

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



**TESIS**

**“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DE LOS TALUDES  
CRÍTICOS ENTRE LA CARRETERA AHIJADERO - SANTA ROSA  
DISTRITO DE BAMBAMARCA – PROVINCIA DE HUALGAYOC”**

Para Optar el Título Profesional de:

**INGENIERO GEÓLOGO**

Autor:

**Bach. Aguilar Llatas Julio César**

Asesor:

**Dr. Ing. Rodríguez Cruzado Segundo Reinaldo**

**Cajamarca – Perú**

**2023**

## CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. **Investigador:** Julio César Aguilar Llatas  
**DNI:** 47617574  
**Escuela Profesional:** Ingeniería Geológica
2. **Asesor:** Segundo Reinado 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:** Evaluación del comportamiento Geotécnico de los taludes Críticos entre la carretera Ahijadero- Santa Rosa Distrito de Bambamarca -Provincia de Hualgayoc.
6. **Fecha de evaluación:** 04 de agosto del 2023
7. **Software antiplagio:**       TURNITIN       URKUND (OURIGINAL) (\*)
8. **Porcentaje de Informe de Similitud:** 4%
9. **Código Documento:** D172563731
10. **Resultado de la Evaluación de Similitud:**  
 APROBADO     PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 08 de agosto del 2023

	
<hr/> <b>FIRMA DEL ASESOR</b>	<hr/> <b>UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI</b>
<b>Nombres y Apellidos:</b> Segundo Reinado Rodríguez Cruzado	
<b>DNI:</b> 26722961	

## **AGRADECIMIENTO**

*Agradezco primeramente a Dios que me da la fortaleza día a día para seguir adelante a pesar de todos los obstáculos que se me presentaron para culminar esta tesis.*

*Debo reconocer a mi alma mater, Universidad Nacional de Cajamarca, en especial a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica por brindarme la formación profesional y ética a lo largo de toda la carrera.*

*Mi más sincero agradecimiento al Dr. Reinaldo Rodríguez Cruzado que con su experiencia y conocimiento me guió de la mejor forma para poder culminar la presente tesis.*

*Y, por su puesto, agradezco desde lo más profundo de mi ser a mi familia, por el apoyo que me brindaron durante todo este tiempo, el cual son mis pilares y mi motor para seguir adelante.*

*JCALL*

## DEDICATORIA

*Esta tesis se la dedico a Dios quien me da la sabiduría y luz en mis ojos para guiarme por el camino del bien, por darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se me presentaban en el camino.*

*A mi familia quienes por ellos soy un hombre de bien. Para mis padres Teodoro y Herlinda que fueron y serán mi soporte por y por su apoyo incondicional, para mis hermanos que me apoyaron durante todo este tiempo.*

*A mi esposa Carmen y a mis hijos Mathias y Myla que son mi fortaleza y mi razón de existir, que sin ellos no podría encaminar mi vida por el camino correcto y del bien.*

*Gracias también a mi suegro Jesús Pompa por el apoyo y consejos que me brindó durante todo el proceso universitario y para la culminación de la tesis.*

*Julio C. Aguilar Llatas*

## ÍNDICE

	<b>Pág.</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>iv</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÍNDICE DE FOTOS</b> .....	<b>x</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	<b>xi</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xiii</b>
<b>CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>4</b>
2.1.1. 4Antecedentes Locales.....	4
<b>2.2. BASES TEÓRICAS</b> .....	<b>4</b>
2.2.1. Clasificación Empírica de los Macizos Rocosos .....	5
2.2.2. Criterios de Rotura.....	10
2.2.3. Tipos de Rotura en Rocas.....	14
2.2.4. Sismicidad.....	19
2.2.5. Análisis de Taludes.....	21
2.2.6. Métodos de cálculo para el análisis de taludes .....	22
2.2.7. Método de equilibrio limite .....	23
2.2.8. Factor de seguridad.....	28
<b>2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS</b> .....	<b>30</b>
<b>CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>33</b>
<b>3.1. UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>33</b>
3.1.1. Geográfica.....	33
3.1.2. Política .....	33
3.1.3. Accesibilidad .....	33
3.1.4. Clima.....	34
<b>3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>35</b>
3.2.1. Tipo, nivel, diseño y método de investigación .....	35
3.2.2. Población de estudio.....	35

	<b>Pág.</b>
3.2.3.	Muestra ..... 35
3.2.4.	Unidad de análisis..... 35
<b>3.3.</b>	<b>DEFINICIÓN DE VARIABLES ..... 35</b>
<b>3.4.</b>	<b>TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS..... 36</b>
3.4.1.	Técnicas ..... 36
3.4.2.	Instrumentos y Equipos ..... 36
3.4.3.	Software´s..... 37
<b>3.5.</b>	<b>PROCEDIMIENTO. .... 37</b>
3.5.1.	Etapa inicial ..... 37
3.5.2.	Etapa de campo..... 37
3.5.3.	Etapa final ..... 37
<b>3.6.</b>	<b>GEOMORFOLOGÍA..... 38</b>
3.6.1.	Planicies ..... 38
3.6.2.	Lomadas..... 39
3.6.3.	Laderas..... 39
3.6.4.	Escarpas ..... 40
<b>3.7.</b>	<b>GEOLOGÍA LOCAL ..... 41</b>
3.7.1.	Grupo Goyllarisquizga (Ki-g)..... 41
3.7.2.	Grupo Crisnejas ..... 43
3.7.3.	Grupo Pulluicana (Ks-p)..... 44
3.7.4.	Formación Cajamarca (Ks-Ca)..... 44
3.7.5.	Depósitos aluviales (Qh-al) ..... 45
3.7.6.	Depósitos fluviales (Qh-fl) ..... 45
<b>3.8.</b>	<b>GEOLOGÍA ESTRUCTURAL ..... 46</b>
3.8.1.	Falla de Rumbo..... 46
3.8.2.	Diaclasas..... 46
<b>3.9.</b>	<b>ESTUDIO GEOTÉCNICO ..... 47</b>
3.9.1.	TALUD O1 ..... 49
3.9.2.	TALUD O2 ..... 60
3.9.3.	TALUD O3 ..... 71
3.9.4.	TALUD O4 ..... 81
3.9.5.	TALUD O5 ..... 91
3.9.6.	TALUD O6 ..... 101

	<b>Pág.</b>
<b>CAPÍTULO IV ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>111</b>
<b>4.1. RESULTADOS .....</b>	<b>111</b>
4.1.1. Análisis Geomecánico .....	112
4.1.2. Cinemática de las Discontinuidades .....	114
4.1.3. Análisis de Estabilidad.....	115
<b>4.2. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS .....</b>	<b>117</b>
<b>CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>118</b>
<b>5.1. CONCLUSIONES .....</b>	<b>118</b>
<b>5.2. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>119</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>120</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>122</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Índice de calidad de la roca en función al RQD.....	5
Tabla 2. Parámetros de valores para la clasificación <i>RMR89</i> .....	6
Tabla 3. Calidad de macizo rocoso en función al <i>RMR89</i> .....	7
Tabla 4: GSI para macizos rocosos homogéneos.....	8
Tabla 5. Estimación de RCU en campo.....	9
Tabla 6. Factor de disturbacion de Hoek y Brown. ....	11
Tabla 7. Factor de Zona Definida en la Norma Técnica E.030 .....	20
Tabla 8. Parámetros de entrada para el Cálculo de los coeficientes sísmicos.....	20
Tabla 9. Factores condicionantes y desencadenantes para Inestabilidad de taludes.....	21
Tabla 10. Métodos para analizar estabilidad de taludes. ....	25
Tabla 11. Rangos de factores de seguridad para taludes .....	30
Tabla 12. Coordenadas UTM Sistema WGS 84.....	33
Tabla 13. Acceso para la investigación.....	34
Tabla 14. Escenarios probabilísticos para análisis de taludes.....	47
Tabla 15. Talud 01-Coordenadas, orientación y geometría del talud.....	49
Tabla 16. Talud 01-Valores del macizo rocoso. ....	50
Tabla 17. Talud 01-Cálculo del RQD.....	51
Tabla 18. Talud 01-Cálculo del GSI.....	51
Tabla 19. Talud 01-Propiedades Geomecánicas Fm. Chimú.....	51
Tabla 20. Talud 02-Coordenadas, orientación y geometría del talud.....	60
Tabla 21. Talud 02-Valores del macizo rocoso. ....	61
Tabla 22. Talud 02-Cálculo del RQD.....	62
Tabla 23. Talud 02-Cálculo del GSI.....	62
Tabla 24. Talud 02-Propiedades Geomecánicas de la Fm. Chimú.....	62
Tabla 25. Talud 03-Coordenadas, orientación y geometría del talud.....	71
Tabla 26. Talud 03-Valores del macizo rocoso. ....	72
Tabla 27. Talud 03-Cálculo del RQD.....	73
Tabla 28. Talud 03-Cálculo del GSI.....	73
Tabla 29. Talud 03-Propiedades Geomecánicas Fm. Carhuaz. ....	73
Tabla 30. Talud 04- Coordenadas, orientación y geometría del talud.....	81
Tabla 31. Talud 04-Valores del macizo rocoso. ....	82
Tabla 32. Talud 04-Cálculo del RQD.....	83

	<b>Pág.</b>
Tabla 33. Talud crítico N° 04-Cálculo del GSI. ....	83
Tabla 34. Talud 04-Propiedades Geomecánicas Fm. Farrat. ....	83
Tabla 35. Talud 05- Coordenadas, orientación y geometría del talud.....	91
Tabla 36. Talud 05-Valores del macizo rocoso. ....	92
Tabla 37. Talud 05-Cálculo del RQD. ....	93
Tabla 38. Talud 05-Cálculo del GSI. ....	93
Tabla 39. Talud 05-Propiedades Geomecánicas Fm Chúlec. ....	93
Tabla 40. Talud 06- Coordenadas, orientación y geometría del talud.....	101
Tabla 41. Talud 06-Valores del macizo rocoso.....	102
Tabla 42. Talud 06-Cálculo del RQD. ....	103
Tabla 43. Talud 06-Cálculo del GSI. ....	103
Tabla 44. Talud 06-Propiedades Geomecánicas Fm. Cajamarca. ....	103
Tabla 45. Columna estratigráfica de la zona de investigación.....	111
Tabla 46. Resumen del RQD de cada talud. ....	112
Tabla 47. Resumen del RMR de cada talud.....	112
Tabla 48. Resumen del GSI de cada talud. ....	112
Tabla 49. Resumen Parámetros de entrada para cada Talud. ....	113
Tabla 50. Resumen de Parámetros de Salida de cada Talud.....	113
Tabla 51. Análisis con software Dips v.6.0 para cada Talud.....	114
Tabla 52. Rangos de factores de seguridad.....	115
Tabla 53. Resumen del Factor de Seguridad para cada Talud.....	116

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Relación entre el esfuerzo principal mayor y menor del criterio de Hoek - Brown y el equivalente de Mohr - Coulomb. (Hoek et al., 2002).....	13
Figura 2. Orientación de las familias de discontinuidades respecto al talud para roturas en cuña. (Hoek & Bray, 1981).....	14
Figura 3. Mecanismo rotura en cuña a) Modelo de mecanismo en cuña, b) representación estereográfica (Hoek & Bray, 1981). ....	16
Figura 4. Diaclasas respecto al talud para deslizamiento planar. (Hoek & Bray, 1981). ....	17
Figura 5. Mecanismo planar y Representación estereográfica (Hoek & Bray, 1981). ....	18
Figura 6. Rotura planar (González de Vallejo, 2004).....	18
Figura 7. Mapa de zonas sísmicas del Perú (Reglamento Nacional de Edificaciones, 2016). ....	19
Figura 8. Métodos de análisis de estabilidad de taludes. ....	22
Figura 9. Análisis de estabilidad por el método de dovelas: (a) superficie de prueba de falla; (b) fuerzas actuantes en la n-ésima dovela. (Braja Das,2002).....	24
Figura 10. Dovelas de Bishop simplificado: (a) fuerzas actuantes sobre la n-ésima dovela; (b) polígono de fuerza para el equilibrio. Braja Das,2002.....	26
Figura 11. Gráficos utilizados por Morgenstern-Price.....	28
Figura 12. Precipitaciones máxima y mínima. Moteoblu,2022. ....	34
Figura 13. Cálculo del coeficiente sísmico horizontal y vertical, mediante el Software LOADCAP de Geostru. ....	48
Figura 14. Talud 01-afloramiento de arenisca en la Fm Chimú y perfil del talud.....	49
Figura 15. Talud 01-Propiedades Geomecánicas de Areniscas en la Fm. Chimú. ....	52
Figura 16. Talud 01-Análisis Cinemático, indican probabilidad de rotura tipo cuña. ....	53
Figura 17. Talud 01-Análisis Cinemático, indican probabilidad de rotura planar.....	54
Figura 18. Talud 01-Análisis Slide en condiciones naturales. ....	55
Figura 19. Talud 01-Análisis Slide en condiciones de saturación parcial. ....	56
Figura 20. Talud 01-Análisis Slide en condiciones de Saturación Total. ....	57
Figura 21. Talud 01-Análisis Slide en Condiciones de Sismicidad. ....	58
Figura 22. Talud 01-Análisis Slide en condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad Máxima. ....	59

	<b>Pág.</b>
Figura 23. Talud 02-afloramiento de rocas areniscas y perfil del talud.....	60
Figura 24. Talud 02-Propiedades Geomecánicas de las areniscas en la Fm. Chimú. ....	63
Figura 25. Talud 02-Análisis Cinemático, indican probabilidad de rotura tipo cuña. ....	64
Figura 26. Talud 02-Análisis Cinemático, indican probabilidad de rotura planar. ....	65
Figura 27. Talud 02-Análisis Slide en Condiciones Naturales. ....	66
Figura 28. Talud 02-Análisis Slide en condiciones de Saturación Parcial.....	67
Figura 29. Talud 02-Análisis Slide en condiciones de Saturación Total. ....	68
Figura 30. Talud 02-Análisis Slide en condiciones de Sismicidad Máxima. ....	69
Figura 31. Talud 02-Análisis Slide en condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad Máxima. ....	70
Figura 32. Talud 03-afloramiento de rocas areniscas y perfil del talud.....	71
Figura 33. Talud 03-Propiedades Geomecánicas de la arenisca en la Fm. Carhuaz.....	74
Figura 34. Talud 03-Análisis Cinemático, indican probabilidad de rotura ]tipo cuña. ....	75
Figura 35. Talud 03-Análisis Slide en Condiciones Naturales.....	76
Figura 36. Talud 03-Análisis Slide en condiciones de Saturación Parcial.....	77
Figura 37. Talud 03-Análisis Slide en Condiciones de Saturación Total. ....	78
Figura 38. Talud 03-Análisis Slide en Condiciones de Sismicidad Máxima.....	79
Figura 39. Talud 03-Análisis Slide en Condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad Máxima. ....	80
Figura 40. Talud 04-afloramiento de rocas areniscas y perfil del talud.....	81
Figura 41. Talud 04-Propiedades Geomecánicas de las areniscas en la Fm. Farrat. ....	84
Figura 42. Talud 04-Análisis Cinemático, indican probabilidad de rotura tipo cuña. ....	85
Figura 43. Talud 04-Análisis Slide en Condiciones Naturales. ....	86
Figura 44. Talud 04-Análisis Slide en Condiciones de Saturación Parcial.....	87
Figura 45. Talud 04-Análisis Slide en Condiciones de Saturación Total. ....	88
Figura 46. Talud 04-Análisis Slide en Condiciones de Sismicidad Máxima.....	89
Figura 47. Talud 04-Análisis en Condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad. ....	90
Figura 48. Talud 05-afloramiento de rocas calizas y perfil del talud.....	91
Figura 49. Talud 05-Propiedades Geomecánicas de las calizas en la Fm. Chúlec.....	94
Figura 50. Talud 05-Análisis Cinemático, indican probabilidad de rotura tipo cuña. ....	95
Figura 51. Talud 05-Análisis Slide en Condiciones Naturales. ....	96
Figura 52. Talud 05-Análisis Slide en Condiciones de Saturación Parcial.....	97

	<b>Pág.</b>
Figura 53. Talud 05-Análisis Slide en Condiciones de Saturación Total. ....	98
Figura 54. Talud 05-Análisis Slide en Condiciones de Sismicidad Máxima.....	99
Figura 55. Talud 05-Análisis Slide en Condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad Máxima. ....	100
Figura 56. Talud 06-afloramiento de rocas calizas y perfil del talud.....	101
Figura 57. Talud 06-Propiedades Geomecánicas de la caliza en la Fm. Cajamarca.....	104
Figura 58. Talud 06-Análisis Cinemático, indican probabilidad de rotura tipo cuña. ....	105
Figura 59. Talud 06-Análisis en Condiciones Naturales.....	106
Figura 60. Talud 06-Análisis en Condiciones de Saturación Parcial.....	107
Figura 61. Talud 06-Análisis en Condiciones de Saturación Total.....	108
Figura 62. Talud 06-Análisis en Condiciones de Sismicidad Máxima.....	109
Figura 63. Talud 06-Análisis en Condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad Máxima. ....	110

## ÍNDICE DE FOTOS

	<b>Pág.</b>
Foto 1. Planicie ubicada al NE del Río Llaucano. ....	38
Foto 2. Lomada ubicada al NE del Río Llaucano. ....	39
Foto 3. Ladera ubicada al NE del Río Llaucano. ....	40
Foto 4. Escarpa al margen izquierdo del Río Llaucano. ....	40
Foto 5. Areniscas y estratos de carbón en la Fm. Chimú.....	41
Foto 6. Areniscas y lutitas en la Fm. Carhuaz.....	42
Foto 7. Afloramiento de Areniscas en la Fm. Farrat.....	43
Foto 8. Afloramiento de Calizas en la Fm. Chúlec.....	43
Foto 9. Afloramiento de calizas del Gp. Pulluicana.....	44
Foto 10. Caliza de la Fm. Cajamarca. ....	44
Foto 11. Depósitos Aluviales con matriz areno-limosa.....	45
Foto 12. Depósitos Fluviales en el río Llaucano.....	45
Foto 13. Falla dextral margen derecha del río Llaucano.....	46
Foto 14. Familia de discontinuidades en la Fm. Chimú.....	47

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>GSI</b>	:	Índice de Resistencia Geológica.
<b>RQD</b>	:	Índice de Calidad de la Roca.
<b>RMR<sub>99</sub></b>	:	Sistema de Valoración del Macizo Rocoso.
<b>GPS</b>	:	Sistema de Posicionamiento Global.
<b>WGS-84</b>	:	Sistema Geodésico Mundial 1984.
<b>(RCU)</b>	:	Resistencia a la compresión uniaxial.
<b>Km</b>	:	Kilómetro.
<b>MDE</b>	:	Modelo Digital de Elevaciones.
<b>MR</b>	:	Relación modular.
<b>CN</b>	:	Condición Natural.
<b>SP</b>	:	Saturación Parcial.
<b>ST</b>	:	Saturación Total.
<b>SM</b>	:	Sismicidad Máxima.
<b>SP-SM</b>	:	Combinación de la Saturación Parcial con Sismicidad Máxima.
<b>FS</b>	:	Factor de Seguridad.
<b>UTM</b>	:	Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator.
<b>D</b>	:	Dip
<b>DD</b>	:	Dip Direction
$\phi'$	:	Ángulo de Fricción
$\lambda$	:	Número de discontinuidades
$\tau_f$	:	Resistencia al corte
<b>c</b>	:	Cohesión
$m_i$	:	Constante de la roca intacta
$m_b$	:	Constante del macizo rocoso

## RESUMEN

La investigación consiste en la evaluación Geotécnica de los taludes críticos entre la carretera de Ahijadero - Santa Rosa, Distrito de Bambamarca Provincia de Hualgayoc, con la finalidad de identificar zonas críticas a lo largo de la carretera, se ha evaluado seis puntos de control ,determinando las características Geológicas, Estructurales, Geomecánicas y Geotécnicas, litológicamente están formado por areniscas y calizas en las formaciones Chimú, Carhuaz, Farrat, Chúlec, Pulliucana y Cajamarca, se evidencian taludes donde los macizos rocoso están bastante fracturados y meteorizados los cuales se comportan de manera inestables producto de la erosión y meteorización y el alto grado de fracturamiento originado por procesos supérgenos y tectónicos. Del análisis de los seis taludes críticos a lo largo de la carretera en mención, se ha realizado la caracterización geomecánica aplicando el RMR,GSI y RQD ,y mediante el software Dips v.6.0 se analizó la cinemática de las discontinuidades teniendo rotura tipo planar y cuña; para determinar el ángulo de fricción interna y cohesión del material utilizamos el software RocData v.4.0; por último se ha determinado el factor de seguridad de cada talud en diferente escenarios probabilísticos (Condiciones Natural, Saturación Parcial, Saturación Total, Sismicidad Máxima, Saturación Parcial con Sismicidad Máxima) con el software Slide v.6.0 a través del método de equilibrio límite de los cuales se tiene los siguientes resultados: Talud 01 es inestables, frente a condiciones de saturación total; talud 02 es inestable, en condiciones de saturación total y combinación SP y SM; el talud 03 es inestable, en condiciones de saturación parcial y sismicidad máxima; talud 04 es inestables, en condiciones de saturación total y el talud 05 es inestable en condiciones de saturación total.

