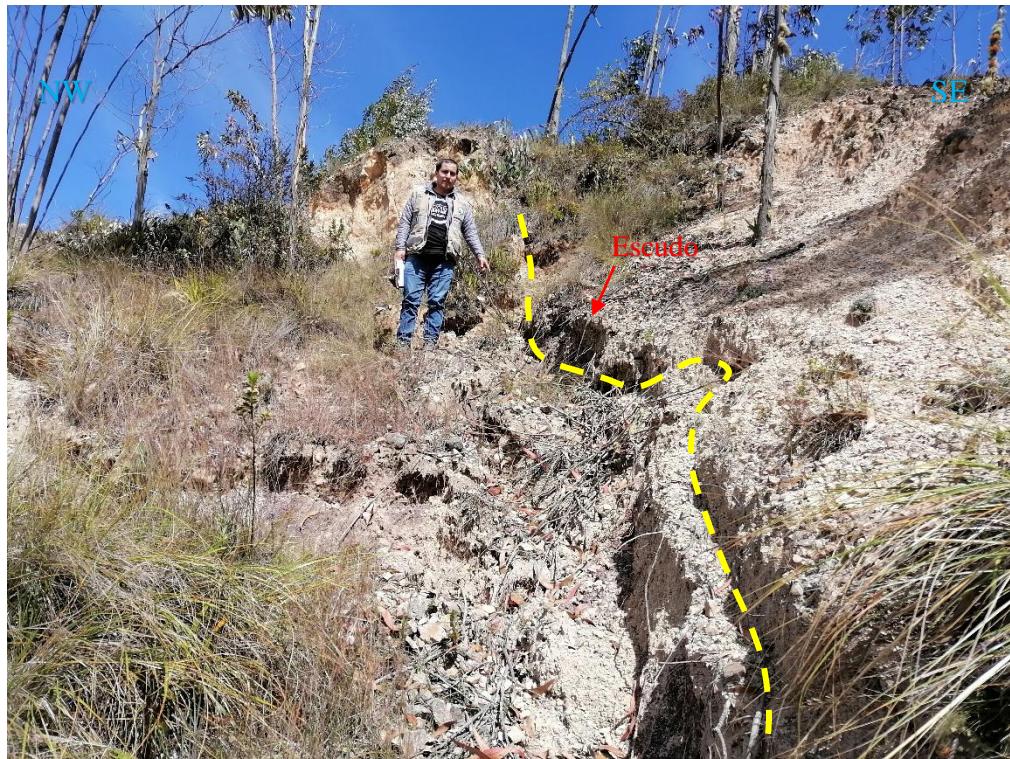


Figura 28: Delimitación del deslizamiento circular de pie, ubicado en el lado izquierdo con desplazamiento de 0.50 m. a 0.60 m. Afectado progresivamente la parte superior de la ladera por el agrietamiento en el terreno. Ubicada desde la progresiva: Km. 11+385 a Km. 11+820.

Consecuentemente las caídas de rocas, están ubicados en afloramientos rocosos de las Formaciones: Carhuaz y Chúlec, categorizándolos como rocas de calidad: Regular a buena, formando bloques de geometría: Cúbica a tabular. Los taludes presentan buzamiento de 75° a 85°, de altura de 13 m. a 17 m., consecuentemente forman en la cara libre grietas de tracción de 2.50 cm. a 7 cm., acompañadas como material lubricante arcilloso entre las aperturas, cayendo bloques de rocas de dimensiones: 0.85 m. a 1.20 m. de diámetro, afectando la transitabilidad de vehículos y pobladores. Formando por su acumulación en el pie del talud Depósitos Coluviales, ubicados en la Formación Carhuaz desde la progresiva: Km. 11+345 a Km. 11+395; en cambio en la Formación Chúlec por ser la sección de corte casi vertical y la carpeta de rodadura de 5.50 m. a 6.00 m., ocasiona obstaculamiento vehicular, categorizándolo como zona de peligro desde la progresiva: Km. 13+300 a Km. 13+390. Acotando además que se suscitan caídas de rocas en la progresivas: Km. 11+180 a 11+220 (Formación Santa) y Km. 12+560 a Km. 12+590 (Formación Farrat), de menor susceptibilidad por su incidencia directa a la carretera, pero hay que tener en consideraciones por el grado de inestabilidad que están ocasionando actualmente.



Figura 29: Caída de rocas en la Formación Chúlec, ubicado en la progresiva: Km. 13+300 a Km. 13+390.

En la progresiva: Km. 11+860 a Km. 12+120, presenta composiciones de materiales: Gravosos (65%) y limosos (35%), definiéndolo como un paleocauce de cono de detritos susceptibles a erosiones, por la escorrentía superficial, formando en su estructura incisiones de sección transversal en forma de V, constituyendo cárcavas por la geometría erosiva. Sin embargo las cárcavas se encuentran ubicadas desde la progresiva: Km. 11+425 a Km. 12+920, proyectándose hasta las partes inferiores la carretera, en muchos casos logrando formar deslizamientos en los suelos de composición gravosa.

3.16 GEOTECNIA

El cartografiado geológico - geotécnico, muestra el origen del riesgo que está originando en la inestabilidad de taludes y laderas, están compuestos por: Roca y suelos, aplicando metodologías de obtención de información de campo, para definir el modelo geométrico de cada estación geotécnica, para determinar: Probabilidad de superficie de fallamiento o ruptura, mediante la utilización de programas numéricos como: RocData, Dips, Swedge, RocPlane y Rocfall, aplicando criterios: Hoek - Brown y Morh Coulomb. Por consiguiente, la interpretación y análisis, tendrán que ver las variables independientes planteadas que están generando la inestabilidad

3.16.1 Estación E-1

La estación geotécnica se ubica en el flanco izquierdo de la carretera, en la progresiva: Km. 11+345 a Km. 11+395, litológicamente ubicado en la formación Carhuaz; compuesta de areniscas de grano medio levemente meteorizadas con pátinas de coloraciones: Amarillentas, anaranjadas a rojizas, con bajo grado de fracturamiento formando bloques regulares, con estimación a la resistencia a la compresión uniaxial 60 MPa (R4). Geoestructuralmente presenta tres familias de discontinuidades, formando bloques cúbicos, distribuidos en el macizo rocoso con espesores: 0.20 m. a 0.35 m., con persistencia 10 m. a 20 m. la estratificación proyectándose en la cara libre del talud. Sin embargo, las propiedades de las discontinuidades muestran aberturas: 1 mm. a 5 mm. y en otros casos hasta 7 cm., llenas por material arcillosos y en otros casos vacías, presentando grado de alteración: Inalterado a ligeramente alterado, los planos de las juntas están afectadas por la permeabilidad: Primaria y secundaria, del agua en el macizo rocoso, perturbando la estabilidad del afloramiento, por consiguiente, se evidencian rupturas: Planares, cuñas y vuelcos; así como caída de rocas.

Aplicando los criterios empíricos se utilizó el cartografiado por línea de detalle, para la recolección de datos: cualitativos y cuantitativos, del afloramiento rocoso mediante el formato de Bieniawski (1989). Sin embargo, en gabinete se utilizó la cuantificación del macizo rocoso por: RQD, RMR y GSI, para posteriormente utilizar el software RocData obtenido las constantes elásticas del macizo rocoso para el procesamiento matemático. En consecuencia, se obtuvo resultados importantes en función de su cinemática de inestabilidad (Dips), con porcentaje de probabilidades de ruptura: Planar (4.44%, D-1) cuña (6.37%, D-1 y D-2) y vuelco (75.56%, base deslizante D-1), muy por debajo del valor requerido sin embargo la ruptura por vuelco está ocasionando gran incidencia de inestabilidad por su alto valor reportado a favor del talud de $\psi_T = 62^\circ$ y $H = 12$ m. En consecuencia, para verificar la inestabilidad se fundamentó mediante la obtención del FS por cada ruptura mediante: RocPlane y Swedge, obteniendo $FS > 1.5$, analizadas en tensiones: Totales, efectivas y efectivas + sismicidad.

Clasificación Hoek - Brown

Resistencia comp. uniaxial intacta (sigci) = 60 MPa

GSI = 51 mi = 15 Factor de disturbancia = 0.70

Módulo intacto (Ei) = 18,000 MPa

Modulus ratio (MR) = 300

Criterio Hoek - Brown

mb = 1.016 s = 0.0008 a = 0.505

Morh - Coulomb

Cohesión = 0.304 MPa Ángulo de fricción = 53.86°

Parámetros de la masa rocosa

Resistencia a la tracción = -0.049 MPa

Resistencia compresión uniaxial = 1.658 MPa

Resistencia global = 7.965 MPa

Módulo de deformación = 2,058.88 MPa

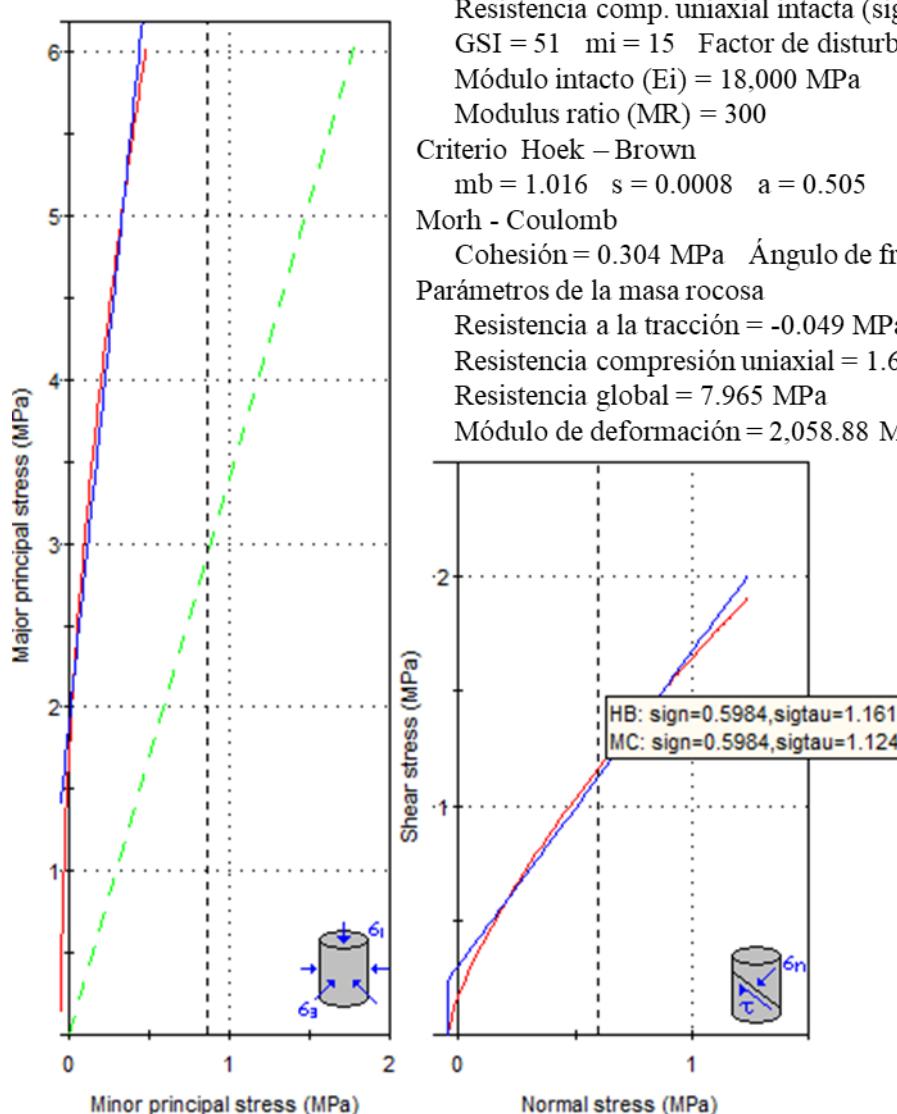
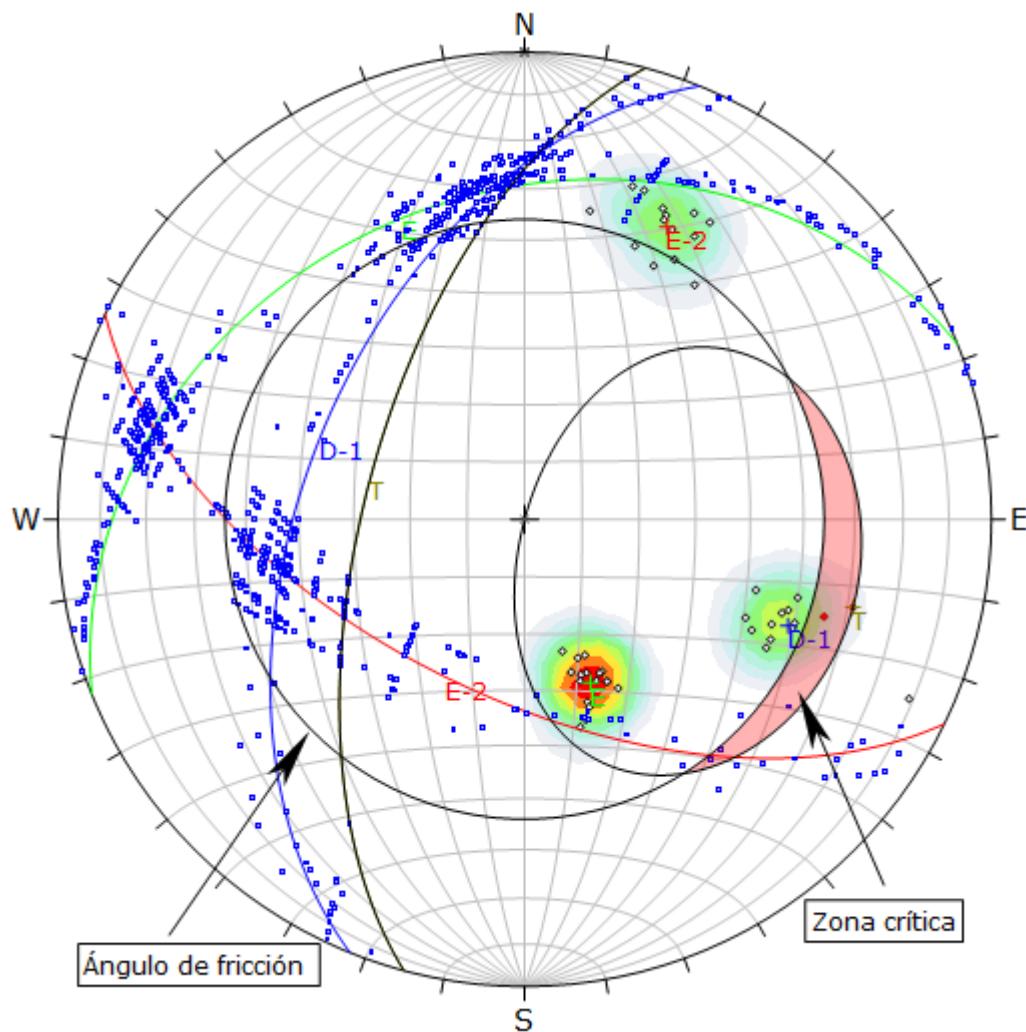
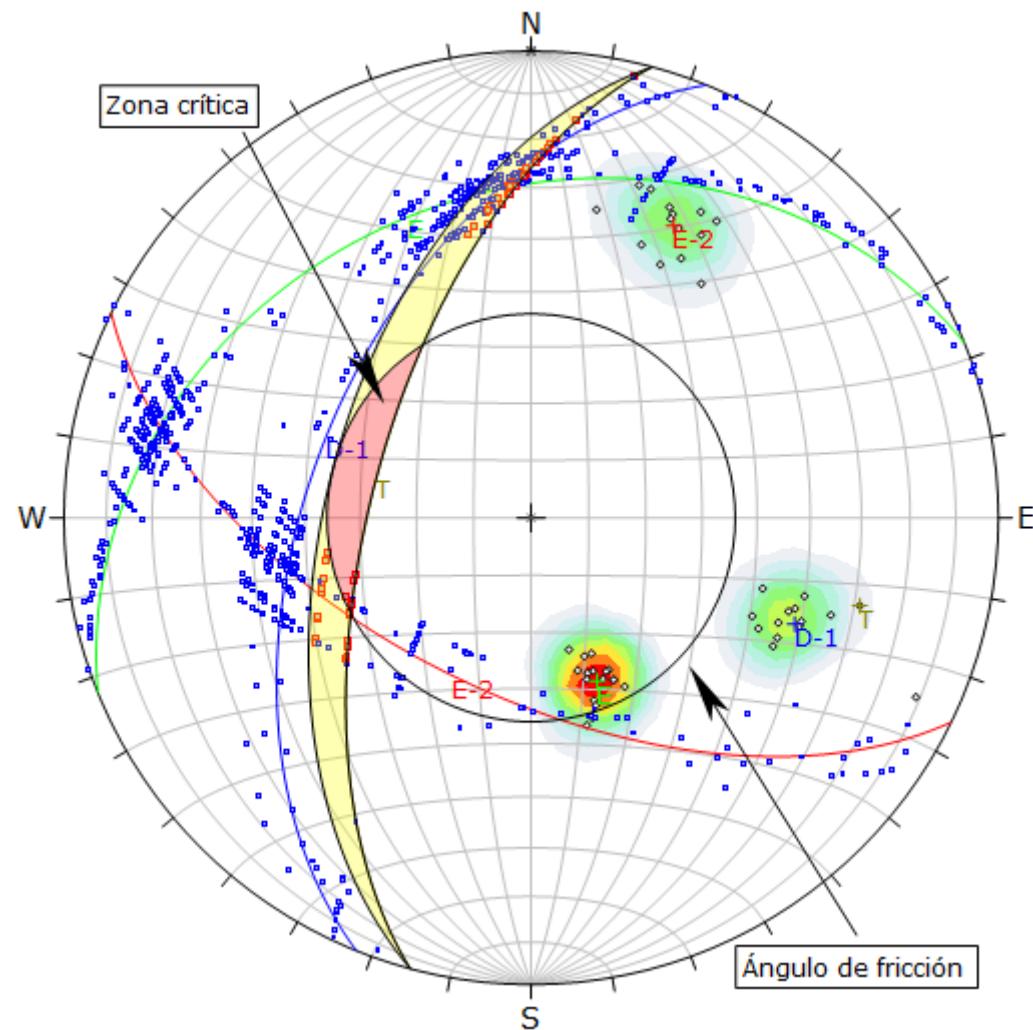


Figura 30: Estación geotécnica E-1. Relación de esfuerzos principales: Mayor vs. Menor (Hoek - Brown) y esfuerzo: Corte y normal (Morph - Coulomb).



Symbol	Feature			
◇	Pole vectors			
◆	Critical vectors			
■	Intersection			
Color	Density concentrations			
	0.00 - 3.40			
	3.40 - 6.80			
	6.80 - 10.20			
	10.20 - 13.60			
	13.60 - 17.00			
	17.00 - 20.40			
	20.40 - 23.80			
	23.80 - 27.20			
	27.20 - 30.60			
	30.60 - 34.00			
Maximum density	33.50%			
Contour data	Polo vectors			
Contour distribution	Fisher			
Counting circle size	1.00%			
Kinematic analysis	Planar siliding			
Slope dip	62°			
Slope Dip direction	285°			
Friction angle	54°			
	Critical	Total	%	
Planar siliding (All)	2	45	4.44%	
	Color	Dip	Dip direction	Label
User planes				
1	■	31°	338°	E
2	■	51°	292°	D-1
3	■	59°	206°	D-2
4	■	62°	285°	T
Plot Mode	Pole vectors			
Vector count	45 (45 entries)			
Intersection mode	Grid data planes			
Intersections count	989			
Hemisphere	Lower			
Projection	Equal area			

Figura 31: Estación geotécnica E-1. Probabilidad de ruptura planar 4.44%, englobando al polo de la familia: D-1; a favor del talud.



Symbol	Feature		
◇	Polo vectors		
■	Critical intersection		
■	Intersection		
Color	Density concentrations		
	0.00 - 3.40		
	3.40 - 6.80		
	6.80 - 10.20		
	10.20 - 13.60		
	13.60 - 17.00		
	17.00 - 20.40		
	20.40 - 23.80		
	23.80 - 27.20		
	27.20 - 30.60		
	30.60 - 34.00		
Maximum density	33.50%		
Contour data	Polo vectors		
Contour distribution	Fisher		
Counting circle size	1.00%		
Kinematic analysis	Wedge sliding		
Slope dip	62°		
Slope Dip direction	285°		
Friction angle	54°		
	Critical	Total	%
Wedge sliding	63	989	6.37%
Color	Dip	Dip direction	Label
User planes			
1	■	31°	338°
2	■	51°	292°
3	■	59°	206°
4	■	62°	285°
Plot Mode	Pole vectors		
Vector count	45 (45 entries)		
Intersection mode	Grid data planes		
Intersections count	989		
Hemisphere	Lower		
Projection	Equal area		

Figura 32: Estación geotécnica E-1. Probabilidad de ruptura en cuña con 6.37%, englobando a la intersección de las familias: D-1 y D-2; en orientación indirecta.

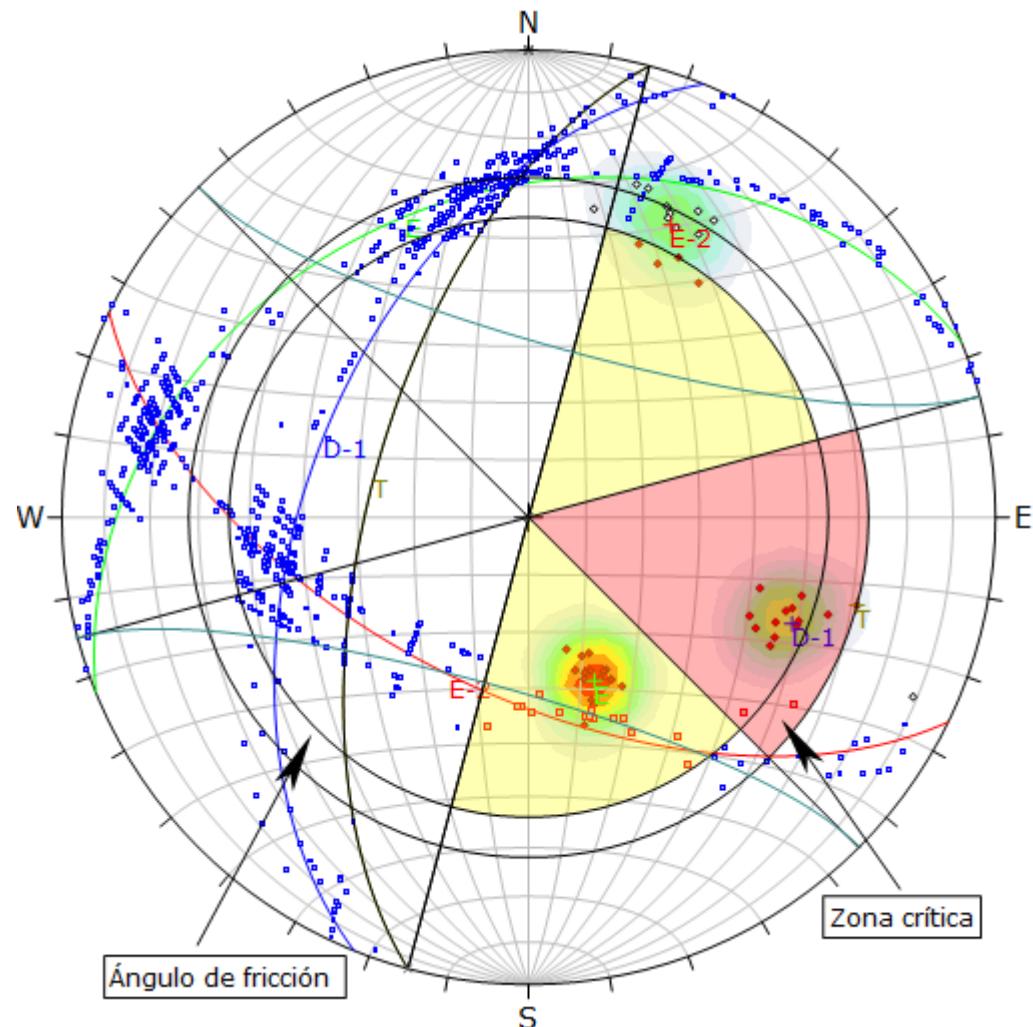


Figura 33: Estación geotécnica E-1. Probabilidad de ruptura por vuelco en base deslizante 75.56%, englobando al polo de la familia: D-1; a favor del talud

Symbol	Feature			
◊	Polo vectors			
◆	Critical vectors			
■	Critical intersection			
■	Intersection			
Color	Density concentrations			
Light Blue	0.00 - 3.40			
Medium Blue	3.40 - 6.80			
Dark Blue	6.80 - 10.20			
Light Green	10.20 - 13.60			
Medium Green	13.60 - 17.00			
Dark Green	17.00 - 20.40			
Yellow	20.40 - 23.80			
Orange	23.80 - 27.20			
Red	27.20 - 30.60			
Dark Red	30.60 - 34.00			
Maximum density	33.50%			
Contour data	Polo vectors			
Contour distribution	Fisher			
Counting circle size	1.00%			
Kinematic analysis	Direct toppling			
Slope dip	62°			
Slope Dip direction	285°			
Friction angle	54°			
Lateral milits	30°			
	Critical	Total	%	
Direct toppling (Intersection)	2	989	0.20%	
Oblique toppling (Intersection)	15	989	1.52%	
Base plane (All)	34	45	75.56%	
	Color	Dip	Dip direction	Label
User planes				
1	■	31°	338°	E
2	■	51°	292°	D-1
3	■	59°	206°	D-2
4	■	62°	285°	T
Plot Mode	Pole vectors			
Vector count	45 (45 entries)			
Intersection mode	Grid data planes			
Intersections count	989			
Hemisphere	Lower			
Projection	Equal area			

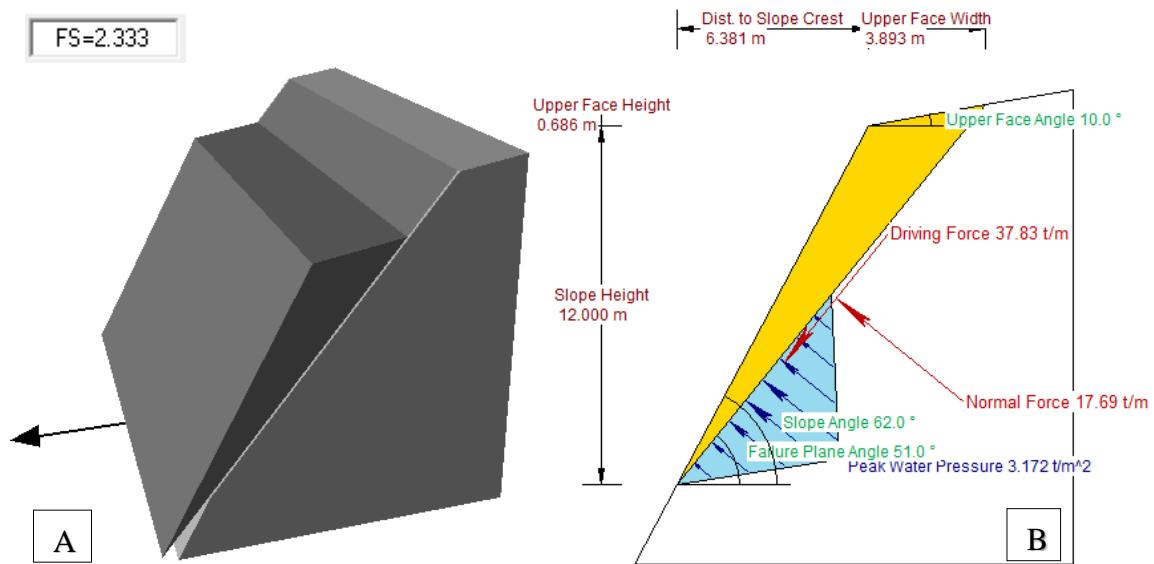


Figura 34: Estación geotécnica E-1. A. Block diagrama – RocPlane, del macizo rocoso en 3D mostrando la ruptura planar. B. Gráfica de dimensionamiento por análisis de ruptura planar, en condiciones FSsaturadas = 2.333.

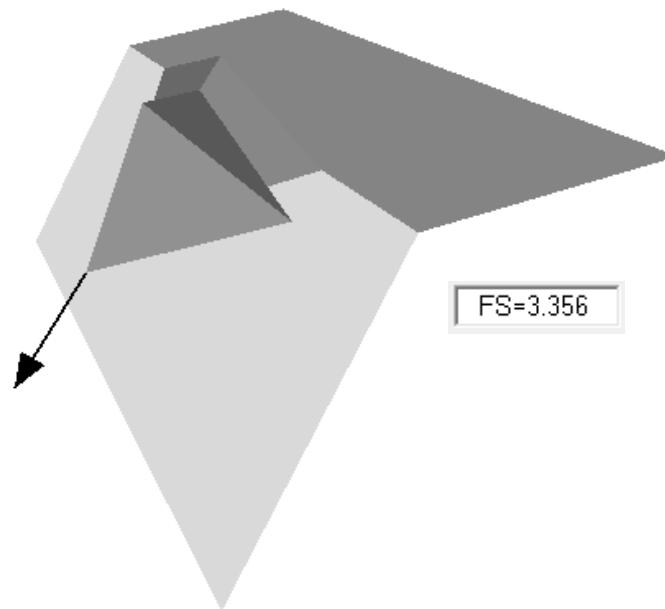


Figura 35: Estación geotécnica E-1. A. Block diagrama – Swedge, del macizo rocoso en 3D mostrando la ruptura en cuña en condiciones FSsaturadas = 3.356.