**Palabras claves:** Talud, Factor de Seguridad, Inestabilidad.

## ABSTRACT

The investigation consists of the Geotechnical evaluation of the critical slopes between the Ahijadero - Santa Rosa highway, Bambamarca District, Hualgayoc Province, in order to identify critical areas along the highway, six control points have been evaluated, determining the Geological, Structural, Geomechanical and Geotechnical characteristics, lithologically they are formed by sandstones and limestones in the Chimú, Carhuaz, Farrat, Chúlec, Pulliucana and Cajamarca formations, slopes are evident where the rocky massifs are quite fractured and weathered which behave in a different way. unstable product of erosion and weathering and the high degree of fracturing caused by supergene and tectonic processes. From the analysis of the six critical slopes along the mentioned highway, the geomechanical characterization has been carried out applying the RMR, GSI and RQD, and by means of the Dips v.6.0 software, the kinematics of the discontinuities having planar type breakage and cradle; to determine the angle of internal friction and cohesion of the material we use the RocData v.4.0 software; Finally, the safety factor of each slope has been determined in different probabilistic scenarios (Natural Conditions, Partial Saturation, Total Saturation, Maximum Seismicity, Partial Saturation with Maximum Seismicity) with the Slide v.6.0 software through the limit equilibrium method of which have the following results: Slope 01 is unstable, compared to conditions of total saturation; slope 02 is unstable, in conditions of total saturation and combination SP and SM; slope 03 is unstable, under conditions of partial saturation and maximum seismicity; slope 04 is unstable under conditions of total saturation and slope 05 is unstable under conditions of total saturation.

**Keywords:** Slope, Safety Factor, Instability.

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

Hoy en día la Geotecnia ha ido tomando mayor interés tanto para el sector de minería y construcción, a lo largo del tiempo por movimientos sísmicos y apertura de carreteras ha originado que los taludes tengan un comportamiento Geomecánico diferente al de su estado natural, esta inestabilidad constituye un problema desde el punto de vista Geotécnico, el cual obliga a realizar un estudio a lo largo de la carretera para poder controlar y dar un alcance sobre las posibles fallas del talud. Es por ello que se desarrolla métodos de cálculo, esto ha generado que su modelo se haya convertido en una herramienta muy utilizada, los estudios para el diseño de taludes se vienen realizando aplicando los conceptos de cinemática y equilibrio limite.

La investigación comprende los taludes que se encuentran en la carretera entre los Centros Poblados de Ahijadero y Santa Rosa, donde se observa problemas de inestabilidad de taludes y deslizamientos generando roturas tipo cuña y planar en rocas areniscas y calizas dentro de las Formaciones Chimú, Carhuaz, Farrat, Chúlec, Pulliucana y Cajamarca debido al fuerte fracturamiento y meteorización de estas. Estos macizos rocosos están afectados por la infiltración y meteorización debido a las constantes precipitaciones y a la sismicidad inducida provocada por las detonaciones que genera la minería artesanal y por el tránsito de vehículos, generando gran cantidad de discontinuidades a lo largo de la carretera, condicionando el comportamiento y características Geotécnicas de los taludes, lo cual repercute en los Factores de Seguridad, creando zonas críticas.

Por lo tanto, planteamos la pregunta: ¿Existe inestabilidad geotécnica en los macizos rocosos, debido a la incidencia de las variables detonantes infiltración y sismicidad en los taludes críticos de la carretera entre los Centros Poblados Ahijadero - Santa Rosa?

La investigación gira alrededor de una respuesta anticipada, la cual se cita de la siguiente manera: El comportamiento geotécnico de los macizos rocosos, entre la carretera de los

Centros Poblados Ahijadero- Santa Rosa, están determinadas por las condiciones Geológicas, Geomecánicas y Geotécnicas, las cuales son afectadas por las variables detonantes como la precipitación y la sismicidad, generando inestabilidad de los taludes, los cuales se comportan en condiciones críticas.

La investigación abarca el estudio Geológico-Geotécnico de los taludes críticos en la carretera de los Centros Poblados Ahijadero – Santa Rosa, donde se tiene fuerte meteorización y fracturamiento de los macizos rocosos; además presentan constantes precipitaciones e infiltraciones, así como también sismicidad, dando lugar a la inestabilidad de los taludes. Por ello es necesario realizar un estudio sobre las características Geológicas, Geomecánicas y Geotécnicas de los macizos rocosos para obtener el conocimiento apropiado y con ello las instituciones como el municipio distrital, ministerio de transportes y otras instituciones locales puedan solucionar dichos problemas en el más corto plazo,

La carretera antes mencionada, representa un peligro constante para la población debido a los constantes desprendimientos, deslizamientos de rocas y a la sección transversal reducida de la carretera, por tal motivo se evaluará el comportamiento Geotécnico de los taludes críticos de la carretera de los Centros Poblados de Ahijadero-Santa Rosa de manera descriptiva, analítica y explicativa. El objetivo general de la investigación es: Realizar la evaluación Geotécnica de los taludes críticos de los macizos rocosos de la carretera Ahijadero –Santa Rosa.

La investigación tiene como objetivos específicos: Cartografiado Geológico, analizar el comportamiento de las estructuras, realizar caracterización Geomecánica, Analizar el comportamiento Geotécnico de los taludes, determinar Factores de Seguridad de cada talud.

La investigación se divide en V capítulos.

En el capítulo I, Introducción. Se describe el planteamiento y formulación del problema, hipótesis, justificación, alcances de la investigación y los objetivos.

Capítulo II, Marco Teórico. Se describe los antecedentes de estudios anteriores, bases teóricas de algunos autores que son fundamentales para el desarrollo de la investigación y definición de términos básicos.

Capítulo III, Materiales y Métodos. Describimos la ubicación Geográfica, Política de la investigación, accesibilidad, metodología, definición de variables, técnicas e instrumentos de recolección de datos, para terminar, se desarrolla el estudio de la litología, geomorfología, geomecánica y geotecnia de los taludes críticos.

Capítulo IV, Análisis y discusión de resultados. Se sustenta y se explica todos los resultados de la evaluación Geotécnica de los seis taludes críticos, por último, se realiza la contrastación de la hipótesis.

Capítulo V, Se plasma las conclusiones de acuerdo al objetivo planteado de la investigación y recomendaciones para futuros estudios.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN**

##### **2.1.1. Antecedentes Locales**

Montoya (2014). Realizó la evaluación Geotécnica de los taludes de la carretera Cruz blanca – El Gavilán, identifico zonas críticas propensas a deslizarse, y analizó mediante ensayos geotécnicos y programas como el Slide y Dips, obteniendo el factor de seguridad y por último describe soluciones para mantener un talud estable. Universidad Nacional de Cajamarca.

Rojas (2018). Determinó el comportamiento Geotécnico de los taludes críticos de la carretera Lajas - El Tayal, Provincia de Chota. A través del comportamiento geotécnico de los taludes, concluye que los principales factores de inestabilidad son originados por un fuerte fracturamiento producto de la geotectónica regional-local, meteorización y sismicidad. Universidad Nacional de Cajamarca.

#### **2.2. BASES TEÓRICAS**

La mecánica de rocas se ocupa del estudio teórico y práctico de las propiedades geomecánicas y comportamiento mecánico de los materiales rocosos, y su respuesta ante la acción de fuerzas aplicadas en su entorno físico; iniciándose como consecuencia de la utilización del medio geológico en obras superficiales y subterráneas. La caracterización de las rocas y los macizos rocosos y el estudio del comportamiento mecánico y deformacional son complejos debido a la gran variabilidad de características y propiedades que presentan y el elevado número de factores que los condicionan.

### 2.2.1. Clasificación Empírica de los Macizos Rocosos

La clasificación de los macizos rocosos se basa en factores que determinan su comportamiento Geomecánico como: la litología, propiedades de la matriz rocosa, estructura geológica, discontinuidades, grado de meteorización o alteración, estado de esfuerzos al que está sometido el material y las condiciones hidrogeológicas (González de Vallejo, 2004).

Las clasificaciones Geomecánicas empíricas más utilizadas en taludes son: RQD, RMR y GSI.

#### *Índice de Calidad de la Roca (RQD: Rock Quality Designation – Deere 1967)*

Fue desarrollado por Deere et al a finales de los años 60 (1967). Este parámetro nos indica la calidad del macizo rocoso in situ a partir del grado de fracturación.

Para determinar el RQD en una línea de muestreo, se puede obtener el promedio del espaciado de las discontinuidades (número de discontinuidades dividida para la longitud de la línea de muestreo), (Gavilanes & Andrade, 2004). Se calcula mediante la ecuación:

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

Dónde:  $\lambda = N^\circ$  de discontinuidades/longitud

Tabla 1. Índice de calidad de la roca en función al RQD.

RQD (%)	CALIDAD DE LA ROCA
< 25	Muy mala
25 – 50	Mala
50 – 75	Regular
75 – 90	Buena
90 – 100	Muy buena

Fuente: González de Vallejo, 2004.

**Sistema de Valoración del Macizo Rocoso (Rock Mass Rating), Bieniawski<sub>89</sub>**

Bieniawski (1989). Propuso la estimación del macizo rocoso, un sistema que combina RQD con otras observaciones como la presencia de agua y la meteorización. Bieniawski propuso ocho parámetros en su clasificación, que luego fueron modificados, dejando cinco parámetros básicos. Hoek & Brown, 1980 (ver Tabla 2).

Tabla 2. Parámetros de valores para la clasificación  $RMR_{89}$ .

PARÁMETRO		RANGO DE VALORES							
1	Resistencia de la Roca Intacta	Ensayo Carga Puntual	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Compresión simple (MPa)		
		Compresión Simple	> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
		VALOR	15	12	7	4	2	1	0
2		RQD	90 - 100 %	75 - 90 %	50 - 75 %	25 - 50 %	< 25 %		
		VALOR	20	17	12	8	3		
3		Espaciado de las Discontinuidades	> 2m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	6 - 20 cm	< 6 cm		
		VALOR	20	15	10	8	5		
4	Estado de las Discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
		VALOR	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
		VALOR	6	5	4	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente Rugosa	Ondulada	Suave		
		VALOR	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno Duro < 5 mm	Relleno Duro > 5 mm	Relleno Blando < 5 mm	Relleno Blando > 5 mm		
		VALOR	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		VALOR	6	5	3	1	0		
5	Flujo de agua en las discontinuidades	Relación Presión agua/ Tensión Principal Mayor	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		Condiciones generales	Completamente secas	Ligeramente Húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo		
		VALOR	15	10	7	4	0		

Fuente: Bieniawski, 1989.

Tabla 3. Calidad de macizo rocoso en función al  $RMR_{89}$

CLASE	CALIDAD	VALORACIÓN RMR
I	Muy buena	81 - 100
II	Buena	61 - 80
III	regular	41 - 60
IV	Mala	21 - 40
V	Muy mala	< 20

Fuente: Bieniawski, 1989.

### *Índice de Resistencia Geológica (GSI: Geological Strength Index)*

El índice de calidad Geotécnica desarrollado por Hoek, 1994 es utilizado para corregir los problemas encontrados en el uso del índice RMR y evaluar la resistencia de los macizos rocosos según el criterio generalizado de Evert Hoek y Brown se basa en dos parámetros: la resistencia y la capacidad de deformación de la roca.

Posteriormente, Hoek y Marinos, 2000. Muestran que GSI evalúa la calidad del macizo rocoso en función de los cambios en el grado de fractura, la meteorización, las características de la estructura geológica, el tamaño del bloque y las discontinuidades.

Para:  $RMR_{89} > 23$ , se utiliza la clasificación RMR, tal que:

$$GSI = RMR_{89} - 5$$

Tabla 4: GSI para macizos rocosos homogéneos.

<p><b>INDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA PARA ROCAS FRACTURADAS (HOEK Y MARINOS. 2000)</b></p> <p>Estimar el valor promedio del GSI para la litología, estructura y condiciones superficiales de las discontinuidades. No intentar ser muy preciso. Citar un rango de 33 a 37 es más realístico que un GSI de 35. Note que las tablas no se aplican a las fracturas estructuralmente controladas. Cuando los planos estructurales débiles están en una orientación desfavorable con respecto de la cara excavada, éstas dominarán el comportamiento de todo macizo rocoso. La resistencia de cizalla de las superficies de las rocas es propensa a deteriorarse como el resultado de cambios en el contenido de humedad, se reducirá si hay presencia de agua. Cuando se trabaja con rocas en las categorías de débil a muy débil, se deberían hacer un desplazamiento hacia la derecha. La presión del agua es tratada con análisis de esfuerzos efectivos.</p> <p style="text-align: center;"><b>ESTRUCTURAS</b></p>	<p><b>CONDICIONES DE LAS DISCONTINUIDADES</b></p> <p><b>MUY BUENA</b> Superficies muy rugosas, inalteradas y frescas.</p> <p><b>BUENA</b> Superficies rugosas, ligeramente meteorizadas, con pátinas de óxido de hierro.</p> <p><b>REGULAR</b> Superficies lisas, moderadamente meteorizadas y/o alteradas.</p> <p><b>MALA</b> Superficies lisas y cizalladas, altamente meteorizadas y/o alteradas, con recubrimientos compactos o rellenos de fragmentos angulares.</p> <p><b>MUY MALA</b> Superficies lisas y cizalladas, altamente meteorizadas con revestimientos o rellenos de arcilla blanda.</p> <p style="text-align: center;">DISMINUCIÓN DE LA CONDICIÓN SUPERFICIAL</p> <p style="text-align: center;">➔</p>																																																																																								
 <p><b>INTACTA O MASIVA.</b> Espécimen de roca intacta o roca in-situ masiva con pocas discontinuidades ampliamente espaciadas.</p> <p><b>BLOCOSA.</b> Macizo rocoso inalterado bien trabado, definido por bloques cúbicos formados por 3 familias de discontinuidades.</p> <p><b>MUY BLOCOSA.</b> Macizo rocoso trabado, parcialmente perturbado, definido por bloques angulares de varias caras formado por 4 o más familias de discontinuidades.</p> <p><b>BLOCOSA/PERTURBADA/DEFORMADA</b> Plegada, bloques angulares de muchas familias de discontinuidades, persistencia de los planos de estratificación o esquistosidad.</p> <p><b>DESINTEGRADA.</b> Pobremente trabada, macizo rocoso muy fracturado con mezcla de fragmentos de roca angulares y redondeados.</p> <p><b>LAMINADA/CIZALLADA.</b> Ausencia de blocosidad debido a espaciados cercanos de débil esquistosidad o planos de cizalla.</p>	<p style="text-align: center;">DISMINUYE LA TRABAJÓN DE LAS PIEZAS DE ROCA</p> <p style="text-align: center;">⇓</p> <table border="1" style="width: 100%; height: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 12.5%;"></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;"><b>90</b></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td style="text-align: left;"><b>N/A</b></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;"><b>80</b></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td style="text-align: left;"><b>N/A</b></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: right;"><b>70</b></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td style="text-align: right;"><b>60</b></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td style="text-align: right;"><b>50</b></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td style="text-align: right;"><b>40</b></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td style="text-align: right;"><b>30</b></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td style="text-align: right;"><b>20</b></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td style="text-align: right;"><b>10</b></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: right;"><b>N/A</b></td> <td style="text-align: right;"><b>N/A</b></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>									<b>90</b>							<b>N/A</b>	<b>80</b>							<b>N/A</b>		<b>70</b>									<b>60</b>									<b>50</b>									<b>40</b>									<b>30</b>									<b>20</b>									<b>10</b>		<b>N/A</b>	<b>N/A</b>					
<b>90</b>							<b>N/A</b>																																																																																		
<b>80</b>							<b>N/A</b>																																																																																		
	<b>70</b>																																																																																								
		<b>60</b>																																																																																							
			<b>50</b>																																																																																						
				<b>40</b>																																																																																					
					<b>30</b>																																																																																				
						<b>20</b>																																																																																			
							<b>10</b>																																																																																		
	<b>N/A</b>	<b>N/A</b>																																																																																							

Fuente: Hoek y Marinos (2000)

## ***Resistencia a la Compresión Uniaxial de la Roca***

La Resistencia a la Compresión Uniaxial de la roca se puede determinar en campo, mediante la siguiente tabla:

Tabla 5. Estimación de RCU en campo.