3.16.2 Estación E-2

La estación E-2, se ubica en la progresiva: Km. 13+300 a Km. 13+390, emplazado en la unidad geomorfológica: Ladera y escarpa, compuesto por calizas gris verduzcas de la Formación Chúlec, conformado por secuencias estratigráficas de calizas tabulares de 0.30 m. a 0.45 m. de espesor, con resistencia a la compresión uniaxial de 115 MPa., levemente meteorizadas y bajo grado de fracturamiento. Los cartografiados geomecánicos en este tramo muestra diaclasamientos que definen el control estructural dominado por la orientación y buen trabado de las diaclasas en el macizo rocoso notándose claramente que el ángulo de fricción no corta a ninguna diaclasa estereográficamente. Así mismo las aberturas en el macizo rocoso muestra espaciamiento de 5 mm. a 9 cm. siendo controladas por los trabados que presenta, categorizándose empíricamente: RQD = 81.86%, RMR = 63 y GSI = 58, con valoración de buena calidad.

La proyección estereográfica muestra porcentajes de probabilidad de ruptura del macizo rocoso relacionado con la inestabilidad, mediante el software Dips, ruptura: Planar (2.22%, D-2), cuña (4.65%, D-1 y D-2) y vuelco (33.33%, base deslizante D-2). Por consiguiente, la ruptura planar muestra un polo fuera de la zona crítica, no logrando generar la inestabilidad geotécnica por tipo de ruptura, sin embargo la ruptura por cuña muestran líneas de intersección (puntos) de color rojizo en marcados por la envolvente de luz y el ángulo de fricción, definiendo de esta manera áreas puntualizadas, en algunos están ubicados en la zona crítica de inestabilidad; y finalmente la ruptura en cuña envuelve a la junta D-2 generando inestabilidades constante en la caída de rocas. Los resultados de probabilidad de ruptura muestran que es un tramo estable por sus bajos porcentajes, en cambio la por vuelco muestra inestabilidades constantes.

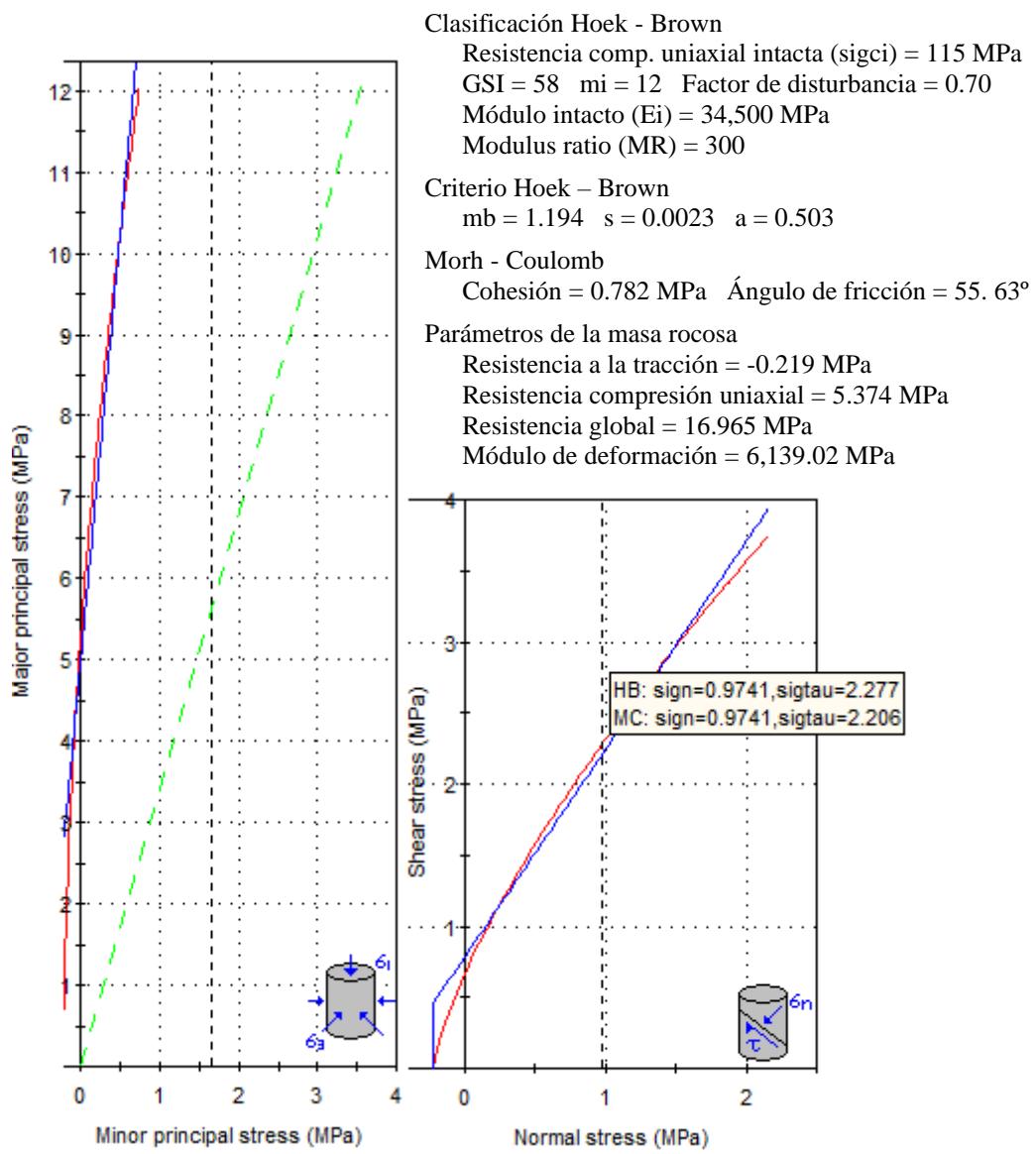


Figura 36: Estación geotécnica E-2. Relación de esfuerzos principales: Mayor vs. Menor (Hoek - Brown) y esfuerzo: Corte y normal.

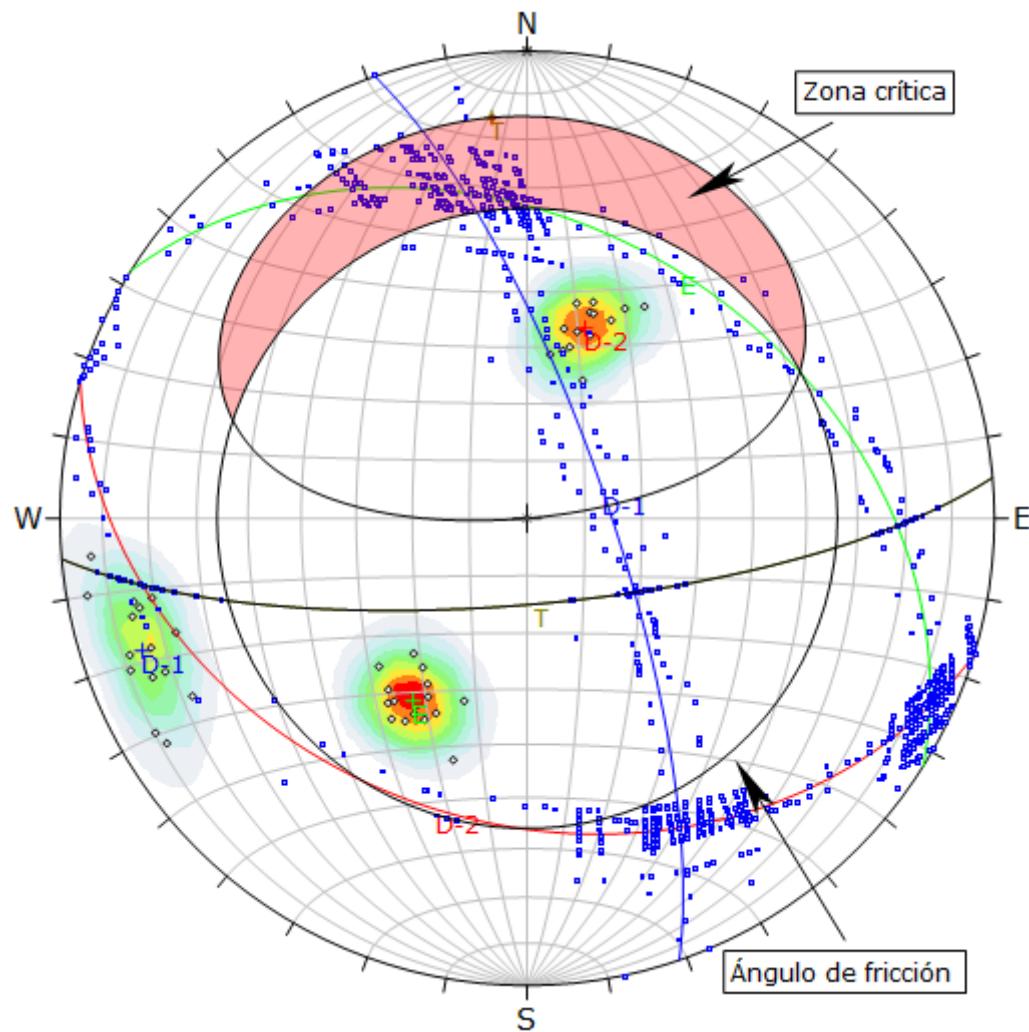


Figura 37: Estación geotécnica E-2. Probabilidad de ruptura planar 2.22%, englobando al polo de la familia: D-2; a favor del talud.

Symbol	Feature		
◊	Polo vectors		
◆	Critical vectors		
■	Intersection		
Color	Density concentrations		
	0.00 - 2.60		
	2.60 - 5.20		
	5.20 - 7.80		
	7.80 - 10.40		
	10.40 - 13.00		
	13.00 - 15.60		
	15.60 - 18.20		
	18.20 - 20.80		
	20.80 - 23.40		
	23.40 - 26.00		
Maximum density	25.21%		
Contour data	Polo vectors		
Contour distribution	Fisher		
Counting circle size	1.00%		
Kinematic analysis	Planar siliding		
Slope dip	75°		
Slope Dip direction	175°		
Friction angle	56°		
	Critical	Total	%
Planar siliding (All)	1	45	2.22%
Color	Dip	Dip direction	Label
User planes			
1	■	38°	32° E
2	■	76°	71° D-1
3	■	35°	197° D-2
4	■	75°	175° T
Plot Mode	Pole vectors		
Vector count	45 (45 entries)		
Intersection mode	Grid data planes		
Intersections count	990		
Hemisphere	Lower		
Projection	Equal area		

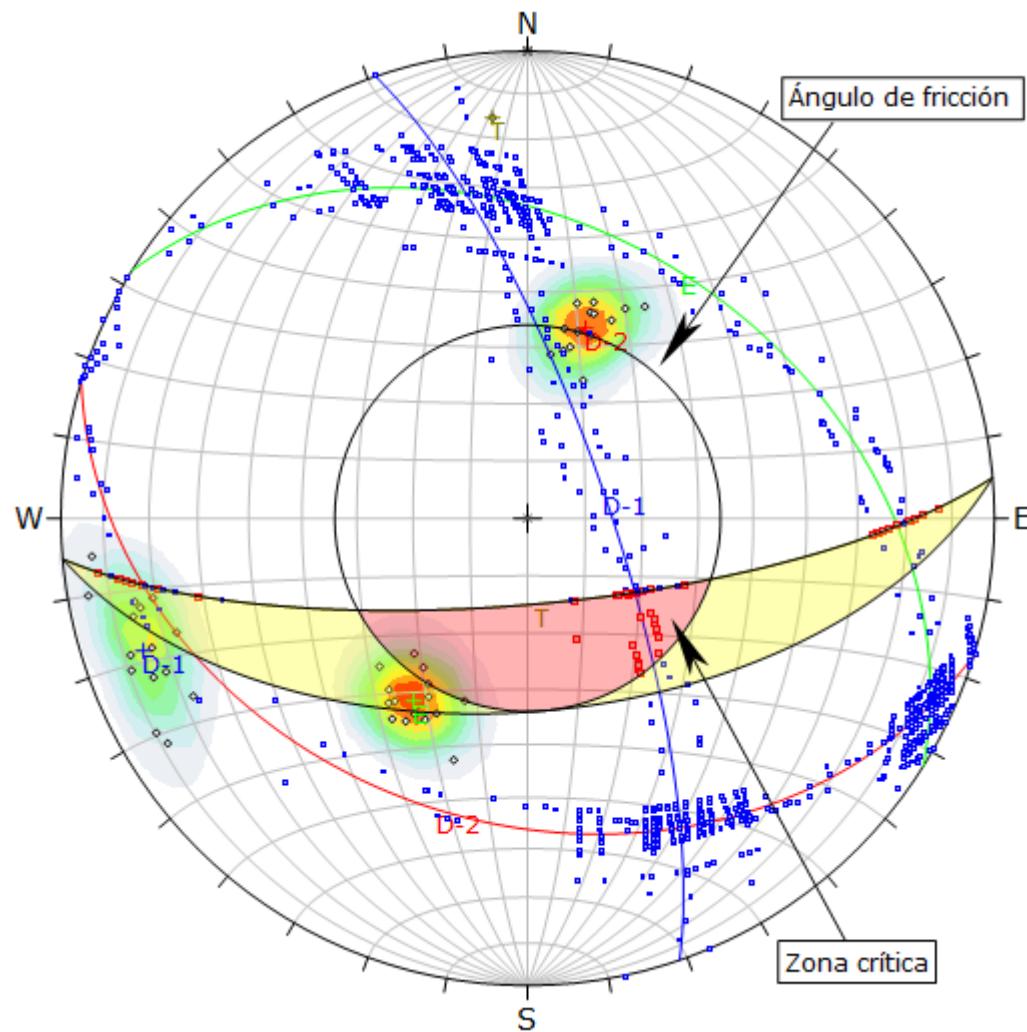


Figura 38: Estación geotécnica E-2. Probabilidad de ruptura en cuña con 4.65%, englobando a la intersección de las familias: D-1 y D-2; en orientación indirecta.