<b>Clase (a)</b>	<b>Clasificación de la roca según su resistencia</b>	<b>Resistencia uniaxial (Mpa)</b>	<b>índice de carga puntual (Map)</b>	<b>Estimación en terreno de la resistencia</b>	<b>Ejemplos</b>
R6	Extremadamente resistente	>250	>10	Golpes de martillo de Geólogo solo causan descostramientos superficiales en la roca	Basalto fresco, chert, diablasa, gneis, granito, cuarcita
R5	Muy resistente	100-250	4-10	un trozo de roca requiere varios golpes de martillo de Geólogo para fracturarse	Anfibolita, gabro, arenisca, basalto, gneis, marmol, granodiorita, caliza, riolota, toba
R4	Resistente	50-100	2-4	un trozo de roca requiere mas de un golpe de martillo de Geólogo para fracturarse	Caliza, marmol, filita, arenisca, esquistos, pizarras
R3	Moderadamente resistente	25-50	1-2	un trozo de roca puede fracturarse con un golpe del martillo de Geólogo, pero no es posible descostrar la roca con un cortaplumas	Arcillolita, carbón, esquistos, pizarras, limolitas
R2	Débil	5-25	(b)	un golpe con la punta del martillo de Geólogo deja una indentación superficial. La roca puede ser descostrada con un cortaplumas, pero con dificultad	Creta, sal mineral, potasio
R1	Muy débil	1-5		la roca se disgrega al ser golpeada con la punta del martillo de Geólogo. La roca puede ser descostrada con un cortaplumas	Roca muy alterada o meteorizada
R0	Extremadamente Débil	0.25-1		la roca puede ser indentada con la uña del pulgar	salbanda arcillosa dura

Fuente: Hoek y Brown ,1997.

## 2.2.2. Criterios de Rotura

### *Criterio de Hoek-Brown Generalizado*

e

Hoek (1994) introdujo el criterio generalizado de Hoek-Brown, donde la forma de la curva de tensión principal o la envolvente de Mohr se puede ajustar mediante un coeficiente variable **a** en lugar de la raíz cuadrada del criterio original (Hoek et al. 2002). Este criterio se utilizó no solo para rocas duras sino también para macizos rocosos débiles. Dada por la siguiente expresión.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Donde **m<sub>b</sub>** es el valor reducido de la constante material **m<sub>i</sub>** y se obtiene de la siguiente manera:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

**s** y **a** son constantes del macizo rocoso y se obtiene de la siguiente manera:

$$s = \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

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

**D** depende principalmente del factor de alteración al que ha estado expuesto el macizo rocoso debido a efectos de voladura o relajación de esfuerzos. Va desde 0 para macizos rocosos in situ no perturbados hasta 1 para macizos rocosos muy alterados.

La resistencia a la compresión uniaxial se obtiene haciendo  $\sigma'_3 = \mathbf{0}$  en el criterio de Hoek - Brown generalizado. Dada por la expresión.

$$\sigma_c = \sigma_{ci} s^a$$

La resistencia a la tracción se obtiene haciendo  $\sigma'_1 = \sigma'_3 = \sigma_t$  en el criterio generalizado de Hoek-Brown. Esto representa un estado de tensión biaxial. Dada por la expresión

$$\sigma_t = -\frac{s\sigma_{ci}}{m_b}$$

Tabla 6. Factor de disturbacion de Hoek y Brown.

Apariencia del Macizo Rocoso	Descripción del Macizo Rocoso	Valor D Sugerido
	Excelente calidad de voladura controlada o excavación con tuneladora TBM, con resultados de alteración mínima del macizo rocoso confinado circundante al túnel.	<b>D=0</b>
	Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladuras) con una alteración mínima en el macizo circundante  Cuando aparezcan problemas de deformación en el piso durante el avance. La alteración puede ser severa a menos que se coloquen una contrabóveda temporal, tal como se muestra en la figura.	<b>D=0</b>  <b>D=0.5</b> No invert
	Voladura de muy mala calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2 o 3 metros en el macizo rocoso circundante.	<b>D=0.8</b>
	Pequeñas voladuras en taludes de ingeniería civil y geotécnica dan lugar a pequeños daños al macizo rocoso, particularmente si se usan voladuras de contorno como se muestra en el lado izquierdo de la fotografía. Sin embargo, la alteración de tensión resulta en alguna alteración.	<b>D=0.7</b> Good blasting  <b>D=1.0</b> Poor blasting
	Los taludes en las grandes minas a cielo abierto sufren alteraciones significativas debido a las grandes voladuras de producción y también debido a la relajación de tensiones al resistir el estéril de recubrimiento  En algunas rocas blandas la excavación puede llevarse a cabo mediante el ripado y empuje con tractores de orugas y el grado de afección a los taludes será menor.	<b>D=1.0</b> Production blasting  <b>D=0.7</b> Mechanical excavation

Fuente: Hoek et al, 2002.

### ***Criterio de Mohr – Coulomb***

Para utilizar el criterio de Mohr-Coulomb, es necesario determinar los ángulos de fricción y la resistencia cohesiva para cada macizo rocoso e intervalo de esfuerzos (Hoek et al., 2002). Esto se hace ajustando una relación lineal promedio a una curva generada por el criterio generalizado de Hoek-Brown para un intervalo de esfuerzo principal menor definido por  $\sigma_1 < \sigma_3 < \sigma_{3max}$ .

$$\phi' = \sin^{-1} \left[ \frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right]$$
$$c' = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n}](s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)}}}$$

Habiendo  $\sigma'_{3n} = \sigma'_{3maxi} / \sigma_{ci}$

La resistencia al corte de Mohr-Coulomb ( $\tau$ ), para un esfuerzo normal dado  $\sigma'_n$ , se encuentra sustituyendo estos valores de  $c'$  y  $\phi'$  en la ecuación:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$$

Dónde:

$c'$  = Cohesión efectiva.

$\phi'$  = Ángulo de rozamiento interno efectivo.

$\tau$  = Tensión tangencial.

$\sigma'$  = Tensión normal que actúa en el plano de rotura.

La gráfica equivalente, en términos de esfuerzos principales menor y mayor, está definida por Figura 1.

$$\sigma'_1 = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} + \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'}$$

El concepto de resistencia del macizo rocoso global  $\sigma'_{cm}$  fue introducido por Hoek & Brown (1994), estimándolo a partir de la relación de Mohr - Coulomb.

$$\sigma'_{cm} = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'}$$

Para la estimación del parámetro  $\sigma'_{max}$  en estudios de taludes, Hoek et al. (2002) establecieron la siguiente relación.

$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0.72 \left( \frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.91}$$

Donde  $\gamma$  es peso unitario del macizo rocoso y  $H$  la altura del talud

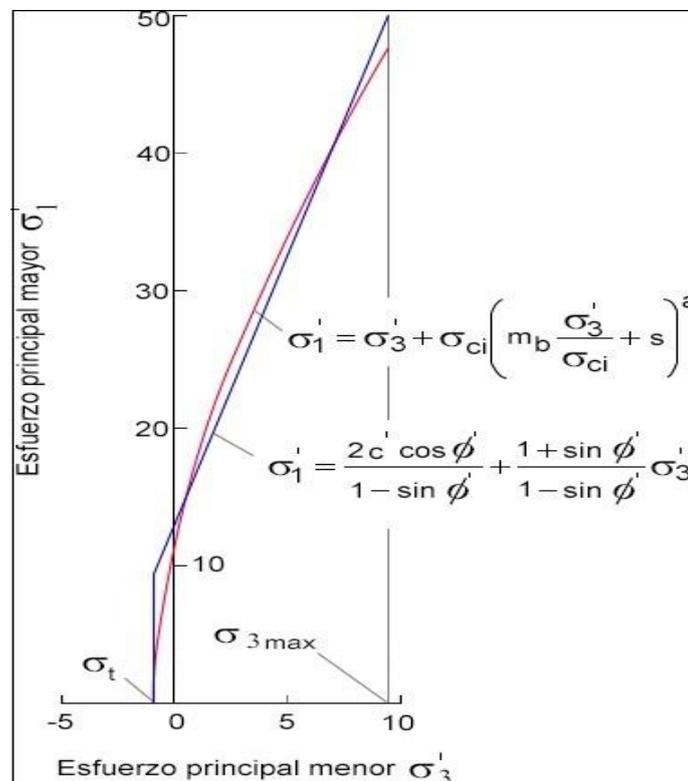


Figura 1. Relación entre el esfuerzo principal mayor y menor del criterio de Hoek - Brown y el equivalente de Mohr - Coulomb. (Hoek et al., 2002).

### 2.2.3. Tipos de Rotura en Rocas

La estabilidad de taludes está influenciada por el fracturamiento del macizo rocoso, por la orientación y distribución de las discontinuidades en relación con el talud.

#### *Rotura en cuña*

Esta rotura ocurre cuando el macizo rocoso se desliza a lo largo de dos discontinuidades que intersecan la superficie del talud en un ángulo oblicuo (Figura 3). La formación de cuñas depende de la litología y el macizo rocoso (Suárez, 1988). Para producir este tipo de falla, es importante que el buzamiento de las discontinuidades sea menor que el buzamiento del talud.

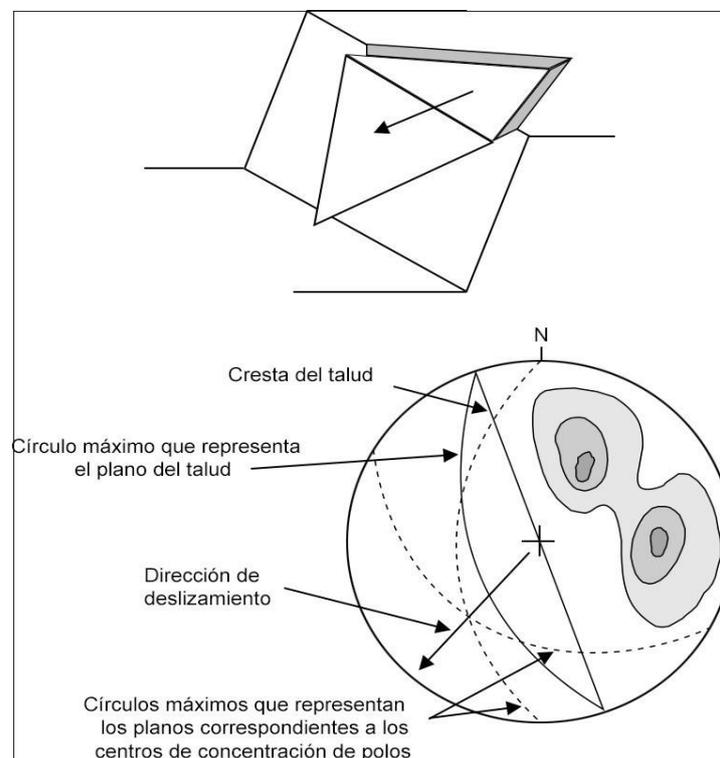


Figura 2. Orientación de las familias de discontinuidades respecto al talud para roturas en cuña. (Hoek & Bray, 1981)

Según Hoek & Bray, 1981 las condiciones estructurales que se deben cumplir para una rotura en cuña son las siguientes (ver Figura 3).

- El rumbo de la línea de intersección debe ser aproximadamente igual a la dirección del buzamiento de la cara del talud

$$\alpha_i = \alpha_f \pm (\text{debe aflorar en dirección del talud})$$

- La inmersión de la línea de intersección debe ser menor que el buzamiento de la cara del talud. Bajo esta condición, se dice que la línea de inmersión aflora en dirección hacia la cara del talud.

$$\psi_i < \psi_f$$

- La inmersión de la línea de intersección debe ser mayor que el ángulo de fricción del o los planos de deslizamiento. Si los ángulos de fricción para ambos planos son marcadamente diferentes, un ángulo promedio de ellos puede ser aplicable.

$$\phi < \psi_i$$

Donde:

$\alpha_f$ : Dirección de buzamiento de la cara del talud

$\alpha_i$  : Dirección de buzamiento de la línea de intersección

$\psi_f$  : Buzamiento del talud

$\psi_i$  : Inmersión de la línea de intersección

$\phi$  : Ángulo de fricción

$\alpha_a$ : Dirección de buzamiento del plano a

$\alpha_b$ : Dirección de buzamiento del plano b.

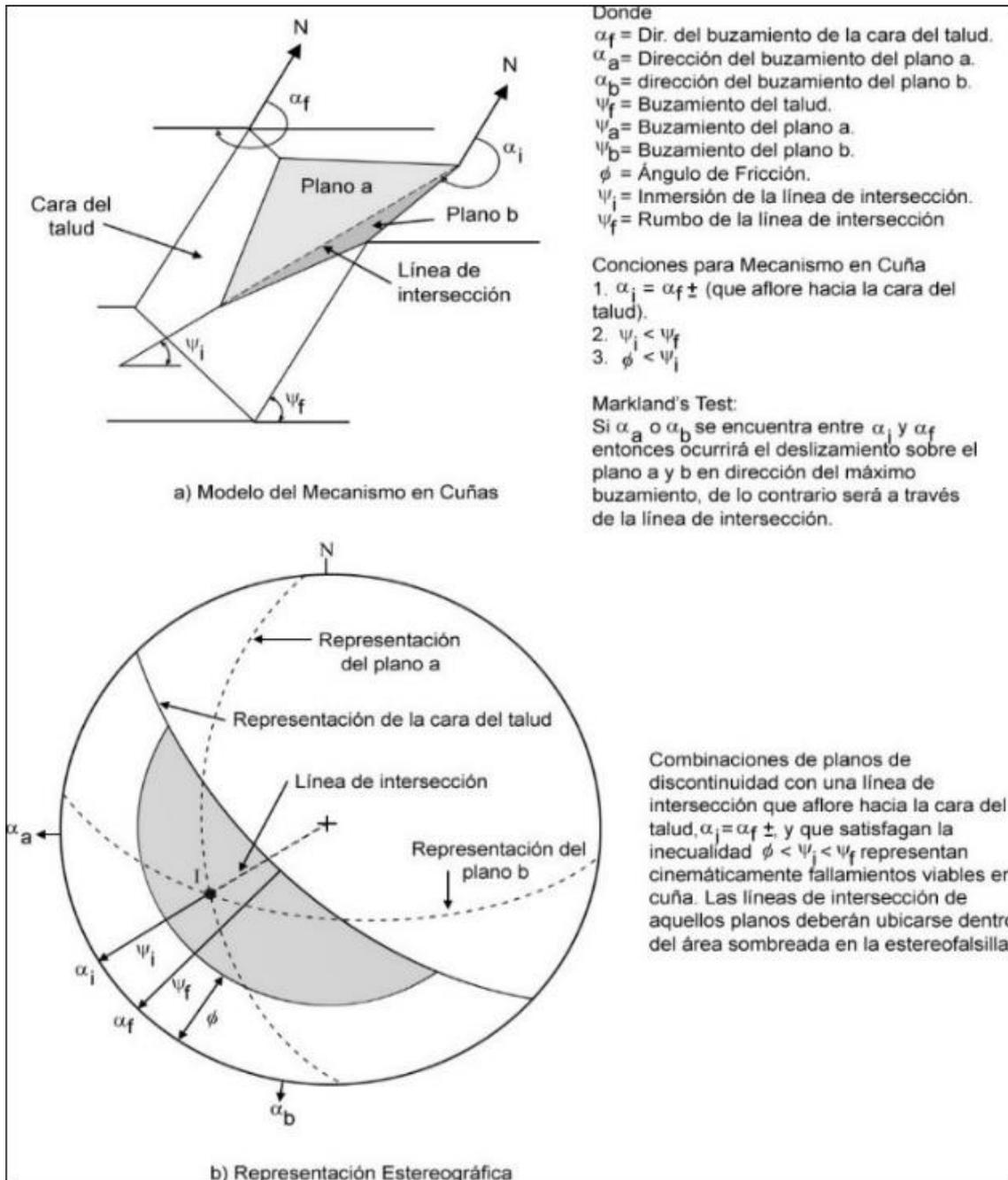


Figura 3. Mecanismo rotura en cuña a) Modelo de mecanismo en cuña, b) representación estereográfica (Hoek & Bray, 1981).

## Rotura planar

Las fallas planas ocurren a lo largo de una superficie aproximadamente plana. Aunque pueden existir otras discontinuidades que definen los límites laterales de los movimientos, solo se tiene en cuenta el efecto de la discontinuidad principal (Suarez,1988). La rotura consiste en el deslizamiento de roca cuyo buzamiento es paralelo o casi paralelo al buzamiento de la cara del talud y es mucho mayor que su ángulo de fricción.

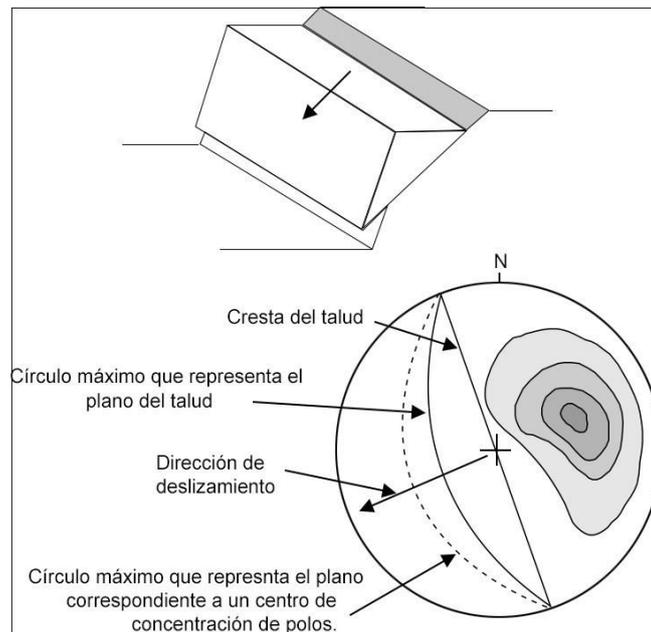


Figura 4. Diaclasas respecto al talud para deslizamiento planar. (Hoek & Bray, 1981).

Según Hoek & Bray, 1981 las condiciones estructurales que se deben cumplir para una rotura planar son las siguientes (ver Figura 5).

- La dirección de buzamiento del plano debe estar  $20^\circ$  dentro de la dirección de buzamiento de la cara del talud Figura 6b.

$$\alpha_p = \alpha_f \pm 20^\circ$$

- El buzamiento del plano debe ser menor al buzamiento del talud Figura 6a.

$$\psi_p < \psi_f$$

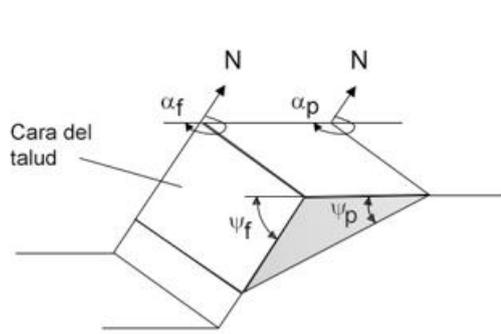
- El buzamiento del plano debe ser mayor al ángulo de fricción interna Figura 6b.

$$\psi_p > \phi_p$$

Dónde:

$\alpha_f$ : Dirección de buzamiento de la cara del talud;  $\alpha_p$ : Dirección de buzamiento del plano.

$\psi_f$ : Buzamiento del talud;  $\psi_p$ : Buzamiento del plano;  $\phi_p$ : Ángulo de fricción.



a) Modelos del Mecanismo Planar

Donde:

$\alpha_f$  = Dirección del buzamiento de la cara del talud.

$\alpha_p$  = Dirección del buzamiento del plano de deslizamiento.