Symbol	Feature		
◊	Pole vectors		
■	Critical intersection		
■	Intersection		
Color	Density concentrations		
0.00 - 2.60			
2.60 - 5.20			
5.20 - 7.80			
7.80 - 10.40			
10.40 - 13.00			
13.00 - 15.60			
15.60 - 18.20			
18.20 - 20.80			
20.80 - 23.40			
23.40 - 26.00			
Maximum density	33.50%		
Contour data	Pole vectors		
Contour distribution	Fisher		
Counting circle size	1.00%		
Kinematic analysis	Wedge sliding		
Slope dip	75°		
Slope Dip direction	175°		
Friction angle	56°		
	Critical	Total	%
Wedge sliding	46	990	4.65%
Color	Dip	Dip direction	Label
			User planes
1	■	38°	32° E
2	■	76°	71° D-1
3	■	35°	197° D-2
4	■	75°	175° T
Plot Mode	Pole vectors		
Vector count	45 (45 entries)		
Intersection mode	Grid data planes		
Intersections count	989		
Hemisphere	Lower		
Projection	Equal area		

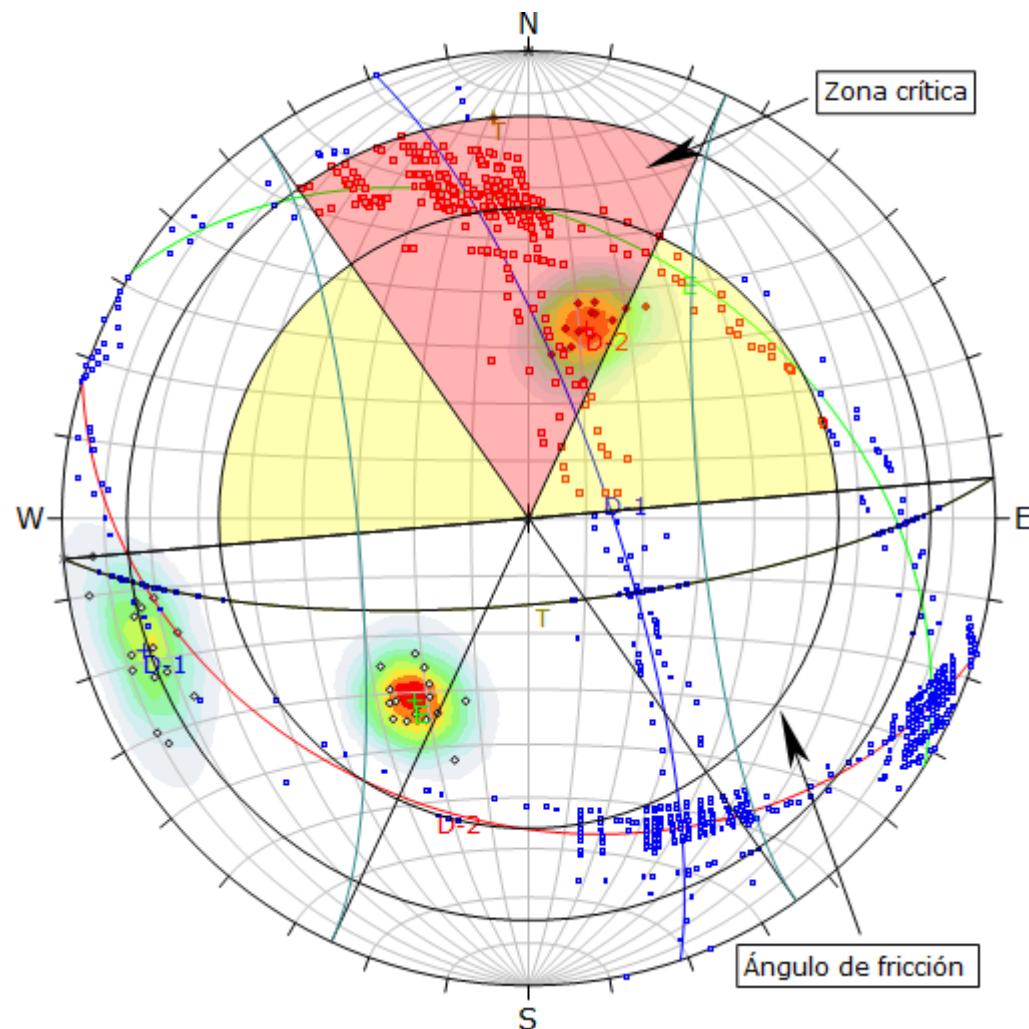


Figura 39: Estación geotécnica E-2. Probabilidad de ruptura por vuelco: Direccional (29.49%) y base deslizante 33.33%, englobando al polo de la familia: D-2; a favor del talud.

Symbol	Feature		
◊	Polo vectors		
◆	Critical vectors		
■	Critical intersection		
■	Intersection		
Color	Density concentrations		
Light Blue	0.00 - 2.60		
Medium Blue	2.60 - 5.20		
Dark Blue	5.20 - 7.80		
Yellow	7.80 - 10.40		
Orange	10.40 - 13.00		
Red	13.00 - 15.60		
Dark Red	15.60 - 18.20		
Dark Orange	18.20 - 20.80		
Dark Yellow	20.80 - 23.40		
Dark Red	23.40 - 26.00		
Maximum density	25.21%		
Contour data	Polo vectors		
Contour distribution	Fisher		
Counting circle size	1.00%		
Kinematic analysis	Direct toppling		
Slope dip	75°		
Slope Dip direction	175°		
Friction angle	56°		
Lateral milits	30°		
	Critical	Total	%
Direct toppling (Intersection)	292	990	29.49%
Oblique toppling (Intersection)	32	990	3.23%
Base plane (All)	15	45	33.33%
Color	Dip	Dip direction	Label
User planes			
1	Green	38°	E
2	Blue	76°	D-1
3	Red	35°	D-2
4	Yellow	75°	T
Plot Mode	Pole vectors		
Vector count	45 (45 entries)		
Intersection mode	Grid data planes		
Intersections count	990		
Hemisphere	Lower		
Projection	Equal area		

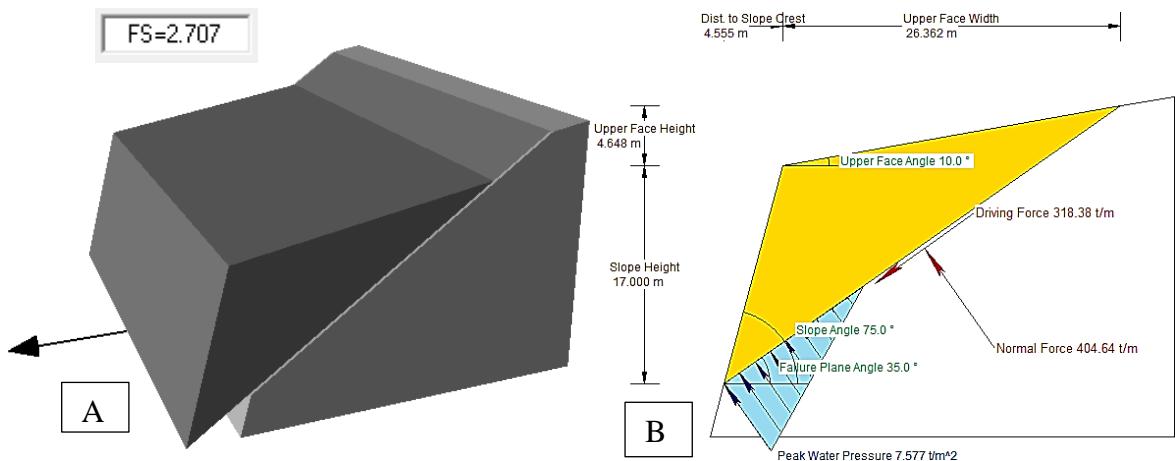


Figura 40: Estación geotécnica E-2. A. Block diagrama – RocPlane del macizo rocoso en 3D mostrando la ruptura planar. B. Gráfica de dimensionamiento por análisis de ruptura planar, en condiciones FSSaturadas = 2.707.

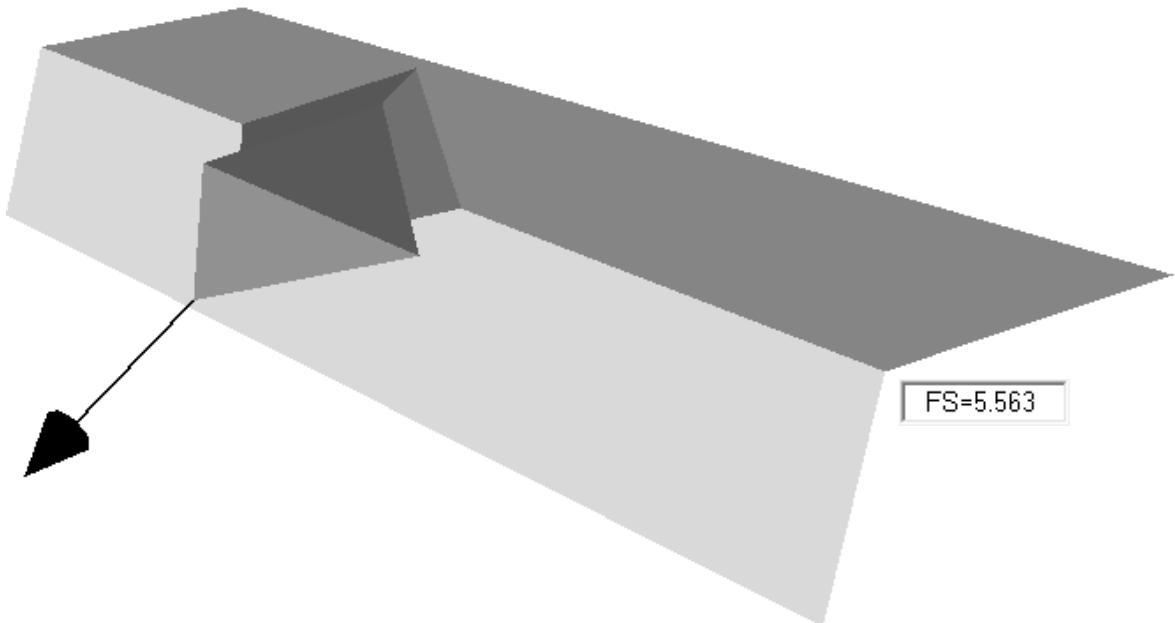


Figura 41: Estación geotécnica E-2. A. Block diagrama – Swedge, del macizo rocoso en 3D mostrando la ruptura en cuña en condiciones FSSaturadas = 5.563.

3.16.3 Estación E-3

Está ubicada desde la progresiva: Km. 11+385 a Km. 11+820; conformado por cuatro litologías: Formación Carhuaz, compuesto por areniscas blanquecinas estratificadas de grano medio, observándose en la corona de deslizamiento delimitando al depósito cuaternario; Limo de baja plasticidad (ML), conformado por material limoso de color anaranjado de textura media; Arena mal graduada (SP), compuesto de material arenoso de color blanquecino a amarillento, de textura media gruesa; Grava limosa (GM), material de color rojizo presentando alto contenido de grava angulosa con matriz englobante limo arcilloso. Geotécnicamente lo constituyen estos materiales mencionados al talud y ladera afectada por el deslizamiento geodinámico activo, observándose desplazamientos de material cuaternarios, escapes, agrietamientos en el terreno y acumulaciones en las partes inferiores del talud. Para la estabilización primeramente se realizó un perfilado de la parte superior, retirando todo el material de sobre acumulado en la superficie para posteriormente, construir gaviones llenados con roca de buena calidad, por las filtraciones de agua en la parte superior e intermedio del afloramiento, comportándose como un dren de aguas subterráneas. Sin embargo, también se consideró mejorarlo con material de afirmado el trasdós y protegerlo con geotextil, para evitar contaminación por los materiales arcillosos el gavión.

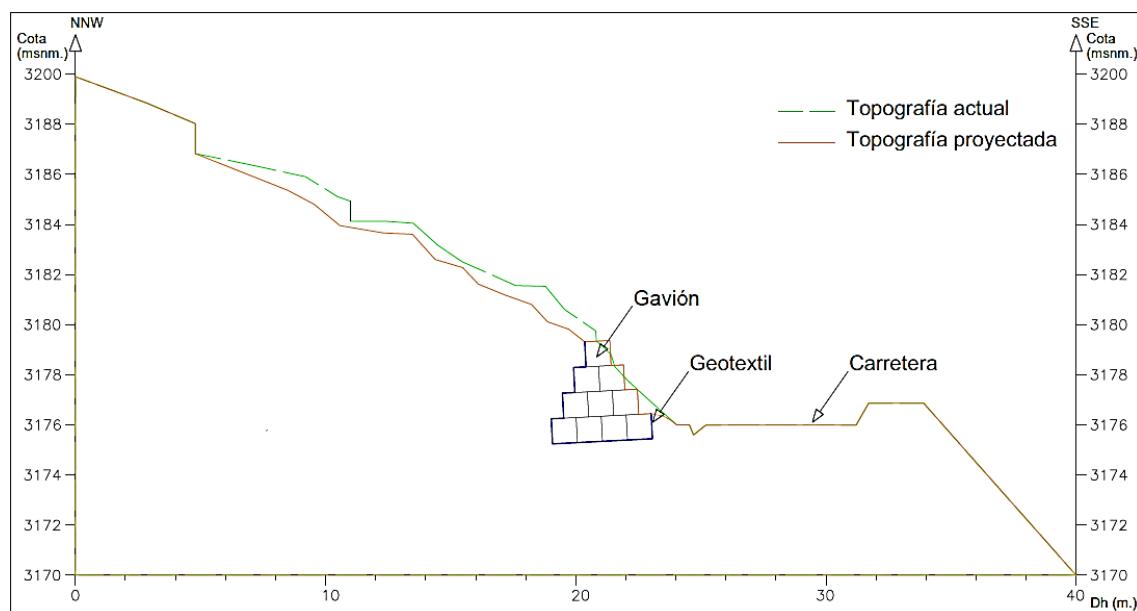


Figura 42: Sección transversal desde la progresiva: Km. 11+385 a Km. 11+820; planteada a estabilizar, considerando las condiciones estéticas del talud.