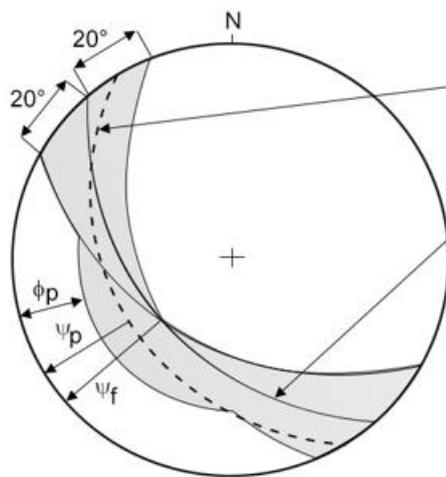
$\psi_f$  = Buzamiento del talud.

$\psi_p$  = Buzamiento del plano.

$\phi_p$  = Ángulo de Fricción del plano.

Condiciones para Mecanismo Planar:

1.  $\alpha_p = \alpha_f \pm 20^\circ$
2.  $\psi_p < \psi_f$
3.  $\psi_p > \phi_p$



Círculo máximo representando el plano de deslizamiento.

Círculo máximo representando la cara del talud.

Planos de discontinuidad que satisfagan las razones:  $(\alpha_f - 20^\circ) \leq \alpha_p \leq (\alpha_f + 20^\circ)$  y  $\phi_p < \psi_p < \psi_f$  son cinemáticamente viables para superficies de deslizamiento. Los círculos máximos que se encuentran dentro del área sombreada cumplirían con estas condiciones.

b) Representación Estereográfica

Figura 5. Mecanismo planar y Representación estereográfica (Hoek & Bray, 1981).

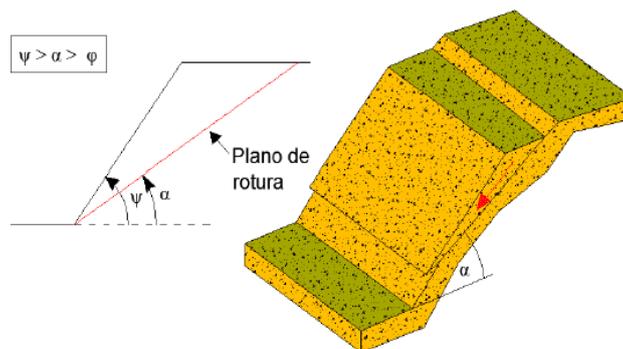


Figura 6. Rotura planar (González de Vallejo, 2004).

## 2.2.4. Sismicidad

La sismicidad es el estudio de los sismos que ocurren en algún lugar en específico. Un lugar puede tener alta o baja sismicidad, lo que tiene relación con la frecuencia con que ocurren sismos en ese lugar. Zúñiga, R. 2011.

Para definir las condiciones sísmicas se consideró la Norma Técnica E.030 Diseño Sismo-resistente del Reglamento Nacional de Edificaciones (2006), con su modificatoria con Decreto Supremo N° 003-2016-Vivienda, publicada por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2016), que, de acuerdo a su última actualización, el Perú se divide en cuatro zonas sísmicas (ver Figura 7).



Figura 7. Mapa de zonas sísmicas del Perú (Reglamento Nacional de Edificaciones, 2016).

A cada zona se le asigna un factor Z, este factor se interpreta como la aceleración máxima del terreno con una probabilidad de 10% de ser excedida en 50 años. El factor Z se expresa como una fracción de la aceleración de la gravedad (ver Tabla 7).

Tabla 7. Factor de Zona Definida en la Norma Técnica E.030

Factor de Zona "Z"	
Zona	Z
4	0.45
3	0.35
2	0.25
1	0.10

Fuente: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2016).

El cálculo de los coeficientes de sismicidad horizontal  $K_h$  y vertical  $K_v$  para el análisis sísmico, se hace mediante el Software Loadcap 2018 y parámetros de entrada (ver Tabla 8).

Tabla 8. Parámetros de entrada para el Cálculo de los coeficientes sísmicos.

a. Factor de Zona (Z)	b. Coeficiente de Amplificación Topográfica (ST)	c. Categoría del perfil estratigráfico(s)
4 = 0.45	<b>ST=1</b> Pendientes topográficas regulares, crestas inferiores al ancho de la base y altura menor a los 30 m.	<b>Tipo A: S = 1</b> Roca u otra formación geológica similar a una roca.
3 = 0.35	<b>ST ≥ 1.2</b> Sitios de proximidad al borde superior de taludes y laderas aislados, ángulo de pendiente > 15°	<b>Tipo B: S = 1.25</b> Depósitos de arenas o gravas muy densas, o arcillas muy consistentes
2 = 0.25	<b>ST ≥ 1.2</b> Sitios de proximidad al borde superior de taludes y laderas aislados, ángulo de pendiente < 30°	<b>Tipo C: S = 1.25</b> Depósitos de arenas o gravas densas, o arcillas consistentes.
1 = 0.10	<b>ST ≥ 1.4</b> Sitios cercanos a la cúspide de la ladera, con crestas significativamente menores al ancho de la base y pendiente > 30°	<b>Tipo D: S = 1.35</b> Depósito de terrenos granulares sueltos a poco densos de cohesión media a no cohesivos. <b>Tipo E: S = 1.25</b> Perfil de suelo formado por una capa aluvial superficial.

Fuente: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2016).

Las componentes sísmicas se definen como:

Amplificación estratigráfica:

$$K_h = (a \times b \times c)/2$$

Parámetros de zona:

$$K_v = (a \times b \times c)/4$$

### 2.2.5. Análisis de Taludes

Los análisis de estabilidad se aplican en el diseño de taludes o cuando éstos presentan problemas de inestabilidad. Se debe elegir el factor de seguridad adecuado según el propósito de la excavación y el carácter temporal o permanente del talud, combinando aspectos de seguridad, costos de ejecución, consecuencias o riesgos que pueden provocar fallas, etc. (González de Vallejo, 2004).

#### *Factores que influyen en la inestabilidad de taludes*

Según González de Vallejo, 2004. La inestabilidad del talud es determinada por: Factores geológicos (estratigrafía, litología, estructuras geológicas, discontinuidades); factores geométricos (altura de talud, inclinación del talud); factores hidrogeológicos (presencia de agua); factores geotécnicos (comportamiento mecánico de las rocas, suelos, resistencia y deformabilidad). La combinación de los factores puede determinar la situación de falla en una o más superficies. Las razones que determinan el comportamiento de los taludes son.

- a) **Factores condicionantes o pasivos:** Son aquellos que se relacionan con los factores geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos, además son considerados intrínsecos a los materiales naturales.
- b) **Factores desencadenantes o activos (detonantes):** Provocan la rotura cuando que se cumplen una serie de condiciones. Se consideran factores externos que actúan sobre los suelos o macizos rocosos, cambiando las características, propiedades y condiciones de equilibrio del talud (ver Tabla 9).

Tabla 9. Factores condicionantes y desencadenantes para Inestabilidad de taludes.

Factores Condicionantes	Factores Desencadenantes
Estratigrafía y litología	Sobrecargas estáticas.
Estructura geológica y discontinuidades	Cargas dinámicas.
Condiciones hidrogeológicas y comportamiento hidrogeológico de los materiales.	Cambios en las condiciones hidrogeológicas.
Tensiones naturales, y estado tenso-deformacionales	Factores climáticos.
Propiedades físicas, resistentes y deformacionales.	Variaciones en la geometría. Reducción de parámetros resistentes.

## 2.2.6. Métodos de cálculo para el análisis de taludes

Son teorías que estudian la estabilidad o posible inestabilidad de los taludes. La única razón para realizar un estudio de la estabilidad de taludes es para garantizar la seguridad de las personas y de sus propiedades. Resulta que la mayoría de los daños causados por los movimientos en taludes pueden evitarse. Smith, 2014.

Este proceso implica determinar y comparar si hay suficiente resistencia para resistir los esfuerzos cortantes en las superficies con mayor probabilidad de fallar. El Método de Equilibrio Límite es más sencillo de utilizar y permiten analizar los casos de falla traslacional, falla rotacional, así como las fallas de inclinación (“Toppling”), falla planar y en cuña. Suárez, 2009.

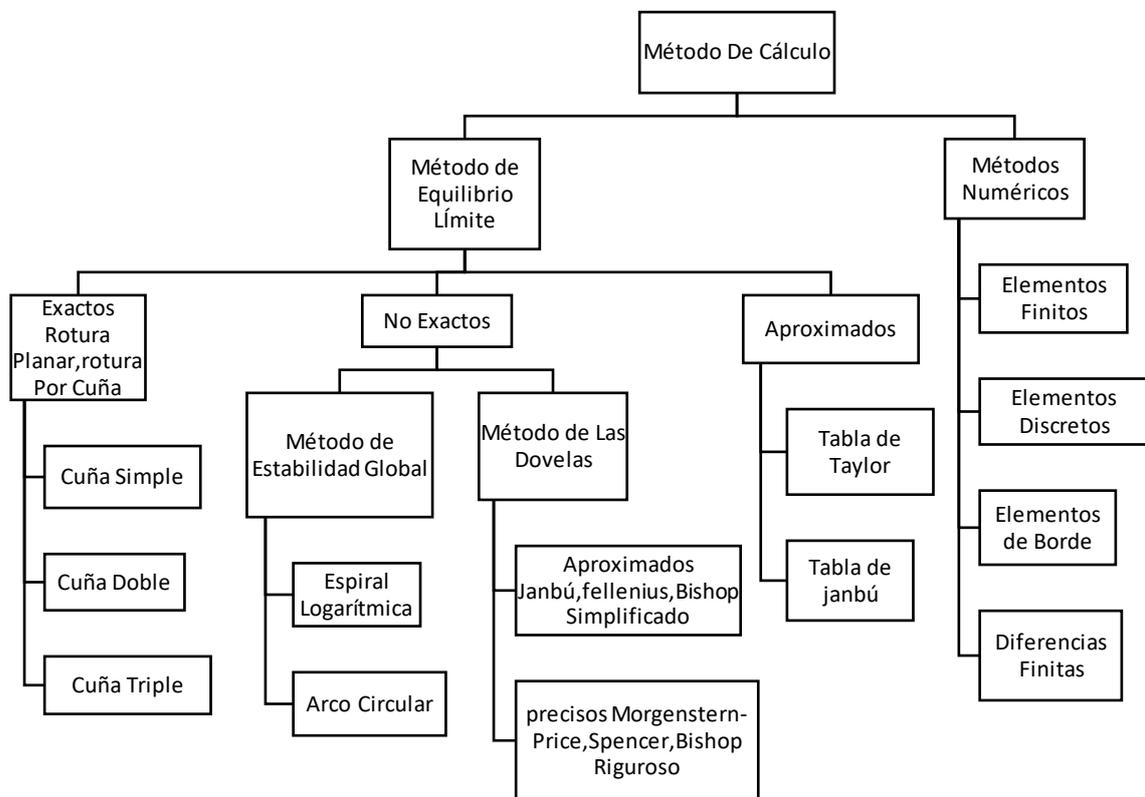


Figura 8. Métodos de análisis de estabilidad de taludes.

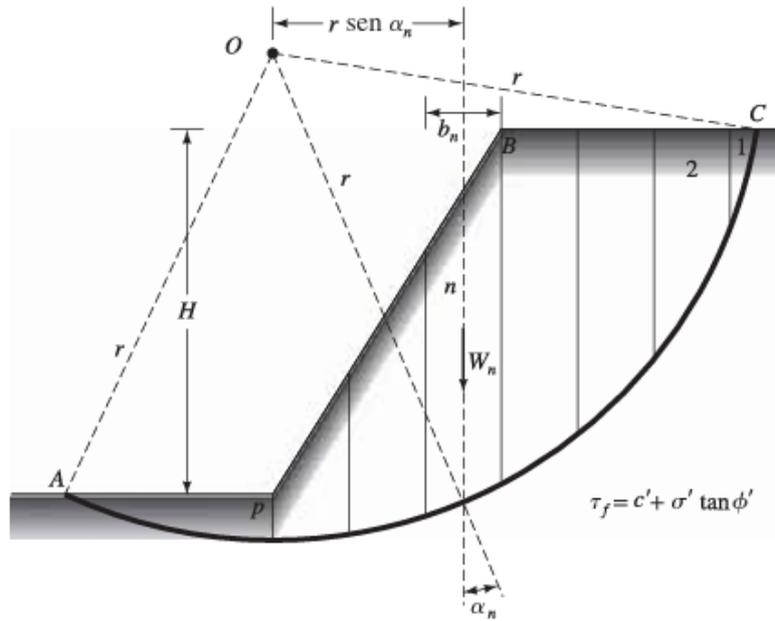
Fuente. Suárez, 2009.

### 2.2.7. Método de equilibrio límite

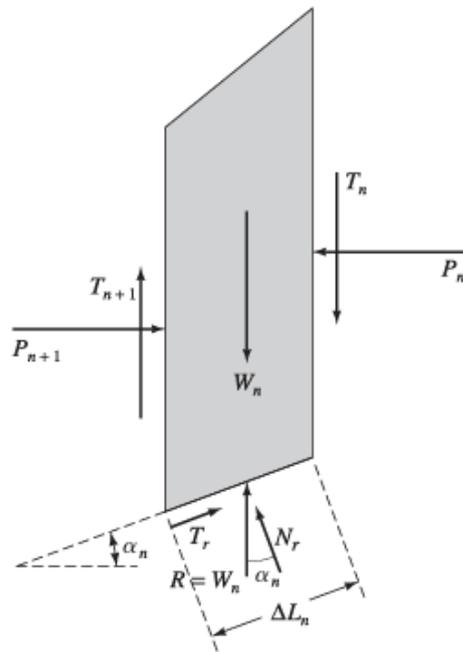
El análisis de equilibrio límite permite obtener el factor de seguridad o a través de un análisis regresivo, obtener el valor de la resistencia del esfuerzo cortante en el momento de la rotura. Un bloque deslizante está en condición de equilibrio límite, cuando las fuerzas actuantes son exactamente iguales a las fuerzas resistentes, el cual sería equivalente a un Factor de Seguridad de 1.0. (equilibrio). El análisis se puede realizar examinando directamente la superficie de falla o dividiendo la masa de deslizamiento rebanadas o dovelas. Los métodos de Bishop (1955) y Janbú (1954) han sido bastante utilizados en los últimos 50 años y se han desarrollado métodos de análisis más precisos y complejos como los de Morgenstern y Price (1965) y Spencer (1967), ayudados por programas de software que permiten realizar análisis muy rigurosos. Generalmente, los métodos son de iteración y cada uno de éstos posee un cierto grado de precisión (Suárez, 2009).

#### Método de dovelas:

El análisis de estabilidad utilizando el método de las dovelas o rebanadas puede ser explicado por referencia a la figura 10a, en la que AC es un arco de un círculo que representa la superficie de la prueba de falla. El suelo por encima de la superficie de la prueba de falla se divide en varias dovelas verticales. La anchura de cada una de éstas no necesita ser la misma. Considerando la longitud unitaria perpendicular a la sección transversal mostrada, las fuerzas que actúan sobre una porción típica (dovela  $n$ -ésima) se muestran en la figura 10b.  $W_n$  es el peso efectivo de la dovela. Las fuerzas  $N_r$  y  $T_r$  son las componentes normal y tangencial de la reacción R, respectivamente.  $P_n$  y  $P_{n+1}$  son las fuerzas normales que actúan sobre los lados de la dovela. Del mismo modo, las fuerzas de corte que actúan sobre los lados de la dovela son  $T_n$  y  $T_{n+1}$ . Por simplicidad, se supone que la presión de agua intersticial es 0. Las fuerzas  $P_n$ ,  $P_{n+1}$ ,  $T_n$  y  $T_{n+1}$  son difíciles de determinar. Sin embargo, podemos hacer una suposición aproximada de que las resultantes de  $P_n$  y  $T_n$  son iguales en magnitud a las resultantes de  $P_{n+1}$ , y  $T_{n+1}$ , y también que sus líneas de acción coinciden. Para la consideración de equilibrio, tenemos



(a)



(b)

Figura 9. Análisis de estabilidad por el método de dovelas: (a) superficie de prueba de falla; (b) fuerzas actuantes en la n-ésima dovela. (Braja Das, 2002).

Para la consideración de equilibrio, tenemos:

$$N_r = W_n \cos \alpha_n$$

La resistencia de la fuerza de corte se puede expresar como:

$$T_r = \tau_d(\Delta L_n) = \frac{\tau_f(\Delta L_n)}{FS_s} = \frac{1}{FS_s} [C' + \sigma' \tan \phi'] \Delta L_n \quad (2.1)$$

El esfuerzo efectivo normal,  $\sigma'$ , en la ecuación (2.1) es igual a

$$\frac{N_r}{\Delta L_n} = \frac{W_n \cos \alpha_n}{\Delta L_n}$$

Para el equilibrio de la cuña de ensayo ABC, el momento de la fuerza motriz sobre O es igual al momento de la fuerza de resistencia sobre O.

$$\sum_{n=1}^{n=p} W_n r \sin \alpha_n = \sum_{n=1}^{n=p} \frac{1}{FS_s} \left( C' + \frac{W_n \cos \alpha_n}{\Delta L_n} \tan \phi' \right) (\Delta L_n) (r)$$

Reduciendo la ecuación tenemos que

$$FS_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (C' \Delta L_n + W_n \cos \alpha_n \tan \phi')}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n} \quad (2.2)$$

Nota:  $\Delta L_n$  en la ecuación (2.2) es aproximadamente igual a  $(b_n) / (\cos \alpha_n)$ , donde  $b_n$  ancho de la dovela n-ésima.

Tabla 10. Métodos para analizar estabilidad de taludes.

Método	Superficie de falla	Equilibrio	Características
Bishop Simplificado (Bishop 1955)	Circulares	De momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo en número de incógnitas
Spencer 1967	Cualquier forma de superficie de falla	Momentos y Fuerzas	Establece el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida
Morgenstern Price	Cualquier forma de superficie de falla	Momentos y Fuerzas	El método es similar al método Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo a una función arbitraria.

Fuente: Suárez, 2009

**Métodos precisos o completos:** Cumplen con todas las ecuaciones de la estática.

**a) Método de Bishop simplificado (1955)**

Presentó un método utilizando dovelas y teniendo en cuenta el efecto de las fuerzas entre ellas, asume que las fuerzas entre rebanadas son horizontales, es decir, que no tiene en cuenta las fuerzas de cortante, Se establece el equilibrio de momentos de las fuerzas actuantes en cada rebanada respecto el centro del círculo, ignora las tensiones tangenciales entre rebanadas.

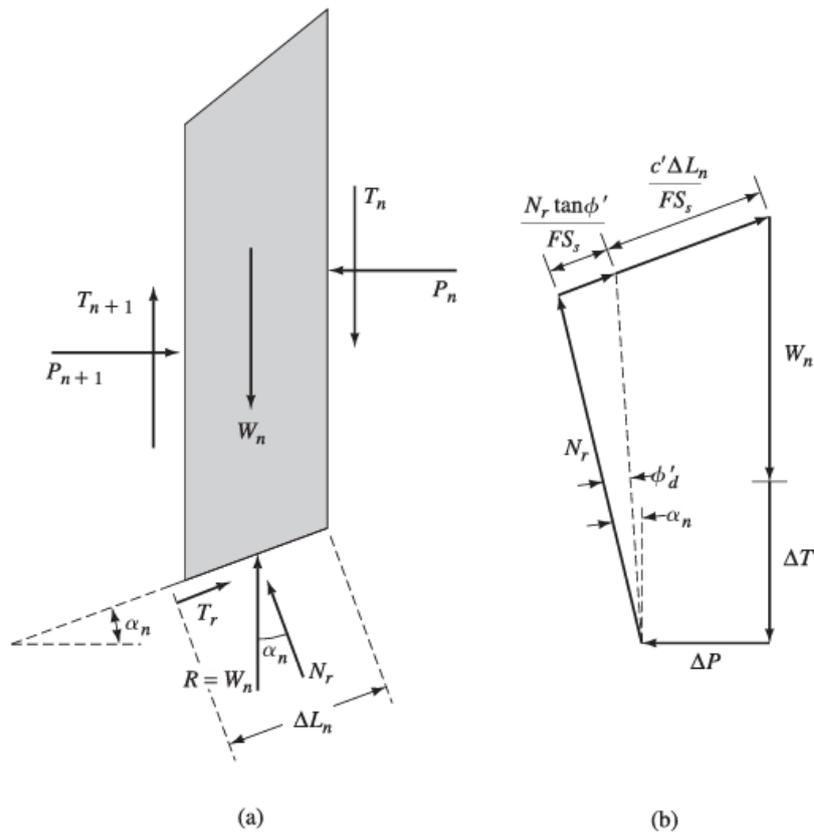


Figura 10. Dovelas de Bishop simplificado: (a) fuerzas actuantes sobre la n-ésima dovela; (b) polígono de fuerza para el equilibrio. Braja Das, 2002.

$$FS_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (cb_n + w_n \tan \phi + \Delta T \tan \phi) \frac{1}{m_{\alpha(n)}}}{\sum_{n=1}^{n=p} w_n \sin \alpha_n} \quad (2.3)$$

Donde:

$$m_{\alpha(n)} = \cos \alpha_n + \frac{\tan \phi * \sin \alpha_n}{FS_n} \quad (2.4)$$

### **b) Método de Spencer (1967)**

El método de Spencer considera la acción de las fuerzas internas entre dovelas, pero la suposición principal es que asume la existencia de una relación constante entre la magnitud de la fuerza cortante y la fuerza normal a la dovela. La fuerza Z indicada en la figura 12, se debe considerar como la resultante para la i-ésima dovela de las fuerzas internas, ésta se divide en sus componentes normal: E y cortante: X, de este modo se plantea que:

$$\tan \theta = \frac{X_L}{E_L} = \frac{X_R}{E_R}$$

El método de Spencer cumple todas las condiciones de equilibrio, fuerzas horizontales y verticales y sumatoria de momentos con respecto a un punto común.

### **c) Método de Morgenstern Price (1965)**

El método de Morgenstern – Price asume una función matemática arbitraria para describir la dirección de las fuerzas internas entre dovelas,

$$\alpha_i = \frac{X_i}{E_i} = \lambda \cdot f(x)$$

donde  $\lambda$  = una constante a ser evaluada en el desarrollo de la solución para el factor de seguridad,  $f(x)$  es llamada la función de variación de las fuerzas internas entre dovelas, con respecto a  $x$ . La figura 13 muestra funciones típicas utilizadas en el presente método. Como es de suponer para una función constante el método de Morgenstern – Price es el mismo que el método de Spencer.

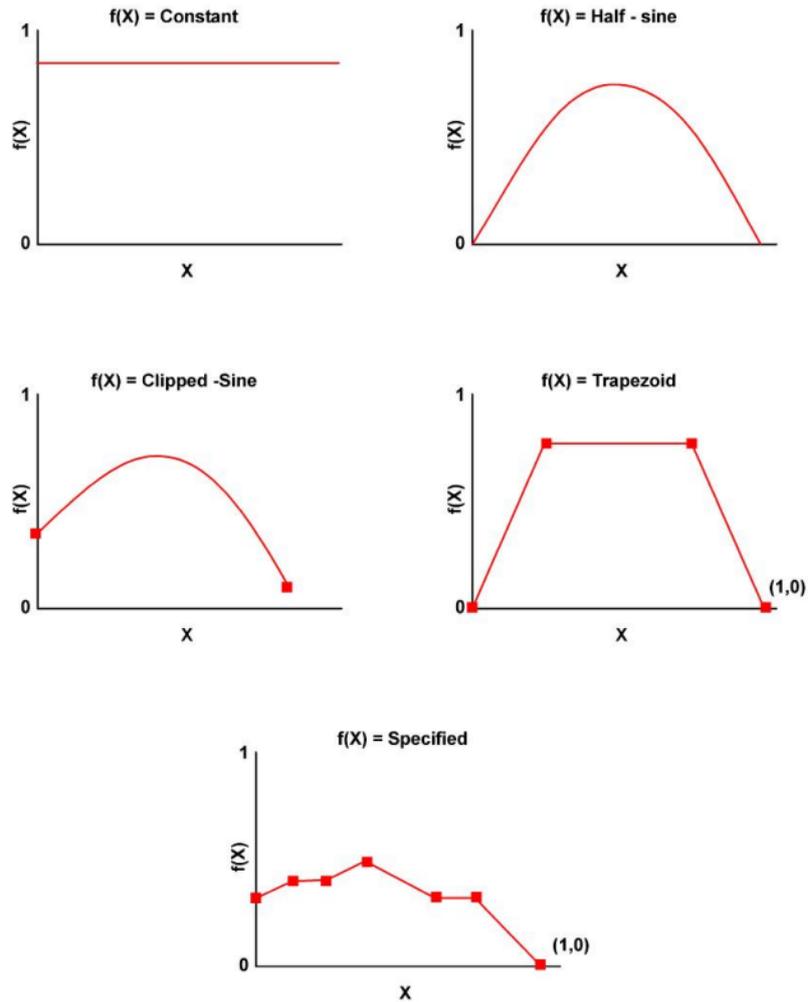


Figura 11. Gráficos utilizados por Morgenstern-Price

### 2.2.8. Factor de seguridad

Según Braja Das, 2002. El factor de seguridad contra la falla de un talud, es el valor resultante de dividir la resistencia al corte disponible del suelo, a lo largo de una superficie crítica de deslizamiento, por la resistencia al corte requerido para mantener el equilibrio (Bishop, 1955). En general el factor de seguridad se define como.

$$FS_s = \frac{\tau_f}{\tau_d} = \frac{\text{Resistencia al corte del suelo}}{\text{Resistencia al corte movilizado}}$$

Donde  $FS_s$  Factor de seguridad con respecto a la resistencia,  $\tau_f$  Resistencia cortante promedio del suelo y  $\tau_d$  Esfuerzo cortante promedio desarrollado a lo largo de la superficie

potencial de falla. La resistencia cortante de un suelo consta de dos componentes, la cohesión y la fricción, y se expresa como.

$$\tau_f = C + \sigma' \tan \phi$$

Dónde  $C$  cohesión,  $\phi$  Angulo de fricción,  $\sigma'$  esfuerzo normal efectivo sobre la superficie potencial de falla. De manera similar para  $\tau_d$  tenemos la siguiente expresión:

$$\tau_d = C_d + \sigma' \tan \phi_d$$

Donde  $C_d$  y  $\phi_d$  son, respectivamente, la cohesión efectiva y el ángulo de fricción que se desarrolla a lo largo de la superficie potencial de la falla.

Reemplazando  $\tau_f$  y  $\tau_d$  en  $FS_s$  tenemos.

$$FS_s = \frac{C + \sigma' \tan \phi}{C_d + \sigma' \tan \phi_d}$$

Se puede introducir algunos otros aspectos del factor de seguridad, es decir, el factor de seguridad con respecto a la cohesión  $FS_c$  y el factor de seguridad con respecto a la fricción  $FS_\phi$  y se define de la siguiente manera.

$$FS_c = \frac{C}{C_d}$$

$$FS_\phi = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_d}$$

Si se compara estas ecuaciones, se aprecia que cuando  $FS_c$  se vuelve igual a  $FS_\phi$  ese es el factor de seguridad con respecto a la resistencia.

$$\frac{C}{C_d} = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_d}$$

Entonces el factor de seguridad se puede interpretar de la siguiente manera:

$$FS_s = FS_c + FS_\phi$$

Cuando  $FS_s$  es igual a 1, el talud está en un estado de fallo inminente. En general, un valor de 1.5 para el factor de seguridad con respecto a la resistencia es aceptable para el diseño de un talud estable.

Tabla 11. Rangos de factores de seguridad para taludes

Factor de Seguridad	
Inestable	< 1.0
Estable relativo	1.0 - 1.3
Estable a corto plazo	1.3 - 1.5
Estable a largo plazo	> 1.5

Fuente: Hoek, 2007

### 2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

**Matriz rocosa:** Es el material rocoso exento de discontinuidades, o los bloques de “roca intacta” que quedan entre ellas. La matriz rocosa, a pesar de considerarse continua, presenta un comportamiento heterogéneo y anisótropo ligado a su fábrica y a su microestructura mineral (González de Vallejo, 2004).

**Macizo rocoso:** Es el conjunto de los bloques de matriz rocosa y de las discontinuidades de diverso tipo que afectan al medio rocoso. Mecánicamente los macizos rocosos son medios discontinuos, anisótropos y heterogéneos. Prácticamente puede considerarse que presentan una resistencia a la tracción nula (González de Vallejo, 2004).

**Criterio de falla:** relación de esfuerzo/deformación, derivada teórica o empíricamente, que caracteriza la ocurrencia de la ruptura de un material. (Terzaghi, 1962).

**Estabilidad:** Dícese de un área o parte de la corteza terrestre que no muestra ningún tipo de deformación ni signos de movimientos tectónicos a través de mucho tiempo geológico (Dávila, 2011).

**Talud:** Superficie artificial inclinada de un terreno que se forma al cortar una ladera (GEMMA, 2007).

**Factores condicionantes:** también llamados pasivos son aquellos que se relacionan con los factores geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos, además se consideran que son intrínsecos a los materiales naturales (González de vallejo,2004).

**Factores desencadenantes:** también llamados activos porque provocan la rotura cuando se cumple una serie de condiciones, se considera que son factores externos que actúan sobre los suelos o macizos rocosos cambiando las características, propiedades y condiciones de equilibrio del talud (González de vallejo,2004).

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

**Zonas críticas:** Se resaltan aquellas áreas o lugares, que luego del análisis de él o los peligros geológicos identificados, la vulnerabilidad a la que están expuestas (infraestructura y centros poblados), se los consideran con peligro potencial de generar desastres, y que necesitan que se realicen obras de prevención y/o mitigación (Zavala & Barrantes, 2009).

**Discontinuidades:** Son superficies de estratificación, laminación, juntas, fallas, que rompen la continuidad de las propiedades mecánicas de los bloques rocosos, confirmando al macizo un comportamiento Geomecánico e hidráulico discontinuo, condicionado por la naturaleza, frecuencia y orientación de dichos planos (González de Vallejo, 2004).

**Ángulo de Fricción ( $\phi$ ):** el ángulo de fricción es la representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual es un concepto básico de la física. El ángulo de fricción en suelos granulares secos coincide con el ángulo de reposo. Todos los suelos poseen fricción. Sin embargo, a los suelos arcillosos con fricción muy baja o despreciable, se les denomina suelos cohesivos:  $\phi = 0$ . (Suárez,2009).

**Cohesión:** Es la representación de la resistencia al cortante, producida por la unión o cementación entre partículas (Suárez, 2009).

**Dips v6:** Programa diseñado para el análisis interactivo de información geológica basada en su orientación. El programa es un conjunto de herramientas capaces de múltiples aplicaciones y está diseñado tanto para los principiantes, usuarios ocasionales y experimentados en el uso de la proyección estereográfica, quienes pueden utilizar las herramientas más avanzadas en el análisis de datos geológicos (Rocscience Inc, 2004).

**RocData:** Programa de computación que permite determinar los parámetros de resistencia del macizo rocoso, de acuerdo al criterio de rotura generalizado de Hoek-Brown (Rocscience Inc, 2004).

**Slide:** Programa de computación utilizado para análisis de equilibrio limite en estabilidad de taludes en suelos y rocas (Rocscience Inc, 2004).

## CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1. UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1.1. Geográfica

La carretera Ahijadero – Santa Rosa, se encuentra ubicado al NE de la ciudad de Bambamarca, en los cuadrángulos de Chota (14f) y Celendín (14g), con una altura promedio de 2258 m.s.n.m. las coordenadas UTM – Datum WGS-84, Zona – 17S (ver Tabla 12).

Tabla 12.Coordenadas UTM Sistema WGS 84

Ubicación	Kilómetro (Km)	Este	Norte	Cota (m.s.n.m)
Punto de inicio: Ahijadero	04+300	776533	9264530	2435
Punto final: Santa Rosa	13+800	782155	9270601	2081

#### 3.1.2. Política

La investigación se encuentra en el departamento de Cajamarca, Provincia de Hualgayoc, Distrito de Bambamarca y entre los centros poblados de Ahijadero y Santa Rosa (Plano 01).

#### 3.1.3. Accesibilidad

El acceso al área de investigación, es mediante la carretera asfaltada Cajamarca – Bambamarca, con un recorrido de 112 km y tiempo de 2 horas 50 minutos en camioneta, se continua a través de una carretera tipo trocha Bambamarca – Ahijadero - Santa Rosa, con un recorrido de 15.200 km y tiempo de 30 minutos. (Tabla 13 y Plano 02).

Tabla 13. Acceso para la investigación.

Tramo (Terrestre)	Estado de Vía	Distancia Km	Tiempo(hor)
Cajamarca - Bambamarca	Asfaltada	112	02:45
Bambamarca - Ahijadero	Trocha	4.2	00:15
Ahijadero - Santa Rosa	Trocha	13.8	00:45

### 3.1.4. Clima

La temperatura máxima y mínima es de 19 °C y 8 °C respectivamente, con precipitaciones desde octubre hasta abril, la línea roja y azul continua muestran la temperatura máxima y mínima respectivamente de un día por cada mes en Bambamarca. Los días calurosos y noches frías (líneas azules y rojas discontinuas) muestran el día más caliente y noche más fría de cada mes. (Meteoblue,2022).

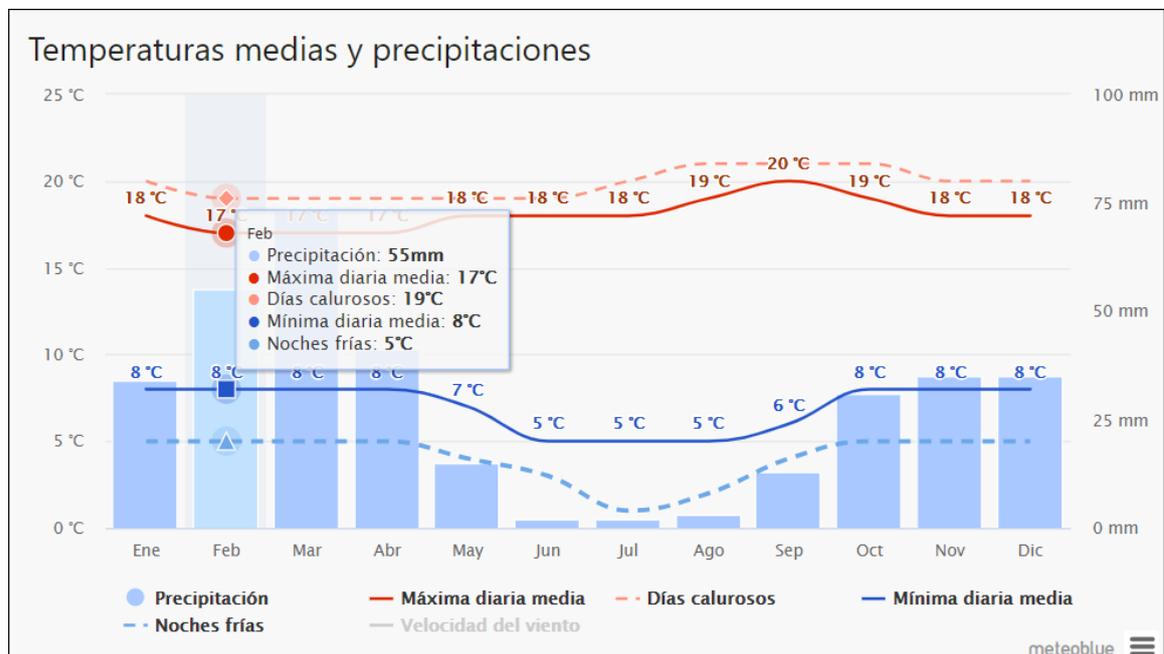


Figura 12. Precipitaciones máxima y mínima. Meteoblue, 2022.

## **3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **3.2.1. Tipo, nivel, diseño y método de investigación**

El tipo de investigación es descriptiva, analítica y explicativa; el nivel de investigación es científica debido a que se emplea marcos teóricos derivados de la ciencia, el diseño de la investigación es transversal o transaccional ya que recopila datos en un momento dado y tiempo único, el método es cualitativo usa y recolecta datos para probar la hipótesis.

### **3.2.2. Población de estudio**

Taludes de la carretera Ahijadero -Santa Rosa, entre los kilómetros 04+150 y 14+800.

### **3.2.3. Muestra**

Taludes críticos de la carretera Ahijadero-Santa Rosa, en los kilómetros 04+150 y 14+800.

### **3.2.4. Unidad de análisis**

Evaluación del comportamiento Geotécnico y las propiedades intrínsecas y extrínsecas de los taludes críticos de la carretera Ahijadero – Santa Rosa, entre los kilómetros 04+ 150 y 14+800.

## **3.3. DEFINICIÓN DE VARIABLES**

Variables independientes: sismicidad, precipitación, infiltración

Variable dependiente: Inestabilidad de taludes.

### 3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

#### 3.4.1. Técnicas

**Primera Fase:** Consiste en planificar, revisar información en libros, artículos, investigaciones anteriores sobre inestabilidad de taludes especialmente en macizos rocosos, aplicando el método de equilibrio limite y la rotura de Hoek Brown modificado.

**Segunda Fase:** En esta fase, la cual es netamente de campo, comprende la toma de datos Geológicos y Geomecánicos del macizo rocoso, con la información obtenida procedemos a procesarla mediante los softwares como: SAS Planet, ArcGIS 10.5, Rock Lab 5, Dips 7, Slide V7.0. y AutoCAD 2021

**Tercera Fase:** Con la información que se obtuvo en campo, procedemos a procesarla e interpretarla mediante el método de equilibrio limite y con la rotura de Hoek & Brown Generalizado, el cual nos sirve para determinar los factores de seguridad de cada talud aplicando el método de dovelas de Morgenstern-Price, Spencer y Bishop Modificado.

**Cuarta Fase:** Es la suma de las tres fases anteriores, en la cual se llega a la interpretación y análisis de resultados y a la culminación de la tesis.