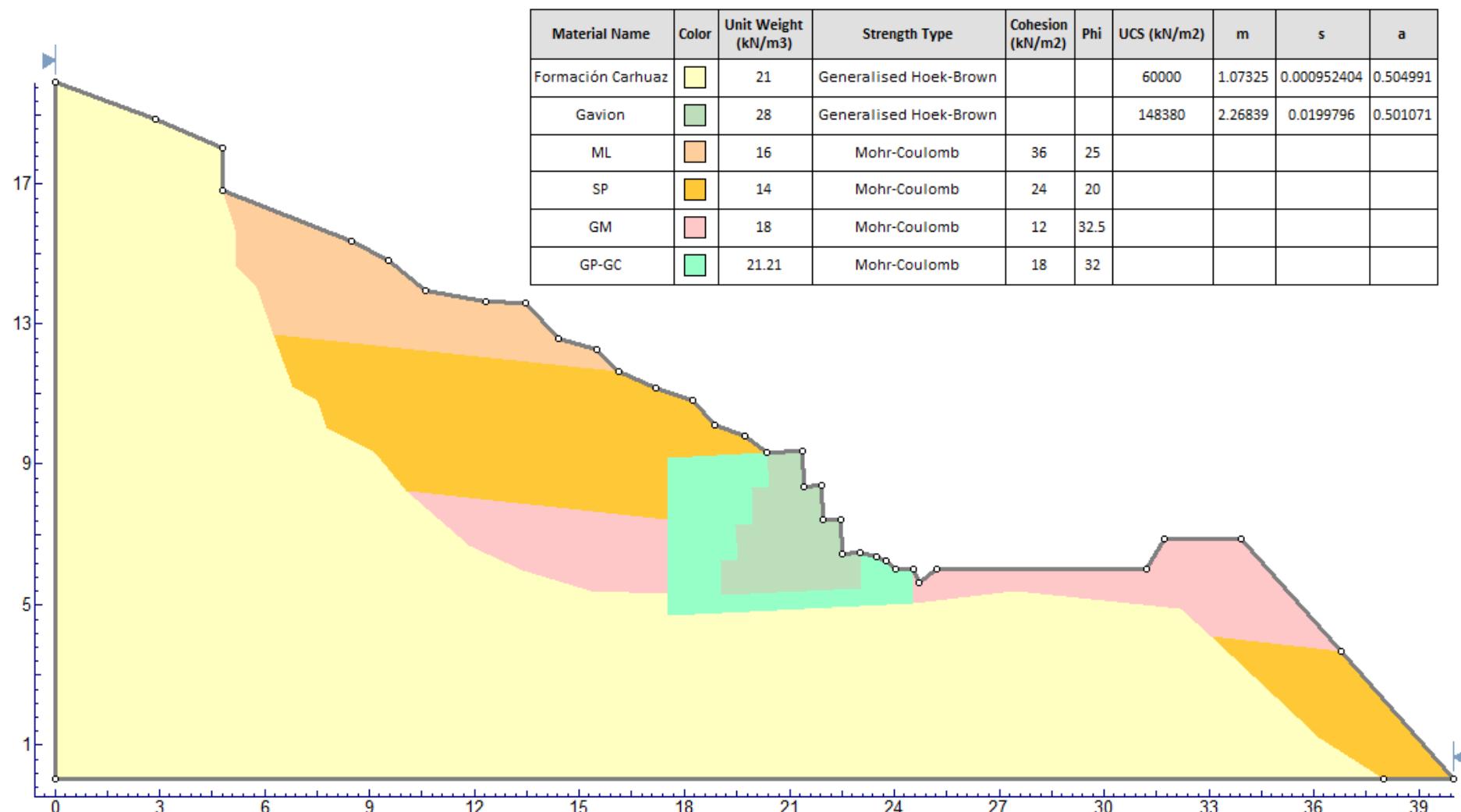


Figura 43: Estación geomecánica 3. Diseño geométrico de talud y composición litológica, para estabilización geotécnica.

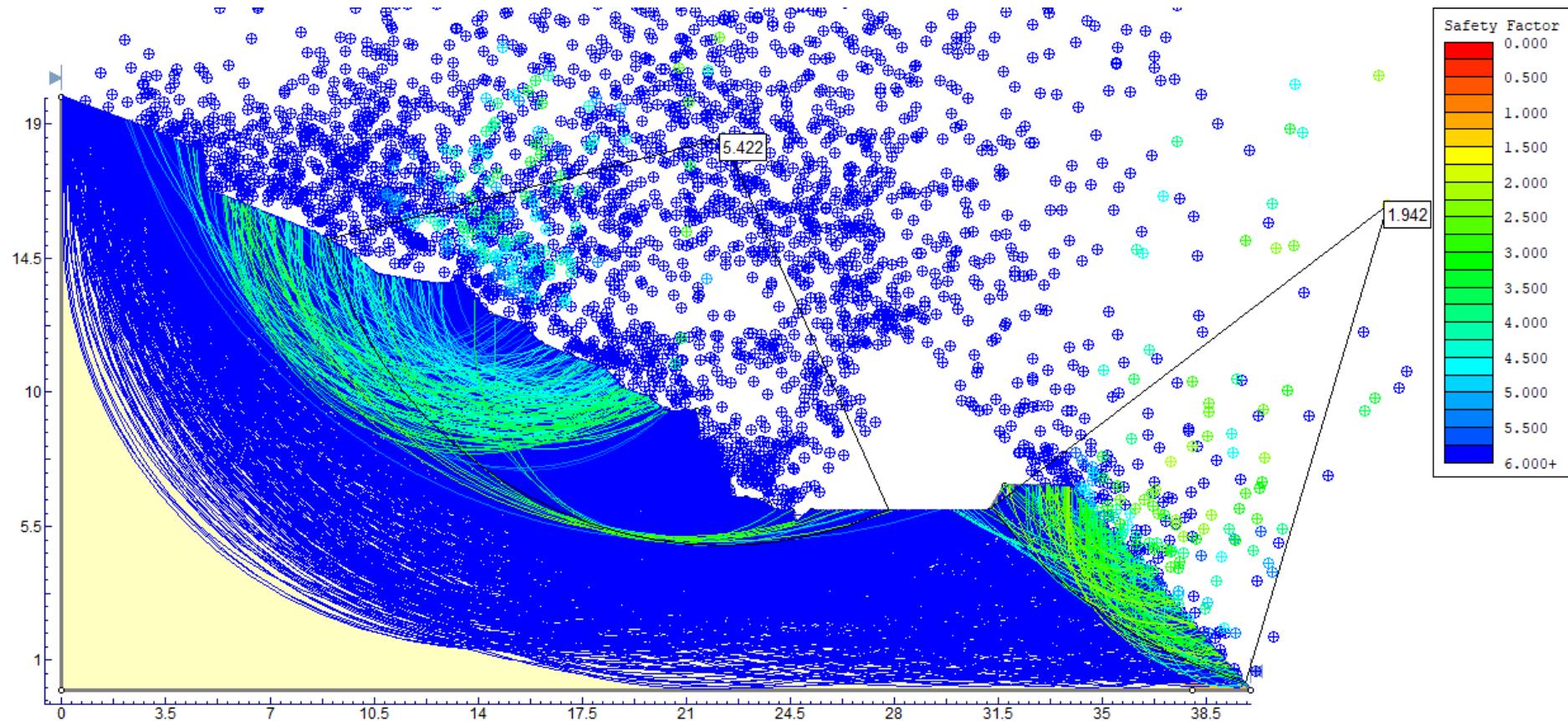


Figura 44: Estación geomecánica 3. Modelo numérico (Slide), utilizando el método de equilibrio límite, para estabilizar el momento de fuerzas del talud, obteniendo $FS_{Bishop} \text{ simplified} = 5.422$, en tensiones totales.

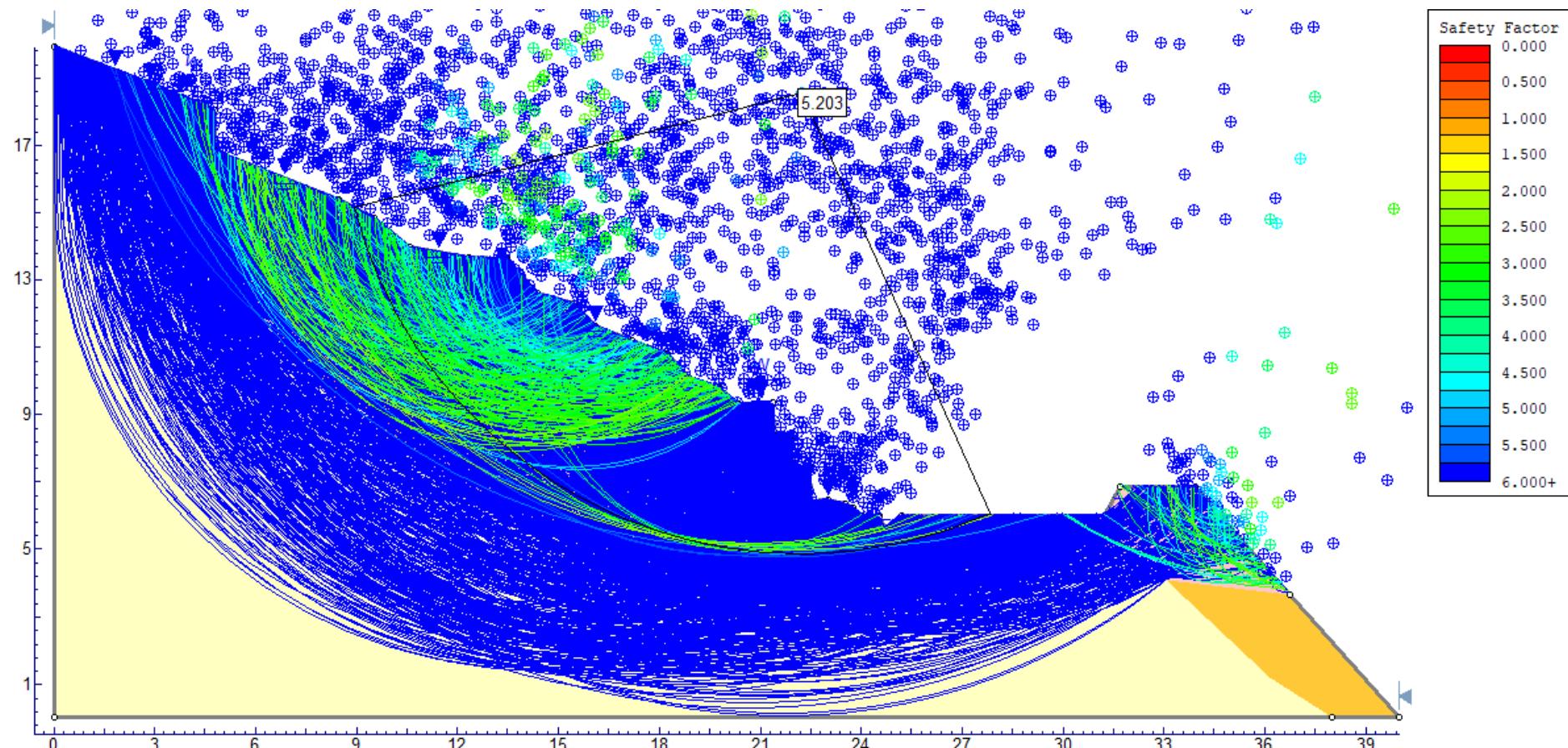


Figura 45: Estación geomecánica 3. Modelo numérico (Slide), utilizando el método de equilibrio límite, para estabilizar el momento de fuerzas del talud, obteniendo $FS_{Bishop\ simplified} = 5.203$, en tensiones efectivas.

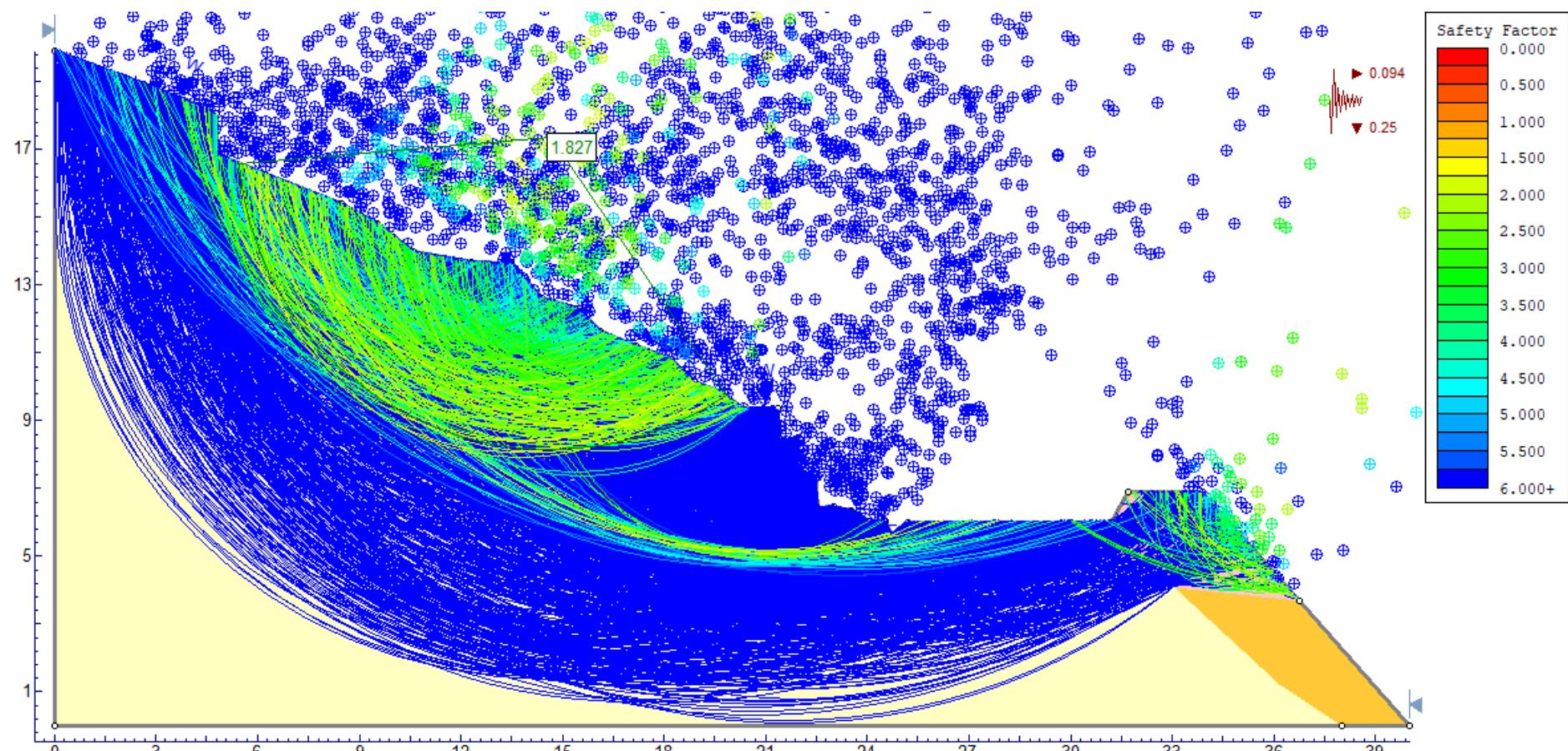


Figura 46: Estación geomecánica 3. Modelo numérico (Slide), utilizando el método de equilibrio límite, para estabilizar el momento de fuerzas del talud, obteniendo FS Bishop simplified = 5.203, en tensiones efectivas + sismicidad.