#### 3.4.2. Instrumentos y Equipos

- ✓ Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Permite determinar la posición de los diferentes puntos de control.
- ✓ Martillo de Geólogo. sirve para estimar la resistencia a la compresión uniaxial de macizos rocoso (RCU).
- ✓ Protactor. Para determinar la escala de trabajo.
- ✓ Cámara fotográfica Canon de 18x. para capturar fotografías y luego procesarlas.
- ✓ Laptop Dell Corel i5. para realizar toda la investigación.
- ✓ Flexómetro de 15m. Utilizado para realizar mediciones en cada punto.
- ✓ Ácido clorhídrico al 10%. Para diferenciar rocas carbonatadas.
- ✓ Brújula Brunton. Sirve para tomar datos estructurales y geotécnicos del macizo rocoso.
- ✓ Lápiz de dureza. Se utiliza para estimar la dureza de las rocas y minerales.
- ✓ Lupa 20x. Para determinar minerales que forman las rocas.

- ✓ Libreta de campo. Usado para anotar todos los datos tomados en campo.
- ✓ Matriz Geotécnica. para evaluar la caracterización del macizo en campo.

### **3.4.3. Software´s**

ArcGIS 10.5, Dips v.6, Roc Data v.4, Slide v.6 y AutoCAD 2021

## **3.5. PROCEDIMIENTO.**

### **3.5.1. Etapa inicial**

Esta etapa consiste en la recolección de datos bibliográficos existentes relacionadas al tema de investigación, se realizó la evaluación de imágenes satelitales para un mejor estudio del área, con la data de las cartas geológicas de chota(14f) y Celendín(14g) elaboradas por el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), Se elaboraron los planos preliminares de Ubicación, Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y Geológico.

### **3.5.2. Etapa de campo**

Se realizó el cartografiado geológico y la caracterización de los macizos rocosos de los taludes críticos de la carretera Ahijadero – Santa Rosa, a escala 1:25000, estos datos recolectados (litología, estructuras, discontinuidades) nos ayudaran para obtener una buena data geotécnica al momento de procesarlos en los software´s para determinar los factores de seguridad en los distintos escenarios planteados.

### **3.5.3. Etapa final**

Con la información obtenida en las etapas anteriores, se procesó e interpretó los datos utilizando software´s como: SAS Planet (descargar la imagen satelital), ArcGIS 10.5(elaboración de planos), Rock Data v.4(Parámetros de resistencia del macizo rocoso), Dips v.6(Análisis cinemático de las rocas), Slide v.6(Análisis de equilibrio limite en taludes). AutoCAD 2018(Elaboración de perfil del talud), por último, se elaboró todos los planos temáticos para esta investigación.

### 3.6. GEOMORFOLOGÍA

Las unidades Geomorfológicas presentes en la zona de investigación están conformadas por planicies de 0°-8°, lomadas 8°-25°, laderas 25°-50° y escarpas de 50° a más, para determinar estas unidades se tiene en cuenta la altura y pendiente considerado en la clasificación de Rodríguez,2016.

#### 3.6.1. Planicies

Se aprecia en la imagen leves ondulaciones, esta geofoma se caracterizan por presentar rangos de pendientes de 0° a 8° en el cual su forma es muy homogénea producto de la erosión y transporte fuerte que ha sufrido el terreno a lo largo del tiempo, en el área de estudio se presenta gran cantidad de planicies en las orillas del río Llaucano y en sus alrededores conformado por depósitos fluvio-aluviales, los cuales son generalmente aprovechados para la agricultura.



Foto 1. Planicie ubicada al NE del Río Llaucano.  
Coordenadas: E 781893, N 9270589, Cota 2045 m.s.n.m.

### 3.6.2. Lomadas

Superficies con elevaciones y pendientes suaves que oscilan entre  $8^{\circ}$  y  $20^{\circ}$ , presentan una morfología heterogénea, están distribuidas en gran parte del área generalmente en los flancos del río Llaucano ha ido tomando esa forma producto de la erosión y denudación del relieve, generando la forma redondeada que caracterizan a esta unidad geomorfológica, al igual que las planicies es utilizado para la ganadería y agricultura. Estas geoformas están presentes en el flanco izquierdo del río Llaucano.



Foto 2. Lomada ubicada al NE del Río Llaucano.  
Coordenadas: E 781998, N 9270642, Cota 2060 m.s.n.m.

### 3.6.3. Laderas

superficies con inclinaciones moderadas, caracterizadas por presentar rangos de pendientes que oscilan entre  $20^{\circ}$  a  $50^{\circ}$ , ocupan gran parte del área de investigación, estas geoformas se presentan producto de la erosión y meteorización fuerte de la roca que posteriormente se ha denudado el material fracturado generando así estos relieves.

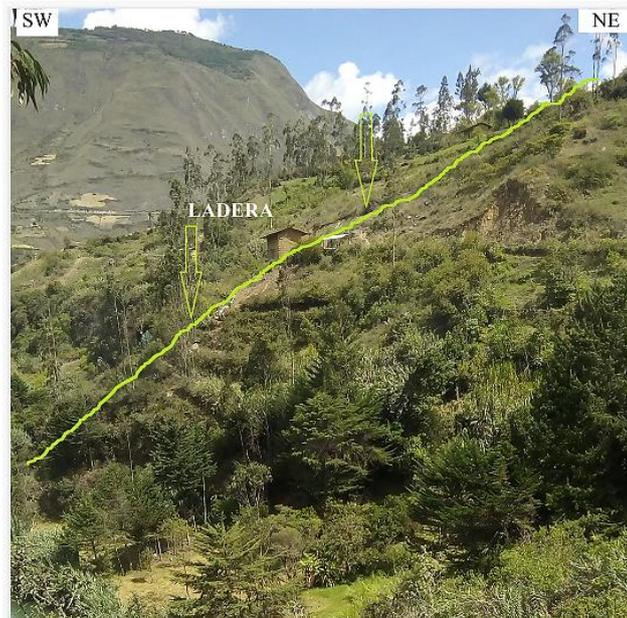


Foto 3. Ladera ubicada al NE del Río Llaucano.  
Coordenadas: E 782000, N 9270742, Cota 2070 m.s.n.m

#### 3.6.4. Escarpas

Pendientes muy pronunciadas, caracterizadas por presentar ángulos mayores a  $50^\circ$ . Este tipo de unidad geomorfológica genera zonas críticas por la gran altura y roca bastante fracturada a lo largo de la carretera.



Foto 4. Escarpa al margen izquierdo del Río Llaucano.  
Coordenadas: E 780460, N 9269220, Cota 2395m.s.n.m.

### 3.7. GEOLOGÍA LOCAL

#### 3.7.1. Grupo Goyllarisquizga (Ki-g)

##### 3.7.1.1. Formación Chimú (Ki-chi)

Esta Formación litológicamente está constituida por arenisca cuarzosa gris amarillento de grano medio con espesores de 0.20 a 0.25 m, presentan capas de carbón con espesor de 0.12m, esta Formación se caracteriza por presentar horizontes de carbón concordante con la estratificación que es utilizado y aprovechado como un recurso mineral no metálico.

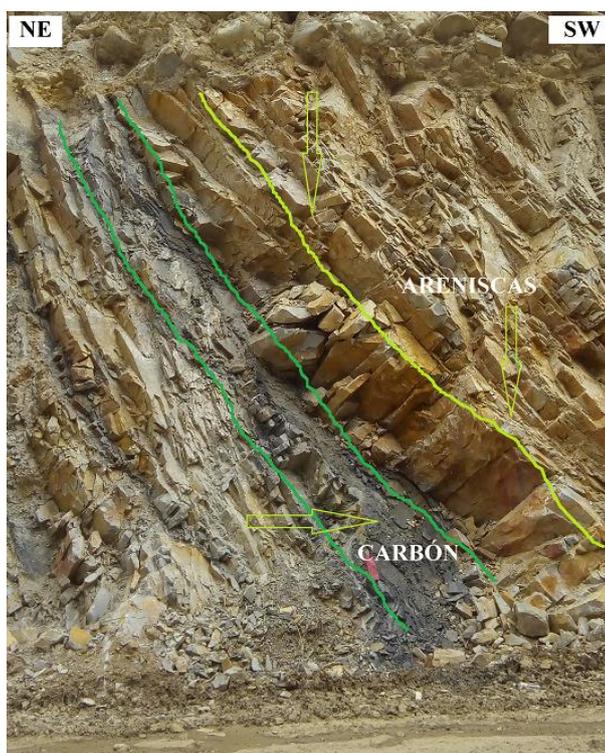


Foto 5. Areniscas y estratos de carbón en la Fm. Chimú.  
Coordenadas: E 781616, N 9270223, Cota 2073 m.s.n.m

##### 3.7.1.2. Formación Santa (Ki-sa)

Esta Formación no aflora en la zona de investigación, por ello se considera como indiviso, de acuerdo al boletín 31 litológicamente está formado por intercalación de lutitas, calizas margosas y areniscas gris oscuras, con un grosor que oscila entre los 100 y 150 m, suprayace a la Formación Chimú e infrayace a la Formación Carhuaz.

### 3.7.1.3. Formación Carhuaz (Ki-ca)

Formada por areniscas cuarzosas blancas con espesor de estratos de un metro, presentan intercalaciones con lutitas Grises, patinas de óxidos de hierro. Esta Formación yace sobre la formación Santa la cual no se ha podido identificar porque supone que está cubierta por depósitos cuaternarios e infrayace concordante a la Formación Farrat, tiene un grosor aproximado de 500m.

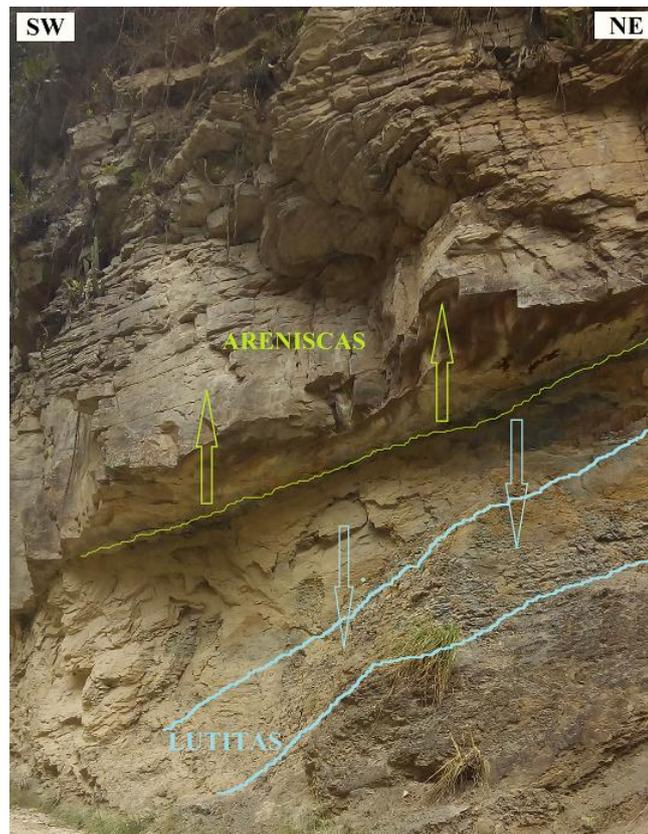


Foto 6. Areniscas y lutitas en la Fm. Carhuaz.  
Coordenadas: E 780690, N 9269562, Cota 2395m.s.n.m

### 3.7.1.4. Formación Farrat(ki-f)

Esta Formación representa el nivel superior de las rocas clásticas del Cretácico Inferior. Litológicamente está formada por areniscas cuarzosas de grano fino con coloraciones blanquecinas con estratos subhorizontales de 1 metro, grosor de aproximadamente de 500 m, posee coloraciones superficiales rojizas y negras producto de los óxidos de hierro, presenta leve meteorización.

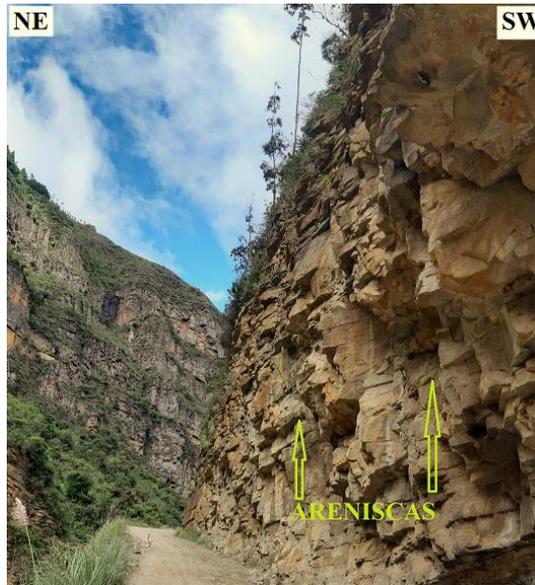


Foto 7. Afloramiento de Areniscas en la Fm. Farrat.  
Coordenadas: E 779740, N 9267843, Cota 2438 m.s.n.m.

### 3.7.2. Grupo Crisnejas

#### 3.7.2.1. Formación Chúlec (Ki-ch)

Constituido por calizas arenosas, lutitas calcáreas y margas, las que por intemperismo adquieren un color amarillento. Sus grosores varían de 200 a 250 m.



Foto 8. Afloramiento de Calizas en la Fm. Chúlec.  
Coordenadas: E777053, N 9265509, Cota 2403 m.s.n.m.

### 3.7.3. Grupo Pulluicana (Ks-p)

Litológicamente formada por calizas grises por intemperismo adoptan coloraciones blancas, presentan estratos subverticales de 0.5 a 1 metros, se encuentran levemente meteorizado, Tiene un grosor aproximado de 700 m.



Foto 9. Afloramiento de calizas del Gp. Pulluicana.  
Coordenadas: E 777432, N 9265829, Cota 2420 m.s.n.m.

### 3.7.4. Formación Cajamarca (Ks-Ca)

Constituida por calizas de textura fina muy maciza con coloración gris y crema, presentan estratificación subvertical bastante pronunciadas con estratos de 0.5 metros.



Foto 10. Caliza de la Fm. Cajamarca.  
Coordenadas: E 776965, N 9264749, Cota 2433 m.s.n.m.

### 3.7.5. Depósitos aluviales (Qh-al)

Se ubican al margen derecho e izquierdo del río Llaucano, constituido por bloques de gravas y guijarros angulosos a subangulosos en matriz areno-limoso que han sufrido poco transporte.



Foto 11. Depósitos Aluviales con matriz areno-limoso.  
Coordenadas: E 778851, N 9266834, Cota 2175 m.s.n.m.

### 3.7.6. Depósitos fluviales (Qh-fl)

Están constituidos por sedimentos redondeados a subredondeados que se van acumulando a lo largo de la sección del río Llaucano, los mismos que han sufrido transporte.

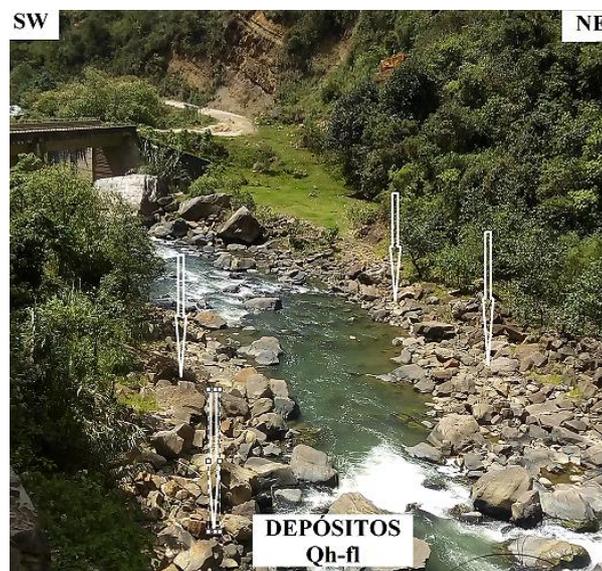


Foto 12. Depósitos Fluviales en el río Llaucano.  
Coordenadas: E 779715, N 9265230, Cota 2345 m.s.n.m.

### 3.8. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

#### 3.8.1. Falla de Rumbo

Fallas con movimiento horario (dextral) o antihorario (sinistral), el bloque B tiene un movimiento horario con respecto al bloque A, por lo tanto, es una falla dextral.

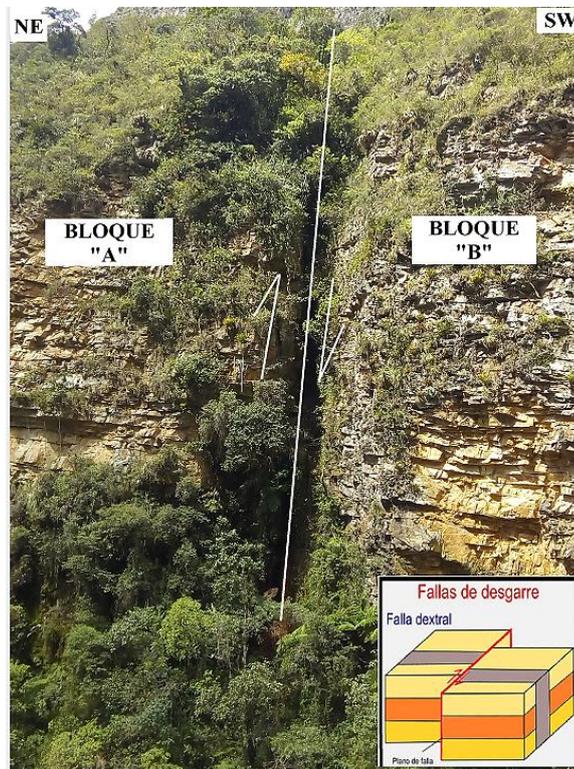


Foto 13. Falla dextral margen derecha del río Llaucano.  
Coordenadas: E 779845, N 9267865, Cota 2430m.s.n.m.

#### 3.8.2. Diaclasas

Son planos de discontinuidades que se presentan en los taludes de la carretera Ahijadero-Santa Rosa, se ha tomado datos estructurales de tres familias de diaclasas, los mismos que generan roturas tipo planar y cuña principalmente.

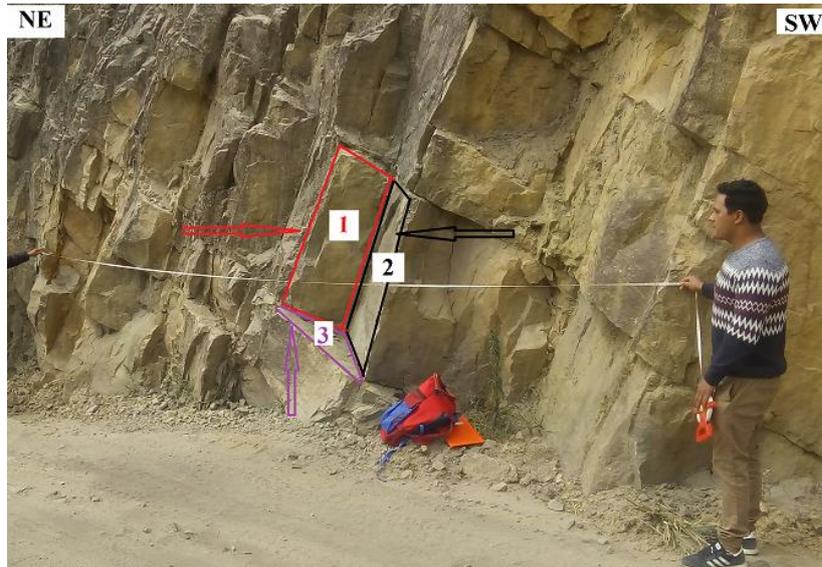


Foto 14. Familia de discontinuidades en la Fm. Chimú.  
 Coordenadas: E 781932, N 9270434, Cota 2069 m.s.n.m.