3.16.4 Estación E-4

El depósito cuaternario, se ha depositado en la parte frontal escarpada de la Formación Chúlec, conformando una altura de 18 m. de material residual de color anaranjado de textura fina limo arcilloso de baja plasticidad, muy susceptible a deslizamientos. Geodinámicamente se visualizó deslizamientos rotacionales de pie afectando la estabilidad del talud, ocupando la cuneta y parte de la carretera, por los movimientos de masa progresivos. La parte geotécnica está compuesta por: Formación Chúlec, limo de baja plasticidad y gravas arcillosas; definiendo el comportamiento litológico frente a eventos tensionales inestabilizadores. Por consiguiente, se realizó el diseño numérico mediante la estabilización por gaviones, siendo analizada en tensiones: Totales, efectivas y efectivas + sismicidad, logrando obtener valores de $FS > 1.2$, de estabilización, constituyendo el mejoramiento de este tramo.

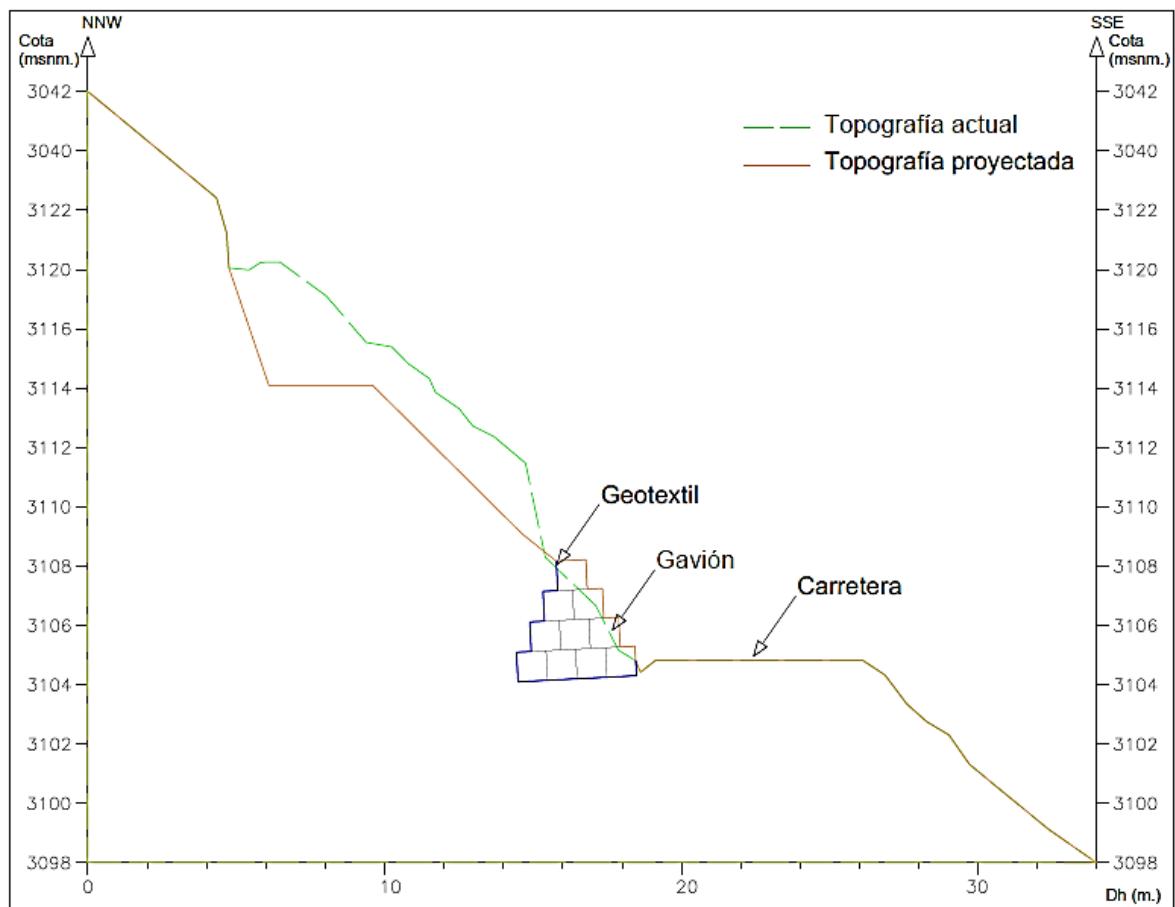


Figura 47: Sección transversal desde la progresiva: Km. 13+390 a Km. 13+515, planteada a estabilizar, considerando las condiciones estéticas del talud.

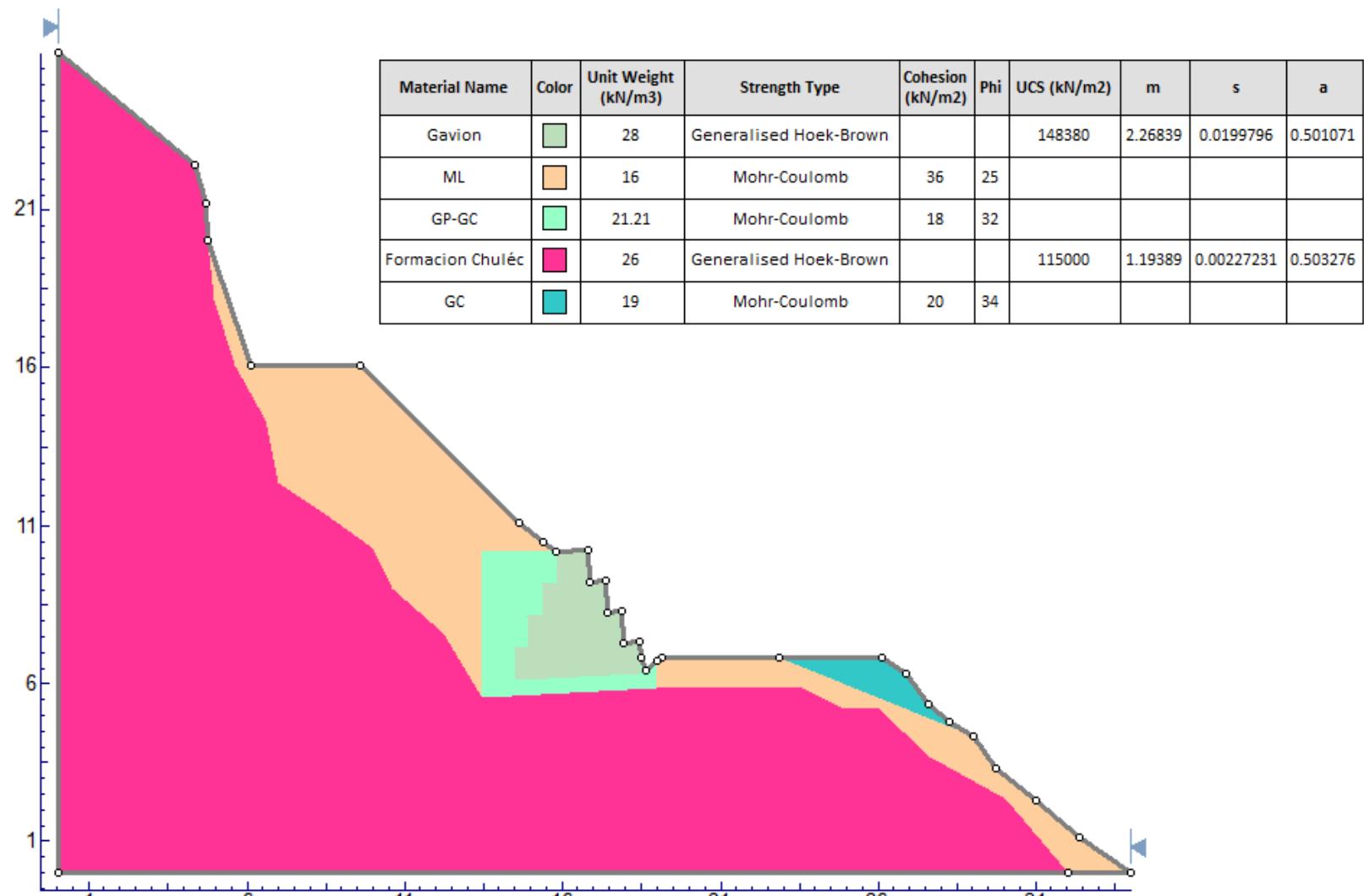


Figura 48: Estación geomecánica 4. Diseño geométrico de talud y composición litológica, para estabilización geotécnica.

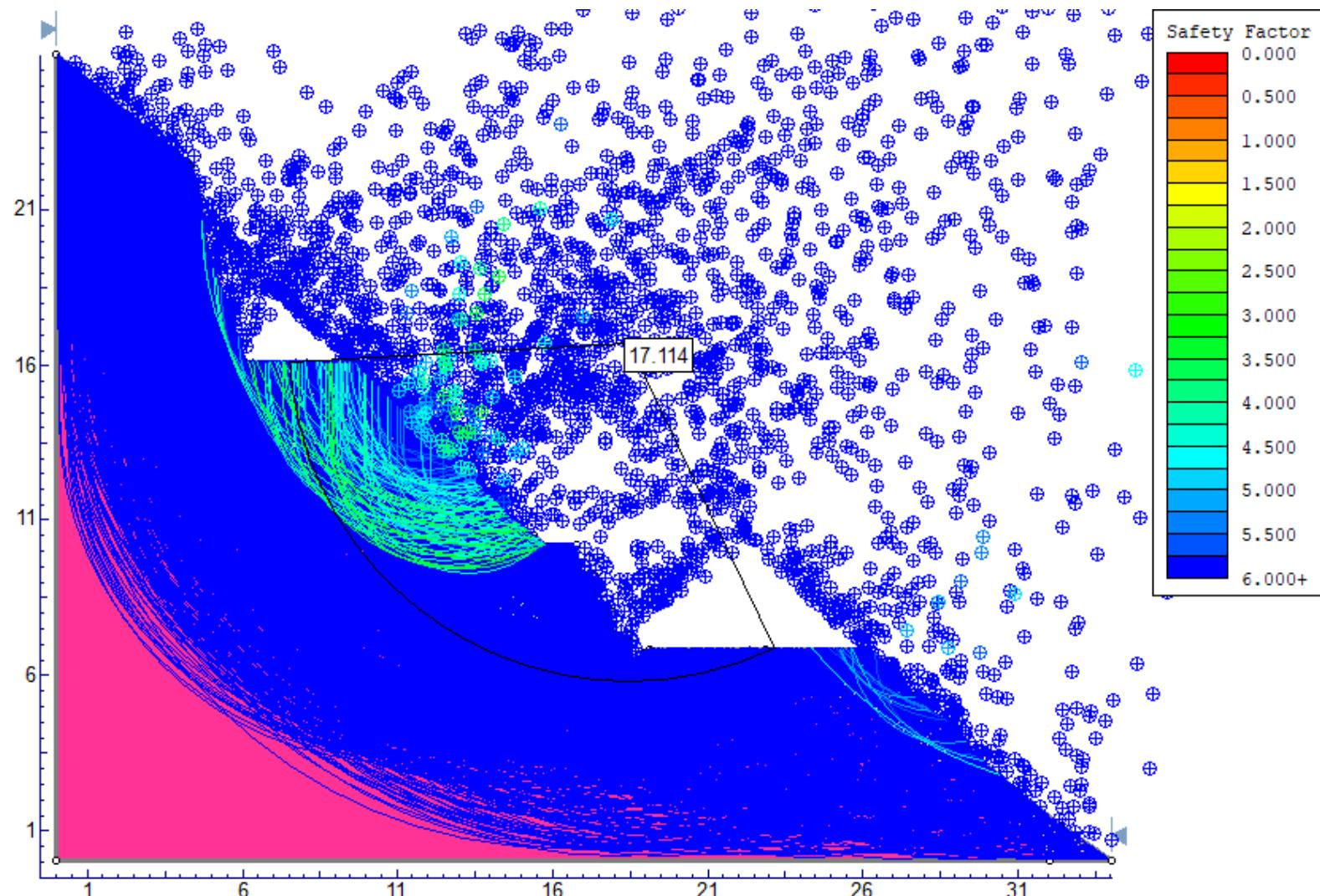


Figura 49: Estación geomecánica 4. Modelo numérico (Slide), utilizando el método de equilibrio límite, para estabilizar el momento de fuerzas del talud, obteniendo $FS_{Bishop} \text{ simplified} = 17.14$, en tensiones totales.

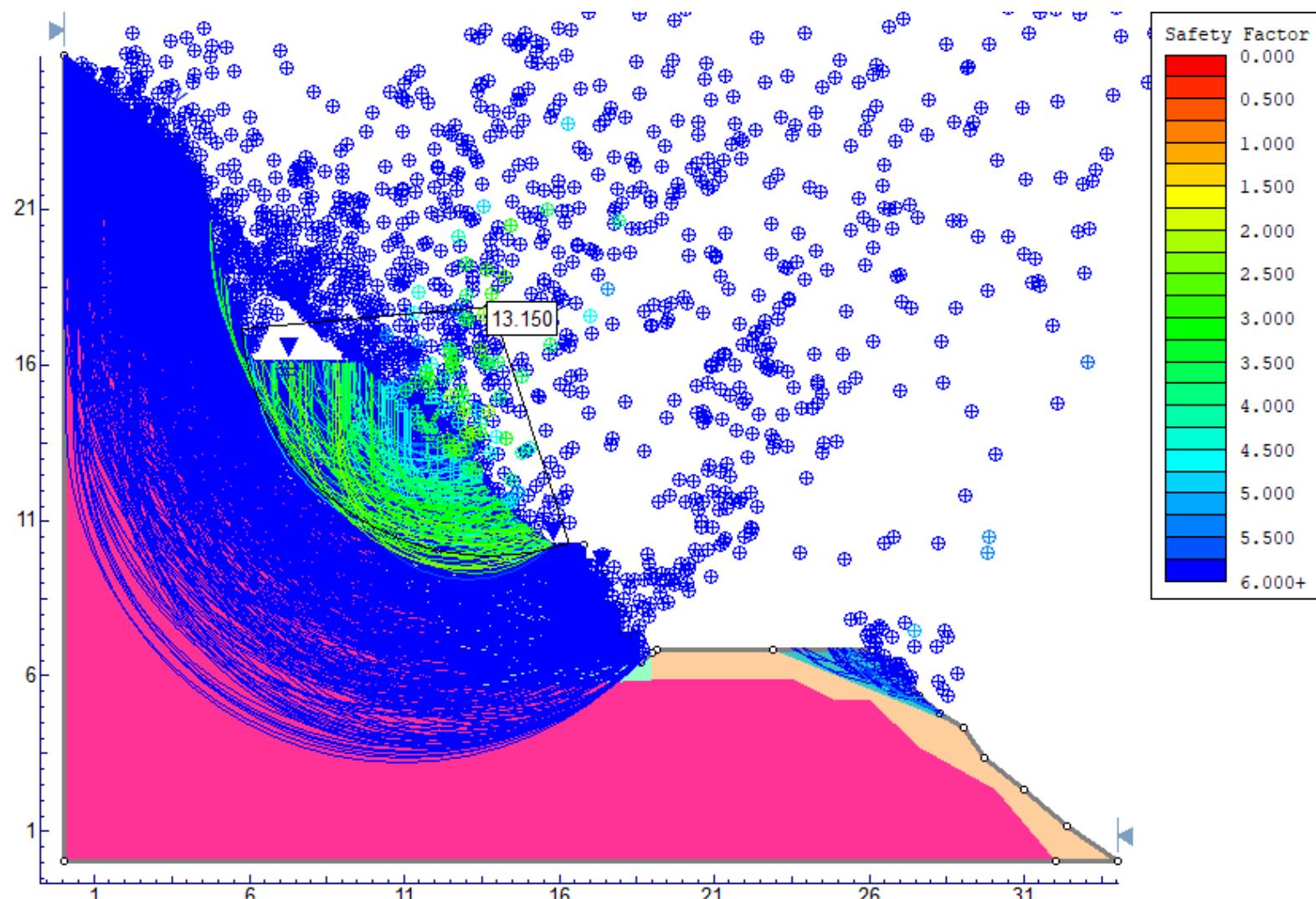


Figura 50: Estación geomecánica 4. Modelo numérico (Slide), utilizando el método de equilibrio límite, para estabilizar el momento de fuerzas del talud, obteniendo $FS_{Bishop} \text{ simplified} = 13.150$, en tensiones efectivas.