### 3.9. ESTUDIO GEOTÉCNICO

Para el análisis de la estabilidad de los taludes críticos de la carretera Ahijadero-Santa Rosa, los factores de seguridad se calculó con el software Slide v.6.0 en cinco escenarios probabilísticos utilizando método de Equilibrio Límite de Bishop Simplificado, Spencer y LE/Morgenstern- Price, evalúan tipo de rotura no circular. El cálculo se elaboró en cinco escenarios probabilísticos (ver Tabla 14).

Tabla 14. Escenarios probabilísticos para análisis de taludes.

Análisis	Escenario	Gravedad $m/s^2$	Kh	Kv	Nivel Freático	Descripción
1	Natural	9.81	0	0	Ausente	Condiciones drenadas (Tensiones Totales)
2	Saturación Parcial	9.81	0	0	Altura media del material crítico	Condiciones de lluvias (Tensiones Totales y Tensiones Efectivas)
3	Saturación Total	9.81	0	0	Superficie del terreno	Lluvias intensas (Tensiones Efectivas)
4	Sismicidad Máxima	9.81	0.125	0.063	Ausente	Máximas aceleraciones sísmicas en la zona
5	Sismicidad Máxima y Saturación Parcial	9.81	0.125	0.063	Altura media del material crítico	Combinación de las condiciones 2 y 4

Para definir las condiciones sísmicas se consideró la Norma Técnica E.030 Diseño Sismo-resistente del Reglamento Nacional de Edificaciones (2006), con su modificatoria con Decreto Supremo N° 003-2016-Vivienda publicada por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2016).

The screenshot shows the 'Parametri sismici OPCM' window with the following settings:

- Zona Sismica: 2
- Accelerazione massima / g: 0.25
- Coefficiente amplificazione topografica: 1
- Categoria profilo stratigrafico: A
- Coefficiente di intensità sismico oriz. (Kh): 0.125
- Coefficiente di intensità sismico vert. (Kv): 0.063
- Acción sísmica: O.P.C.M.3274
- Calculo coeficientes sismic: [Refresh icon]
- Aceleración máxima (ag/g): 0.25
- Coefficientes sísmicos:
  - Coefficiente intensidad sísmica terreno (Khk): 0.125
  - Coefficiente intensidad sísmica estructura (Khi): 0.063
- Efecto sísmico según: Ningún efecto sísmico

Buttons at the bottom: Calcola, Ok, Annulla, ?

Figura 13. Cálculo del coeficiente sísmico horizontal y vertical, mediante el Software LOADCAP de Geostru.

### 3.9.1. TALUD O1

Ubicado entre el Km 13+730-Km 13+780, de acuerdo a la secuencia estratigráfica se encuentra en la Formación Chimú (Ki-ch), constituida por arenisca cuarzosa amarillentas poco meteorizadas de grano medio con espesores de 0.50 m, presentan tres familias de discontinuidades que generan rotura tipo cuña, las constantes precipitaciones y detonaciones de laboreo artesanal de explotación de carbón lo convierten en un talud crítico.

Tabla 15. Talud 01-Coordenadas, orientación y geometría del talud.

DATUM		ZONA	COORDENADAS		COTA
WGS - 84		17 S	ESTE	NORTE	2069 m.s.n.m
			781889	9270443	
ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES			GEOMETRÍA DEL TALUD		
TIPO	DIP	DIP DIRECTION	ALTURA	15m	
ESTRATO	30	265	PIE	8 m	
FAMILIA 1	80	10	D	80	
FAMILIA 2	85	120	DD	340	

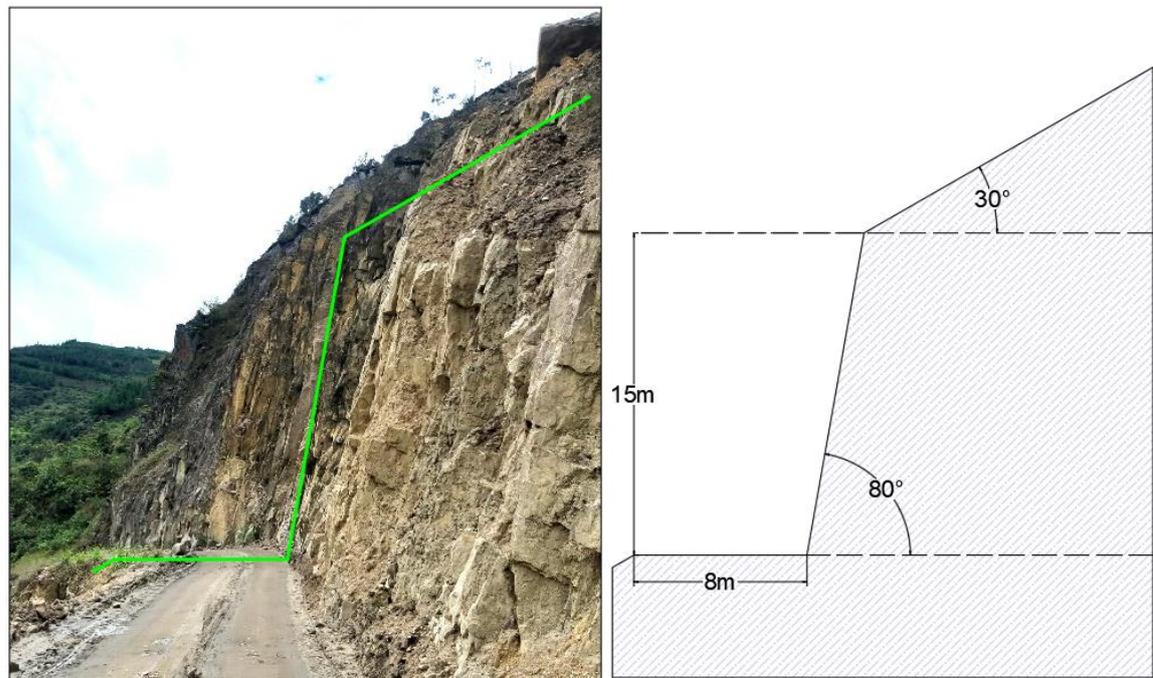


Figura 14. Talud 01-afloramiento de arenisca en la Fm Chimú y perfil del talud.

Tabla 16. Talud 01-Valores del macizo rocoso.

VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO (RMR)							
PARÁMETRO	RANGO DE VALORES Y VALORACIONES					Val	
<b>Resistencia a compresión uniaxial (Mpa)</b>	> 250 (15)	250 – 100 (12)	100 – 50 (7)	50 – 25 (4)	< 25 (2) < 5 (1) < 1(0)	7	
<b>RQD (%)</b>	90 – 100 (20)	75 – 90 (17)	50 – 75 (13)	25 – 50 (8)	< 25 (3)	13	
<b>Espaciamiento</b>	> 2 m (20)	0.6 – 2 m (15)	0.2 – 0.6 m (10)	0.06 – 0.2 m (8)	< 0.06 m (5)	10	
<b>Condición de las Juntas</b>	<b>Persistencia</b>	< 1m (6)	1 – 3 m (4)	3 – 10 m (2)	10 – 20 m (1)	> 20 m (0)	2
	<b>Abertura</b>	Cerrada (6)	< 0.01 mm (5)	0.1 – 1.0 mm (4)	1 – 5 mm (1)	> 5mm (0)	5
	<b>Rugosidad</b>	Muy Rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Lisa (1)	Suave (0)	3
	<b>Relleno</b>	Ninguno (6)	Duro < 5 mm (4)	Duro > 5 mm (2)	Suave < 5 mm (1)	Suave > 5 mm (0)	4
	<b>Alteración</b>	Sana (6)	Lig. Alt (5)	Moder. Alt. (3)	Muy Alterada (1)	Descompuesta (0)	3
<b>AGUA SUBTERRANEA</b>	Seco (15)	Ligeramente Húmedo (10)	Húmedo (7)	Goteando (4)	Agua Fluyendo (0)	10	
<b>VALOR TOTAL RMR</b>						<b>57</b>	

Hallamos el RQD con la fórmula de Priest y Hudson (1976) con los valores determinado en campo (ver Tabla 17).

Tabla 17. Talud 01-Cálculo del RQD.

CÁLCULO DEL RQD				
$RQD = 100e^{-0.1\gamma(0.1\gamma+1)}$	ND	L(m)	$\lambda$	RQD
	30	2	15	55.78

Para calcular el GSI de Hoek (2014), se reemplaza en la fórmula de la Tabla 18, la cual está en función del RMR de Bieniawski (1989).

Tabla 18. Talud 01-Cálculo del GSI.

CÁLCULO DEL GSI		
$GSI = RMR_{89} - 5$	RMR	GSI
	57	52

Las propiedades Geomecánicas como los parámetros de entrada y de salida se indican en la Tabla 19 y Figura 15, la Cinemática de las discontinuidades se indican en las Figuras 16 - 17, por ultimo los factores de seguridad de los escenarios probabilísticos planteados se indican en las Figuras 18-22.

Tabla 19. Talud 01-Propiedades Geomecánicas Fm. Chimú.

PROPIEDADES GEOMECAÑICAS DE LA FORMACIÓN CHIMÚ					
PARÁMETROS DE ENTRADA (Clasificación de Hook—Brown)			PARÁMETROS DE SALIDA		
Sigci ( $\sigma$ )	80 Mpa	CRITERIO DE HOOK-BROWN	mb	0.742	
GSI	43		s	0.0003	
Mi	17		a	0.509	
D	0.7	PARAMETROS DE MOHR-COULOMB EQUIVALENTES	c	0.227	Mpa
Ei	22000 Mpa		$\phi$	55.44°	
MR	275	PÁRAMETROS DEL MACIZO ROCOSO	sigt	-0.028	Mpa
			sigc	1.191	Mpa
			sigcm	8.834	Mpa
			Erm	1524.77	Mpa

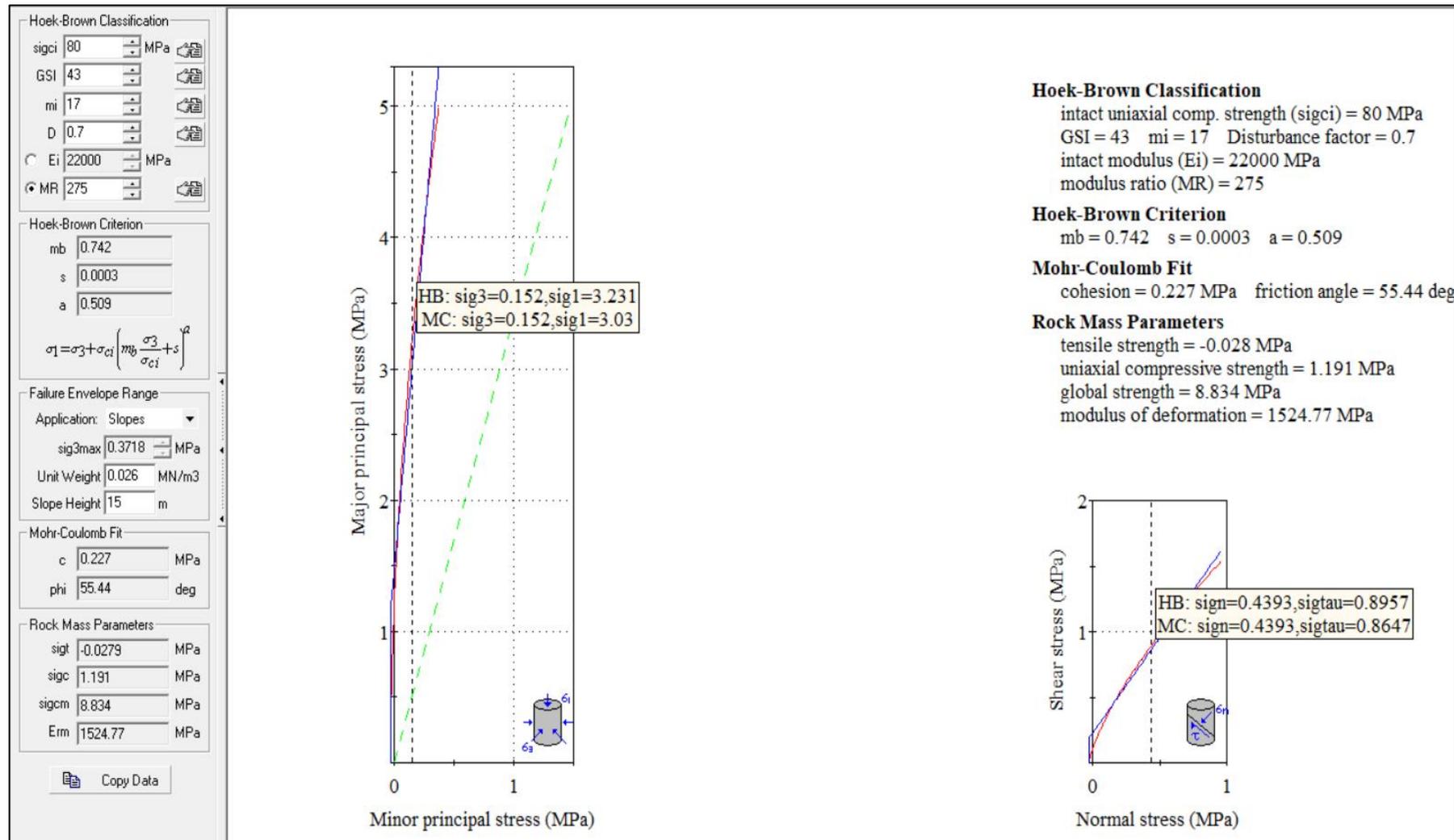


Figura 15. Talud 01-Propiedades Geomecánicas de Arenas en la Fm. Chimú.

Rotura en cuña. Primera condición, las intercepciones de la familia 1 y la familia 2 caen dentro del ángulo de fricción interna; segunda condición, el buzamiento de la intersección de las discontinuidades ( $\psi_i$ ) es mayor que el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) y menor que el buzamiento del talud ( $\psi_f$ ), cumpliéndose la siguiente desigualdad.  $\phi < \psi_i < \psi_f$ .

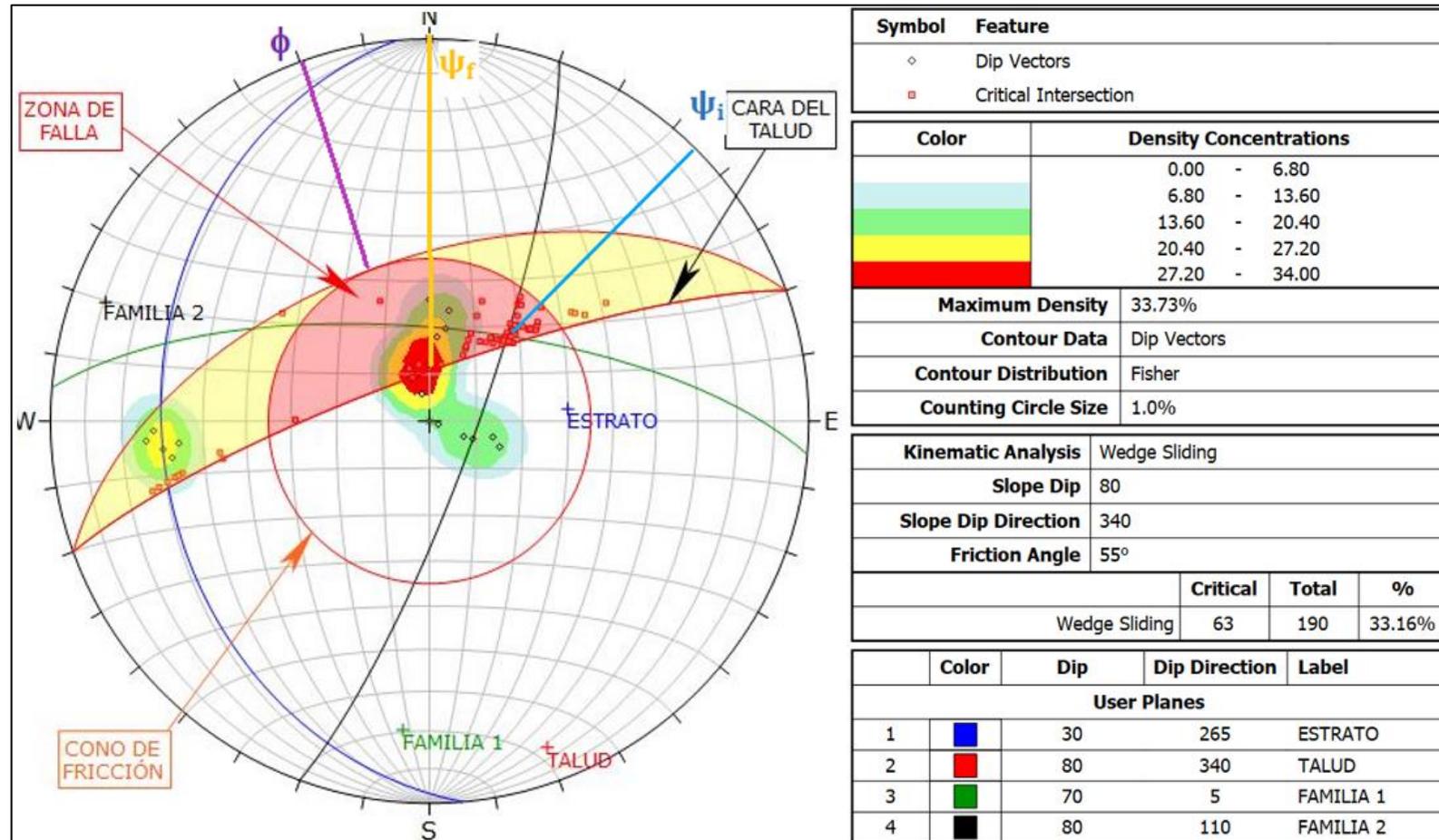


Figura 16. Talud 01-Análisis Cinemático, indican probabilidad de rotura tipo cuña.

Rotura planar. Primera condición, el buzamiento de la familia 1 ( $\psi_p$ ) es menor al buzamiento del talud ( $\psi_f$ ); Segunda condición, el buzamiento de la familia 1 ( $\psi_p$ ) es mayor que el ángulo de fricción interna ( $\phi_p$ ).