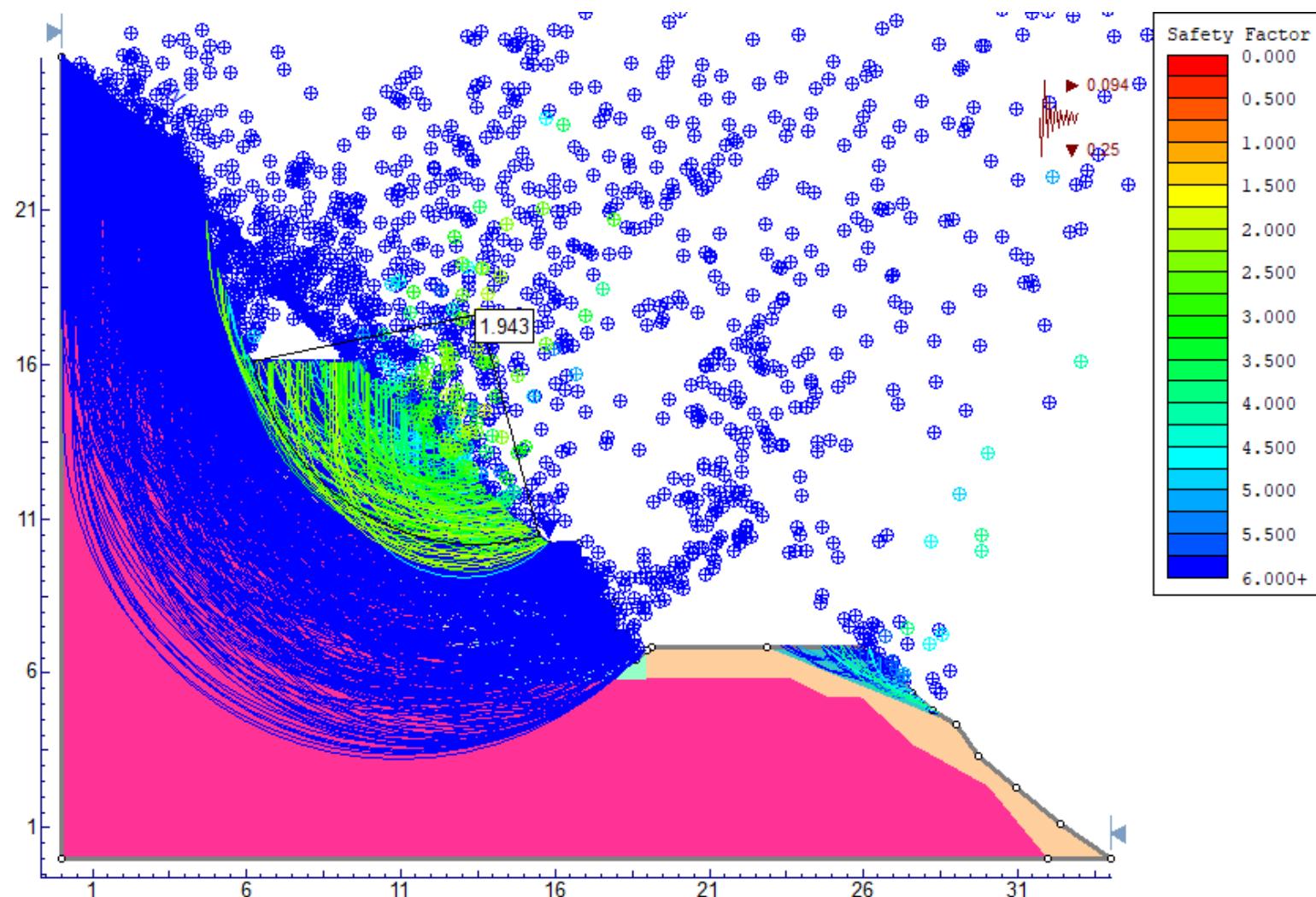


Figura 51: Estación geomecánica 4. Modelo numérico (Slide), utilizando el método de equilibrio límite, para estabilizar el momento de fuerzas del talud, obteniendo $F_{SBishop} simplified = 1.943$, en tensiones efectivas + sismicidad.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Los taludes y laderas, que conforman la carretera San Marcos – José Sabogal, se encuentran emplazadas en las rocas del Mesozoico – Cretáceo Inferior, presentando recubiertos algunos tramos por Depósitos Cuaternarios de la época Holocénica; configurando la litología actual que hoy presenta la zona de investigación. Sin embargo el Cretáceo Inferior está constituido por: Dos Grupos y una Formación: Grupo Goyllarisquizga (Se formó sobre la cuenca de un mar somero, influenciada por el intercambio de aguas constantes bien oxigenadas. A medida que se hundía la cuenca se rellenaba por materiales clásticos, manteniendo su homogeneidad los estratos, debido a su tranquilidad de deposición. Definidas por las Formaciones: Chimú, Santa, Carhuaz y Farrat), Formación Inca (zona de transición presentando intercalaciones de calizas areniscosas, areniscas calcáreas y lutitas ferruginosas) y Grupo Crisnejas (se formó en un ambiente más profundo, constituido por: Calizas, calizas: Tabulares y nodulares, margas e intercalaciones de lutitas y limolitas calcáreas, definida por la Formación Chúlec); siendo cubiertas estas formaciones por Depósitos Cuaternarios: Coluviales, Aluviales y Coluvio-Aluviales; compuestos por materiales de fragmentación angulosa a subangulosa, de textura gruesa a fina, de coloración: Rojiza, gris, amarillenta y marrón, dependiendo de la coloración del protolito o basamento rocoso afectado por la meteorización, con composiciones: Heterogéneas, desordenadas distribuidas de forma caótica sin selección ni estratificación aparente.

Las geoestructuras muestran que el Cretácico Inferior fue sometido a esfuerzos tectónicos compresivos principales de orientación SW - NE, plegando a las formaciones geológicas formando el sinclinal, en la Formación Chúlec en la progresiva Km. 14+090 (Eje). Por consiguiente, los estratos del flanco izquierdo tienen orientación $Az = N290 - 305^\circ$ y $Bz = 45 - 50^\circ NE$, y flanco derecho orientación $Az = N135 - 126^\circ$ y $Bz = 20 - 26^\circ SW$., definiendo un sinclinal asimétrico.

Sin embargo, los esfuerzos tectónicos liberaron energía acumulada por el plegamiento plasmándola en movimientos cinemáticos principales de fallamiento dextral de orientación NNW-SSE (Ubicadas en la Formación Farrat en el flanco izquierdo de la carretera) manifestándose este alineamiento en las progresivas: Km. 12+750 (Espejo de falla IxDx), con orientación Az = N150°, Bz = 38°SW y pitch = 24° y esfuerzos tectónicos: $\sigma_1(13.70, 22.30)$, $\sigma_2(269.50, 34.20)$ y $\sigma_3(132.10, 47.20)$) y Km. 12+960 (Espejo de falla) NxIx, tiene con orientación Az = N153°, Bz = 62°SW y pitch = 24° y esfuerzos tectónicos: $\sigma_1(115.90, 35.90)$, $\sigma_2(286.50, 53.80)$ y $\sigma_3(22.60, 4.50)$); desplazando de la Formación Chúlec y formaciones infrayacentes con un salto de falla 120 m. hacia al SE. Ubicándose este desplazamiento principal desde la progresiva: Km. 12+700 a Km. 15+000.

Por consiguiente, ocurrió un segundo movimiento tectónico de orientación ENE-WSW, ubicado en la progresiva Km 12+750, constituido por fallas sinestrales con salto de falla 50 m.

Geomorfológicamente la carretera se ubica en una ladera de orientación W - E, modelada por procesos: Endógenos (tectónicos), exógenos (erosivos), hace Ma. siendo claramente controlada por la resistencia de las rocas. Clasificándolas en 4 unidades geomorfológicas, agrupándolas en dos unidades: Las planicies y lomadas, lo definen los depósitos cuaternarios constituidos por superficies redondeadas a subredondeadas, con pendientes 0° a 25°. Siendo aprovechadas por los pobladores para la agricultura y ganadería, por ser áreas trabajables y accesibles, constituyendo el 71.11% de las unidades geomorfológicas. En cambio, las laderas y escarpas, presentan pendientes 25° a 90°, constituidos en su totalidad por basamentos rocosos muy resistentes formando farallones empinados inaccesibles, utilizados por los poblados para pastoreo de caprinos y ovinos. Constituyendo el 20.89% esta unidad geomorfológica.

Cuadro 8. Categorización porcentual de las unidades morfogenéticas.

Unidad Morfogenética	Pendiente	Orografía	Porcentaje (%)
Planicie	0° - 8°	Tipo 1	33.33
Lomada	8° - 20°	Tipo 2	37.78
Ladera	20° - 50°	Tipo 3	20.00
Escarpa	> 50°	Tipo 4	8.89

Fuente: Tomado de Rodríguez (2016).

La hidrología se forma por la acumulación de aguas de escorrentía de los cerros: Mun Mun y Michal, a los 3,452 msnm. de orientación: SW y SE, evacuando y filtrando sus aguas hacia el S, pendiente abajo en las laderas y taludes de la carretera, derivándolas posteriormente por: Cunetas y alcantarillas, a la quebrada Pamplona, hasta llegar a la quebrada Piochutranca ubicada a 1.83 Km. Los cálculos hidrológicos muestran que lo conforman 15 microcuencas, definiendo que MC-6 y MC-10, constituyen el tiempo más prolongado de la aportación de agua a las obras hidráulicas. En consecuencia, $T_c < 5$ min, están generando eventos geodinámicos progresivos relacionados con deslizamiento de: Laderas y taludes, mostrando comparaciones lógicas con lo evidenciado en campo. Sin embargo, se obtuvo $P_{p\max} = 49.70$ mm., $P_{p\min} = 23.20$ mm. y $P_{p\text{anual}} = 190.40$ mm., considerándolo como moderadamente lluvioso. De acuerdo con las precipitaciones máximas de los años: 1990, 1998, 1999, 2005, 2006, 2012 y 2013, superando 45 mm/año, definiendo la mayor recarga de precipitación de la zona de estudio y balance hídrico.

Hidrogeológicamente los Taludes y laderas del flanco izquierdo de la carretera, se encuentran influencias por dos unidades hidrogeológicas: Acuitardos sedimentarios (Fms.: Chimú y Farrat) y acuíferos fisurados sedimentarios (Fms.: Santa, Carhuaz, Inca y Chúlec), perjudicando la estabilidad de la carretera, visualizándose por emanaciones de agua subterránea como filtraciones: Corona, pie y cara libre del talud, ya sea en taludes compuestos en roca o suelo por el grado de saturación de las partes superiores de la ladera, afectando a los depósito cuaternarios.

La geodinámica se relaciona con los eventos de: Deslizamiento, caída de rocas, cárcavas y conos de detritos. Ocasionando desplazamientos lentos del material cuaternario, siendo afectado de igual manera por el nivel freático la estabilidad de la ladera. En consecuencia,

el riesgo geodinámico muestra que la vulnerabilidad es directamente a la afectación a la vía terrestre, con peligro de origen natural y antrópico.

Realizando zonificaciones de inestabilidad geotécnica se categorizó en: Altamente peligrosa (Km. 12+695 a Km. 12+850 y Km. 13+210 a Km. 13+345), peligrosa (Km. 11+409 a Km. 11+845 y Km. 11+895 a Km. 12+125) y moderadamente peligrosa (Km. 11+145 a Km. 11+265, Km. 11+302 a Km. 11+409, Km. 12+370 a Km. 12+635 y Km. 13+350 a Km. 13+500), caracterizada por: Deslizamientos, caídas de rocas, cárcavas y conos de detritos.

El cartografiado geológico - geotécnico, se basó en muestreos de: Suelos y rocas, obteniendo parámetros geotécnicos, para definir el modelo numérico o matemático de estabilización del talud, aplicando metodologías para definir el modelo geométrico de cada estación, para determinar: Probabilidad de ruptura y Factor de seguridad, mediante la utilización de programas numéricos: RocData, Dips, Swedge, y RocPlane, aplicando criterios: Hoek - Brown y Morh – Coulomb, para su mejor comprensión.

Cuadro 9. Constantes elásticas utilizando el criterio de linealización del método de equivalencia de áreas.

Criterios		Estación	
		E-1	E-2
Clasificación Hoek - Brown	mi	15	12
	D	0.70	0.70
	Ei (MPa)	18,000	34,500
	MR	300	300
Criterio Hoek - Brown	mb	1.016	1.194
	s	0.0008	0.0023
	a	0.505	0.503
Parámetros masa rocosa	σ_t (MPa)	-0.049	-0.219
	σ_c (MPa)	1.658	5.374
	σ_{ct} (MPa)	7.965	16.965
	Em (MPa)	2058.880	6139.020
Criterio Mohr - Coulomb	c (MPa)	0.304	0.782
	ϕ°	53.86	55.63

Cuadro 10. Estimación cuantitativa y cualitativa del macizo rocoso – criterios empíricos.

Estación	σ_{ci} (MPa)	Clasificaciones empíricas					
		RQD	Calidad	RMR	Calidad	GSI	Calidad
E-1	60	72.04	Regular	56	Media	51	Regular
E-2	115	81.86	Buena	63	Buena	58	Regular

Cuadro 11. Parámetros geotécnicos de suelos.

Descripción	Estación					
	E-4	E-3	E-3/E-4	E-3		
	C-1	C-1	C-1	C-1		
Estrato	E-1		E-1	E-1	E-1	
Prof. (m.)	0.50		0.50	0.50	0.50	
W (%)	13.00		15.00	29.83	31.80	
Ensayos de Atterberg	LL	40.00		27.00	36.03	48.47
	LP	21.00		20.00	25.29	40.72
	IP	19.00		7.00	10.74	7.75
Granulometría por tamizado (%)	Bolonería	-		-	-	-
	Grava	33.00		17.00	-	48.30
	Arena	25.00		71.00	46.70	33.30
	Finos	42.00		12.00	53.30	18.40
Clasificación	SUCS	GC		SP	ML	GM
	AASHTO	A-6 (10)		A-2-4 (0)	A-8 (4)	A-2-5 (0)
Tamaño de grano	D10	-		-	0.00	0.01
	D30	-		0.21	0.00	0.38
	D60	1.52		0.52	0.21	7.22
Calidad de suelo	Cc	-		-	-	-
	Cu	-		-	-	-
Ángulo de fricción ϕ	34.00		20.00	25.00	32.50	
Cohesión C (Ton/m ³)	20.00		24.00	36.00	12.00	
Densidad (gr/cm ³)	1.90		1.40	1.60	1.80	

Obtenido los parámetros elásticos se procedió a analizar por el software Dips, mediante el número de discontinuidades, mostrando valores de probabilidad de ruptura por debajo del valor mínimo requerido, sin embargo la ruptura por vuelco está generando inestabilidades en la base deslizante en la discontinuidad: D-1 y D-2.

En consecuencia, se ingresó información a los softwares: RocPlane y Swedge, analizándolos en tensiones: Totales, efectivas y efectivas + sismicidad, obtenido $FS>1.5$, de esta manera validó la información procesada.

Cuadro 12. Resultados de probabilidad de ruptura en rocas por software Dips.

Estación	Probabilidad de ruptura								
	Planar		Cuña		Vuelco				Condición
	%	Junta	%	Junta	Dirección	Oblicuo	Base deslizante	Junta	
E-1	4.44	D-1	6.37	D-1 y D-2	0.20	1.52	75.56	D-1	Estable
E-2	2.22	D-2	4.65	D-1 y D-3	29.29	3.23	33.33	D-2	Inestable

Cuadro 13. Resultados de del factor de seguridad en rocas.

Estación	Factor de seguridad					
	RocPlane			Swedge		
	T.T	T.E	TE + S	T.T	T.E	TE + S
E-1	3.021	2.333	1.981	3.588	3.356	2.966
E-2	2.909	2.707	2.277	5.721	5.563	4.608

Por consiguiente, en los suelos se utilizó el método de equilibrio límite, a la estabilización de talud, para determinar una masa potencialmente inestable, utilizando la combinación de los criterios: Lineales y no lineales, de la ingeniería geotécnica por la composición litológica de cada material. Mostrando el software Slide superficies de fallamiento con $FS>1.2$, analizadas en tensiones: Totales, efectivas y efectivas + sismicidad, mediante las teorías: Bishop, Jambu y Morgenstern - Price.

Cuadro 14. Resultados de del factor de seguridad en suelos por software Slide.

Estación	Factor de seguridad								
	T.T			T.E			T.E + sismicidad		
	Bishop	Jambu	Mor.- Price	Bishop	Jambu	Mor.- Price	Bishop	Jambu	Mor.- Price
E-3	5.422	4.652	5.786	5.203	4.373	5.597	1.827	1.693	1.845
E-4	17.140	13.540	17.526	13.150	12.612	13.198	1.943	1.882	1.950

4.2 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

La inestabilidad de los taludes está relacionada con los macizos rocosos de los grupos Goyllarisquizga y Grupo Crisnejas, constituidos por bloques tabulares y cúbicos de calidad media a buena, presentando fracturamiento moderado en las rocas competentes como las areniscas de la Formación Chimú y Farrat, y con mayor fracturamiento en los macizos de las formaciones intermedias. Los depósitos cuaternarios constituidos por, Coluviales, Aluviales y Coluvio-Aluviales. El origen de la inestabilidad en los macizos rocosos, así como en los depósitos cuaternarios son la precipitación, infiltración y probabilidad de sismicidad, los cuales disminuyen las resistencias cohesiva y friccional, dando lugar a deslizamientos, caídas de rocas, cárcavas y conos de detritos. Con lo cual queda demostrado nuestra hipótesis planteada en el proyecto de investigación.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- El cartografiado geológico - estructural definió que el área de estudio está conformada por rocas del Grupo Goyllarisquizga, Formación Inca y Chúlec; las cuales muestran esfuerzos tectónicos comprensivos de orientación SW - NE formando un sinclinal con eje sobre la Formación Chúlec en la progresiva Km 14+090; así mismo se evidenció fallas dextrales con orientación NW - SE y fallas sinestrales con orientación NE - SW. También se encontró depósitos cuaternarios del tipo: Aluvial, Coluvial, Coluvio-aluvial con composiciones heterogéneas, desordenadas y distribuidas de forma caótica sin selección ni estratificación aparente.
- Las propiedades geomecánicas se evaluaron en cuatro estaciones geotécnicas conformadas por: Dos estaciones en rocas (E-1; E-2) y dos estaciones en suelos (E-3; E-4) las cuales indican lo siguiente: E-1, RQD = 72.04%, RMR = 56 y GSI = 51), categorizándole de calidad regular. E-2 (RQD = 81.86%, RMR = 63 y GSI = 58) de calidad buena. E-3 (Presenta tres tipos de suelos: 1. SP/A-2-4 (0), 2. ML/A-8 (4) y 3. GM/2-2-5 (0)) y E-4 (Presenta dos tipos de suelos: 1. GC/A-6 (10) y 2. ML/A-8 (4)).
- La hidrología está delimitada por aguas de escorrentía por los cerros: Mun Mun y Michal, a los 3,452 msnm. en orientación: SW-SE, paralelo al eje de la carretera evacuando sus aguas a las partes bajas afectando directamente la estabilidad de taludes y laderas. Por lo tanto, la microcuenca está generando eventos geodinámicos progresivos relacionados con deslizamiento de laderas y taludes. Sin embargo, se obtuvo Ppmáx = 49.70 mm., Ppmin = 23.20 mm. y Ppanual = 190.40 mm., considerándolo como moderadamente lluvioso.

- El factor de seguridad fue analizado en tensiones: Totales, efectivas y efectivas + sismicidad, en rocas y suelos. Las estaciones: E - 1 y E - 2 (Roca) superan el 1.50 de FS, mostrando correlaciones directas con la probabilidad de ruptura, siendo valores < 10% de fallamiento por ruptura en cuña y planar. Sin embargo, la ruptura por vuelco muestra valores altos > 50% de inestabilidad en la discontinuidad: D - 1 y D - 2, siendo ésta junta la que genera caídas de rocas. Por consiguiente, después del análisis en las estaciones E - 3 y E - 4 (Suelos) reportan un FS > 1.20. lo cual se consideran zonas estables.
- La zonificación de inestabilidad geotécnica se categorizó en: Altamente peligrosa (Km. 12+695 a Km. 12+850 y Km. 13+210 a Km. 13+345), peligrosa (Km. 11+409 a Km. 11+845 y Km. 11+895 a Km. 12+125) y moderadamente peligrosa (Km. 11+145 a Km. 11+265, Km. 11+302 a Km. 11+409, Km. 12+370 a Km. 12+635 y Km. 13+350 a Km. 13+500), caracterizada por: deslizamientos, caídas de rocas, cárcavas y conos de detritos.

5.2 RECOMENDACIONES

- La Municipalidad Distrital de José Sabogal a través de la gestión de proyectos debe implementar obras de arte como: Alcantarillas, cunetas, muros de contención y gaviones, para minimizar la erosión de taludes, laderas y ahueamientos en la carretera, afectando la transitabilidad, sobre todo en épocas de precipitación.
- La Municipalidad Distrital de José Sabogal mediante la gestión de proyectos debe estabilizar los taludes altamente críticos, por su constancia de inestabilidad, para reducir el riesgo de deslizamientos hacia el centro poblado de Shirac donde se evidencia la presencia de viviendas construidas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcántara, I. 2000. Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificación y terminología. *Investigaciones geográficas, Boletín del instituto de Geografía, UNAM*, número 41, 2000, págs. 7-25.
- Arellano, D. 2021. Solución para deslizamiento de plataforma carretera departamental Acobamba – Palmayo – San Pedro de Cajas – Condorin tramo Km. 05+250 a Km. 05+950 (Tesis de pregrado). Universidad Peruana los Andes.
- Batista, J; Blanco, G; Nevado, J. 2012. Propuesta de un Manuel para la evaluación de taludes. Guayana – Venezuela.
- Bieniawski, Z. 1989. Clasificación de masa rocosa ingenieril. New York- Universidad del Estado de Pensilvania: Edición: Jhon Wiley & Sons.
- Carrillo, R. 2015. Evaluación de zonas susceptibles a movimiento en masa del tipo deslizamiento en el centro poblado de Carampa, distrito de Pazos, provincia de Tayacaja, región Huancavelica, aplicando el protocolo de cenepred (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Piura, Perú.
- Corominas, J. 2000. Tipos de rotura en laderas y taludes (Catedrático de Ingeniería Geológica en la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona). Universidad Politécnica de Cataluña.
- Dávila, J. 1992. Principios de la fotointerpretación. Lima – Perú: MultiRey S.A.
- Dávila, V. 2011. Diccionario geológico. INGEMMET. Lima – Perú: Arth Grounting S.A.C.
- Deere, D, Hendron, A., Patton, F., y Cording, E. 1967. Diseño de superficies y superficies del entorno de excavación en roca. 8vo. Simposium de mecánica de rocas en procedimientos. Fracturamiento y reforzamiento en roca (ed. C Fairhurst), págs. 237 - 302. New York – Estados Unidos: AIME.

- Frausto, O. 1998. Derrumbes, deslizamientos y expansión lateral del suelo provocados por la sismicidad en el graben de Cuautepec: Región sur de la Sierra de Guadalupe, en la ciudad de México. Investigaciones geográficas, Boletín del instituto de Geografía, UNAM, número 38, 1999, págs. 15-29.
- González de Vallejo, L. 2004. Ingeniería Geológica. Madrid – España: Prentice Hall.
- Lara, M., y Sepúlveda, S. (2008). Remoción de masas. Departamento de geología. Universidad de Chile.
- Lillo, J., y Oyarzun, R. 2013. Geología estructural aplicada a la minería y exploración minera: Principios básicos. Móstoles – España: Ediciones GEMM – Aula2puntero.
- López, R., y Paramo, R. 2012. Corrección de un talud de margas en el Alto de Foradada del Toscar. Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente, ISSN 1136-4785, Nº. 215, 2012, págs. 11-17.
- MIVOE 2006. Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras. Bogotá – Colombia: Convenio interadministrativo 0587-03.
- Montoya, F. 2014. Evaluación geotécnica de los taludes de la Carretera Cruz Blanca – El Gavilán (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca.
- Novoa, E. 2019. Evolución geotécnica para determinar la inestabilidad de los taludes en la carretera del tramo Chilete – Puente Muyuna (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca.
- Osinergmin. 2017. Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas. Magdalena del Mar, Lima - Perú: Edición: INVERSIONES IAKOB S.A.C.
- Oyanguren, P., y Alejano, L. 2004. Mecánica de rocas: Fundamento e ingeniería de taludes.
- Predes. 2000. Estudio de riesgo y propuesta de prevención de la quebrada pedregal. Centro de estudios y prevención de desastres.
- Priest, S., y Hundson, D. 1976. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scan line surveys. International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, págs. 138-197.

Reyes, R. 1980. Boletín N° 31 Serie A. Carta Geológica Nacional: Geología de los cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba. Lima – Perú: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET).

Rodríguez, A. 2007. Ingeniería geológica: Caracterización de macizos rocosos. Facultad de geología (Petrología y geoquímica), vol. 1, págs. 1-14. Universidad de Oviedo.

Rodríguez, R. 2016. Método de investigación geológico - geotécnico para el análisis de inestabilidad de laderas por deslizamiento zona Ronquillo – Corisorgona (Tesis de maestría). Universidad Nacional Mayor de San Marcos – Universidad del Perú, Decana de América.

Rosales, S; Álvarez, A; Ortiz J; y Ordoñez, O. 2011. Análisis de la amenaza de caída de rocas a partir del estudio de huellas de impacto sobre carreteras. *Dyna*, año 78, N°. 169, págs. 230-238. Medellín, octubre, 2011. ISSN 0012-7353.

Seisdedos, J; Rodríguez, J; García, J; Insua, J., y González, L. 2011. Análisis de estabilidad de la ladera izquierda del embalse de (Navarra). *Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente*, ISSN 1136-4785, N°. 208, 2011, págs. 42-46.

Senamhi. 2022. Datos hidrometeorológicos en Cajamarca: Estación San Marcos.

Suárez, J. 2009. Deslizamiento: Estabilidad de taludes tropicales.

Vallejo, C. 2002. Aplicaciones del Índice GSI para el Mapeo Geomecánico y la definición del Sostenimiento de labores Mineras subterráneas. XI Congreso Peruano de Geología. Lima – Perú.

Wyllie, D., y Mah, C. 2004. Ingeniería civil y minería de taludes rocosos. *Ingeniería de taludes rocosos*. Reino unido – Londres. Spon Press - Grupo Taylor & Francis.

ANEXOS

- PLANO 01 IMAGEN SATELITAL SASPLANET - BING MAPS.
- PLANO 02 MDT – MDE – UBICACIÓN.
- PLANO 03 CUENCAS HIDROLÓGICAS.
- PLANO 04 GEOLOGÍA - ESTRUCTURAL REGIONAL.
- PLANO 05 GEOLÓGICO – ESTRUCTURAL LOCAL.
- PLANO 06 UNIDADES MORFOGENÉTICAS.
- PLANO 07 MORFOGENÉTICO ALTITUDINAL.
- PLANO 08 GEODINÁMICO.
- PLANO 09 GEOTÉCNICO.
- PLANO 10 ZONIFICACIÓN DE INESTABILIDAD GEOTÉCNICA.