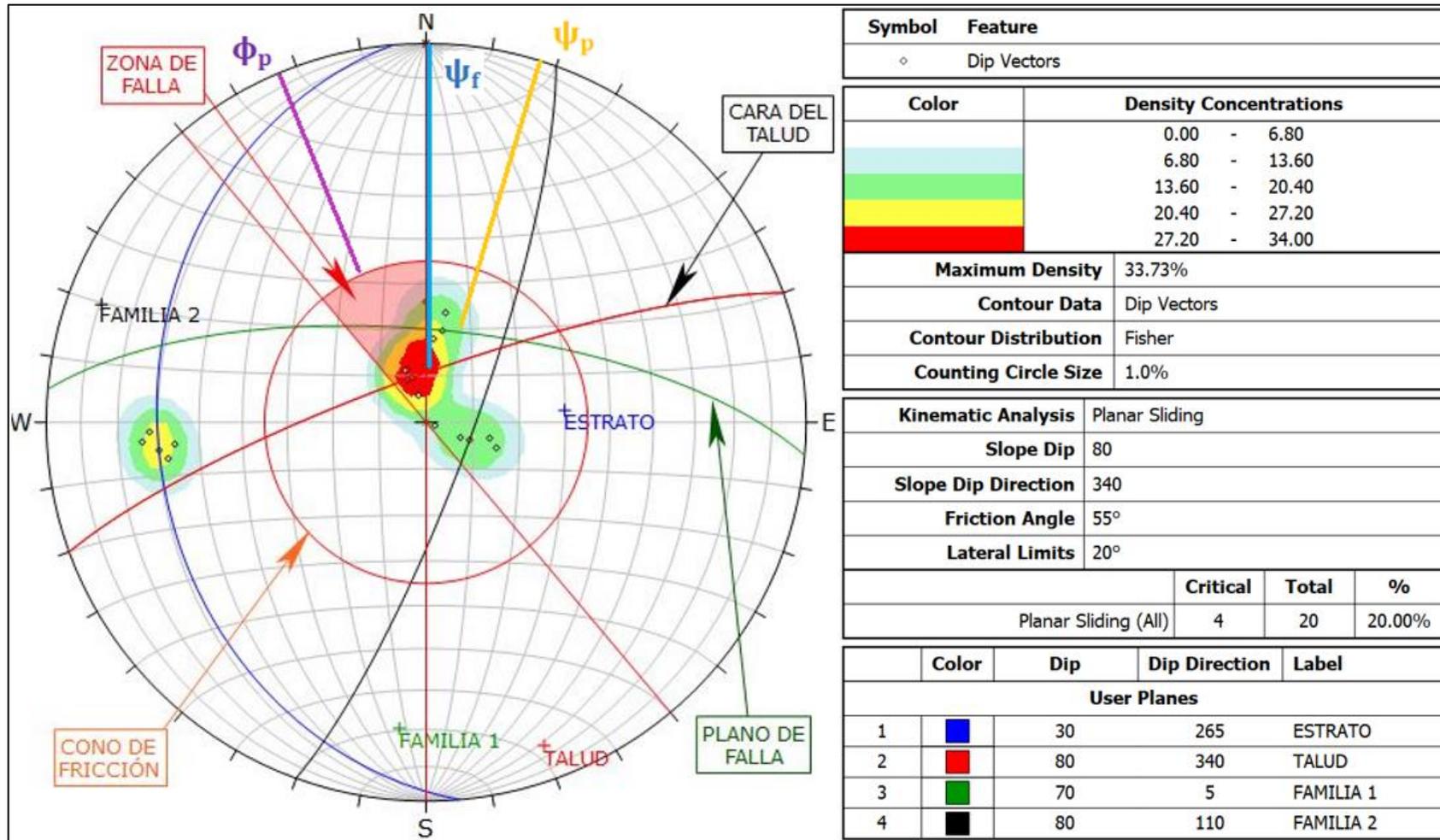


Figura 17. Talud 01-Análisis Cinemático, indican probabilidad de rotura planar.

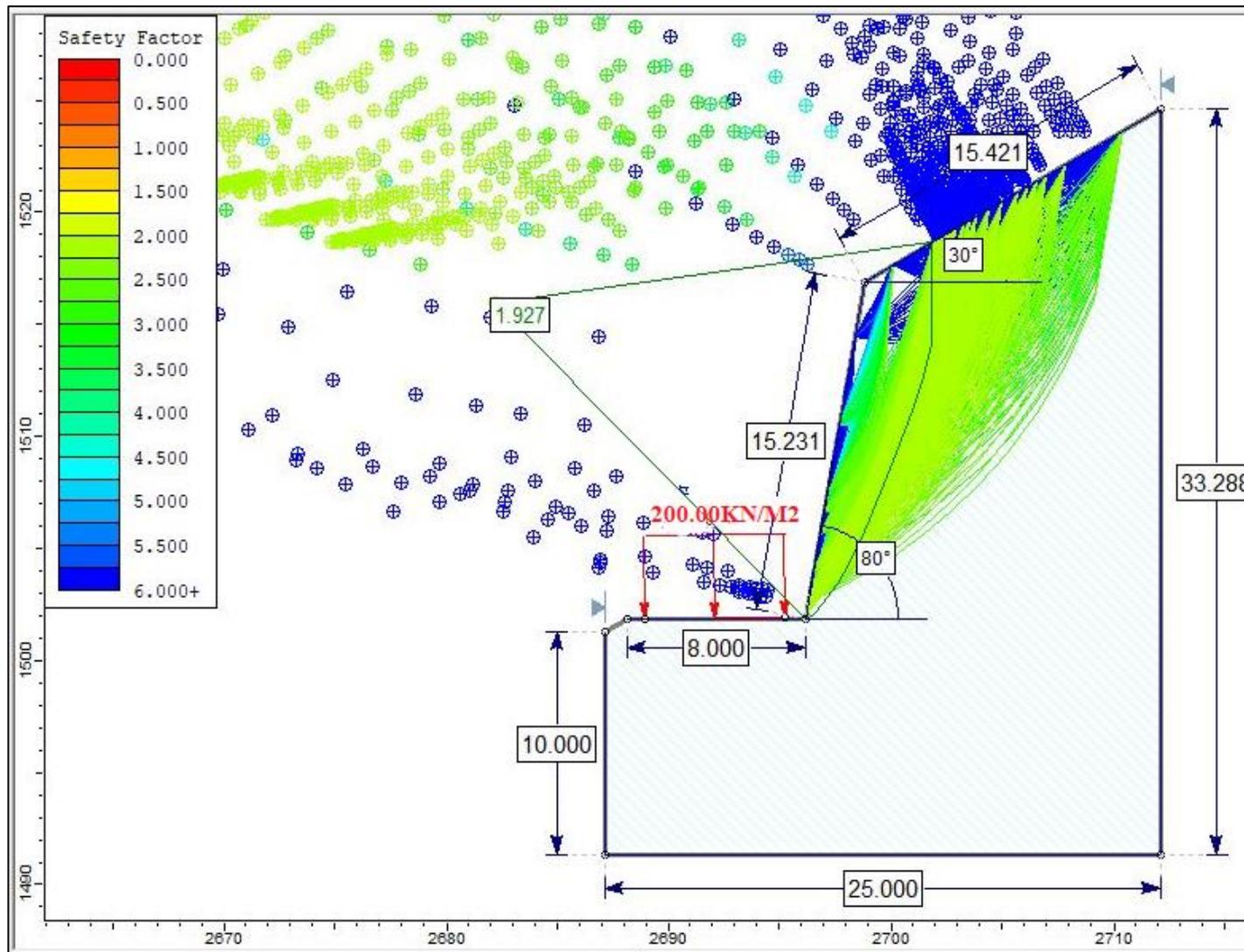


Figura 18. Talud 01-Análisis Slide en condiciones naturales.

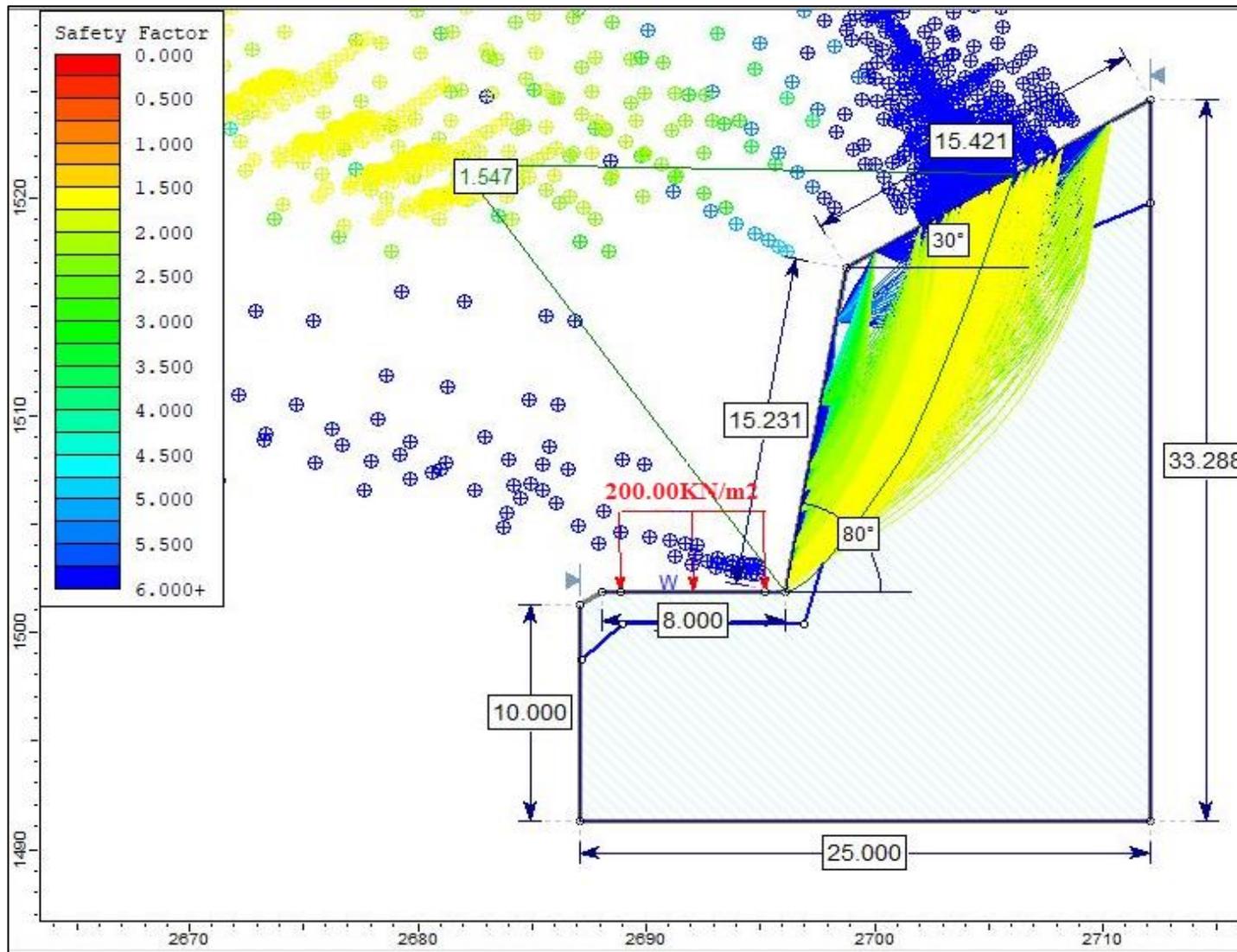


Figura 19. Talud 01-Análisis Slide en condiciones de saturación parcial.

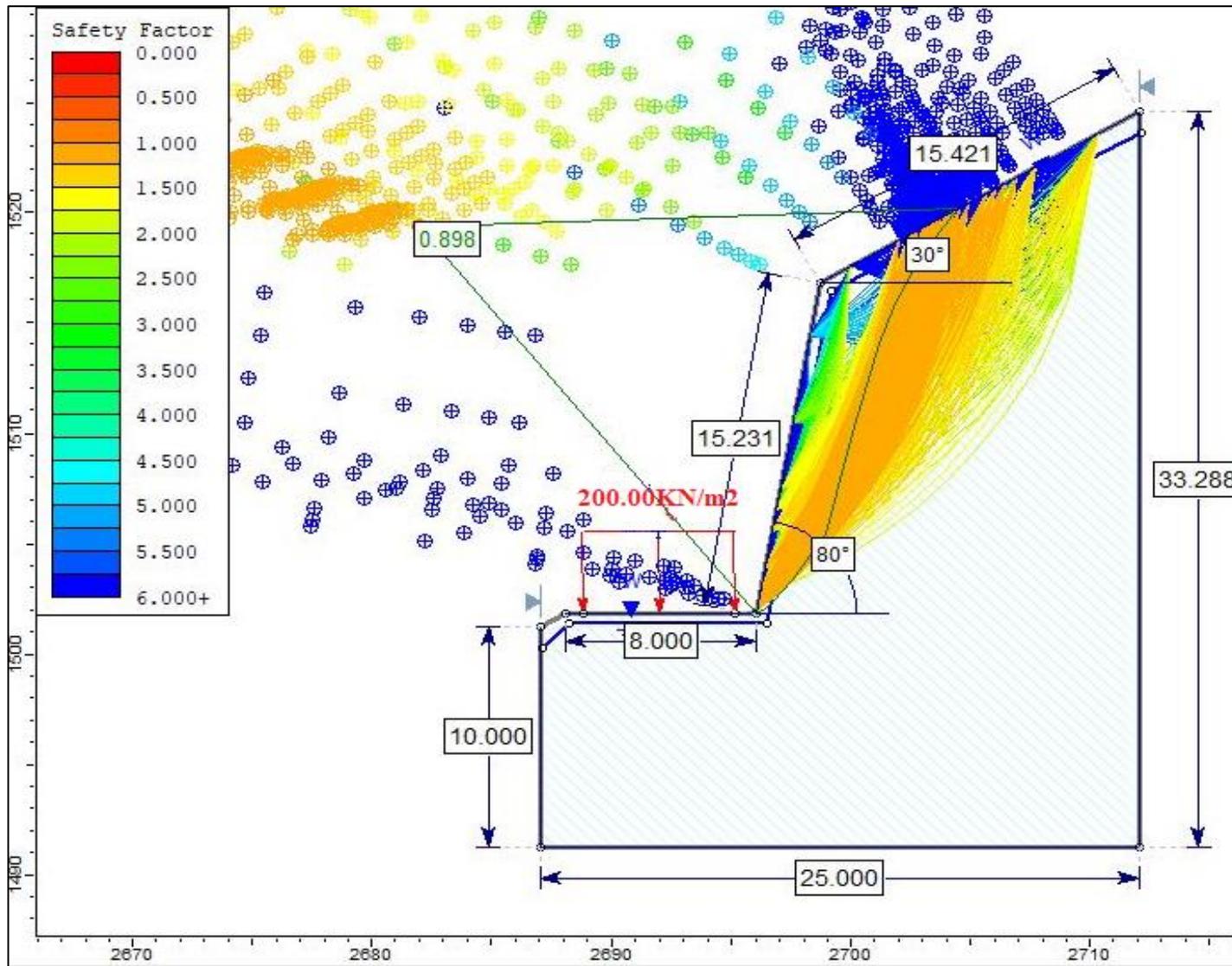


Figura 20. Talud 01-Análisis Slide en condiciones de Saturación Total.

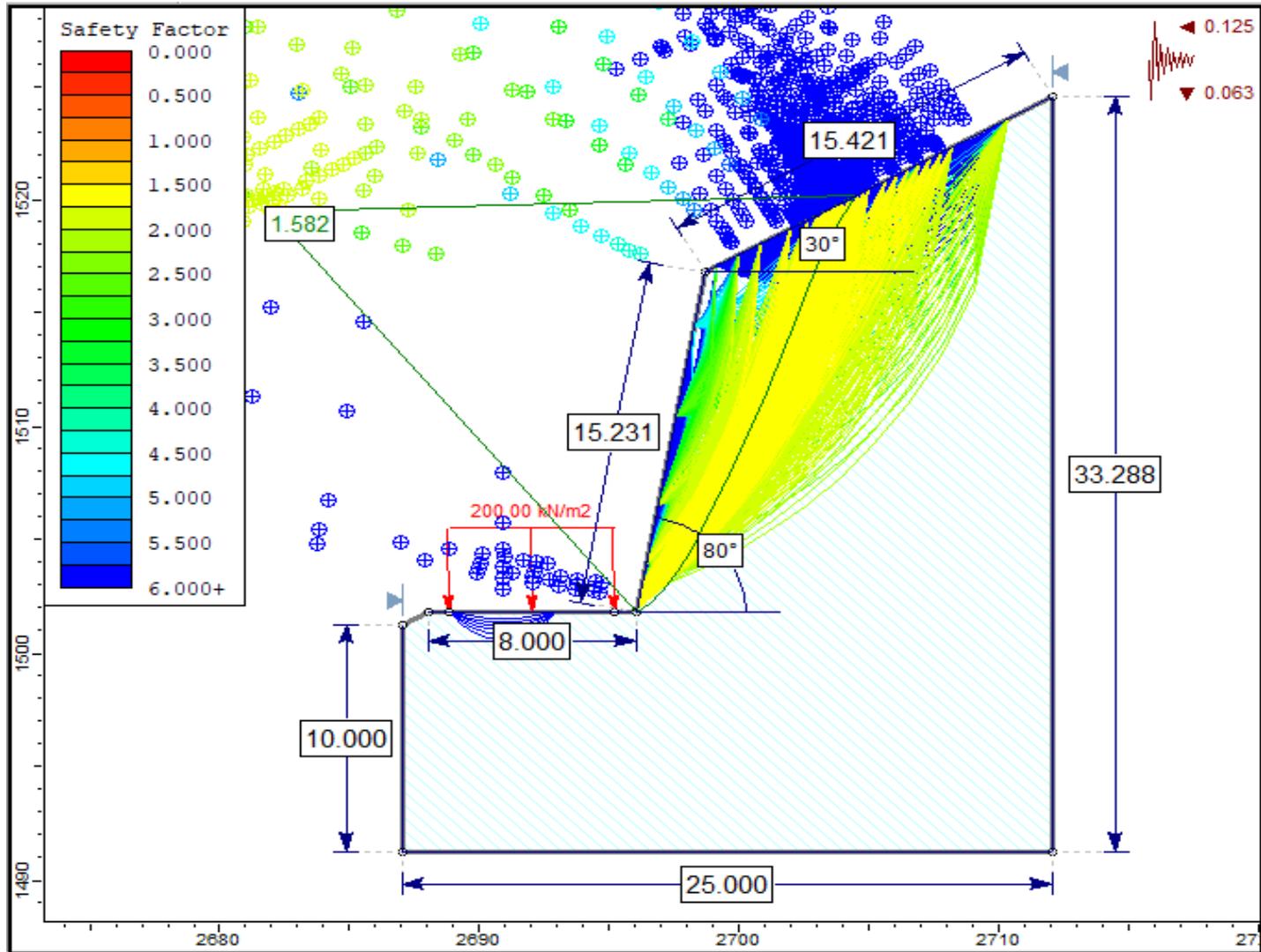


Figura 21. Talud 01-Análisis Slide en Condiciones de Sismicidad.

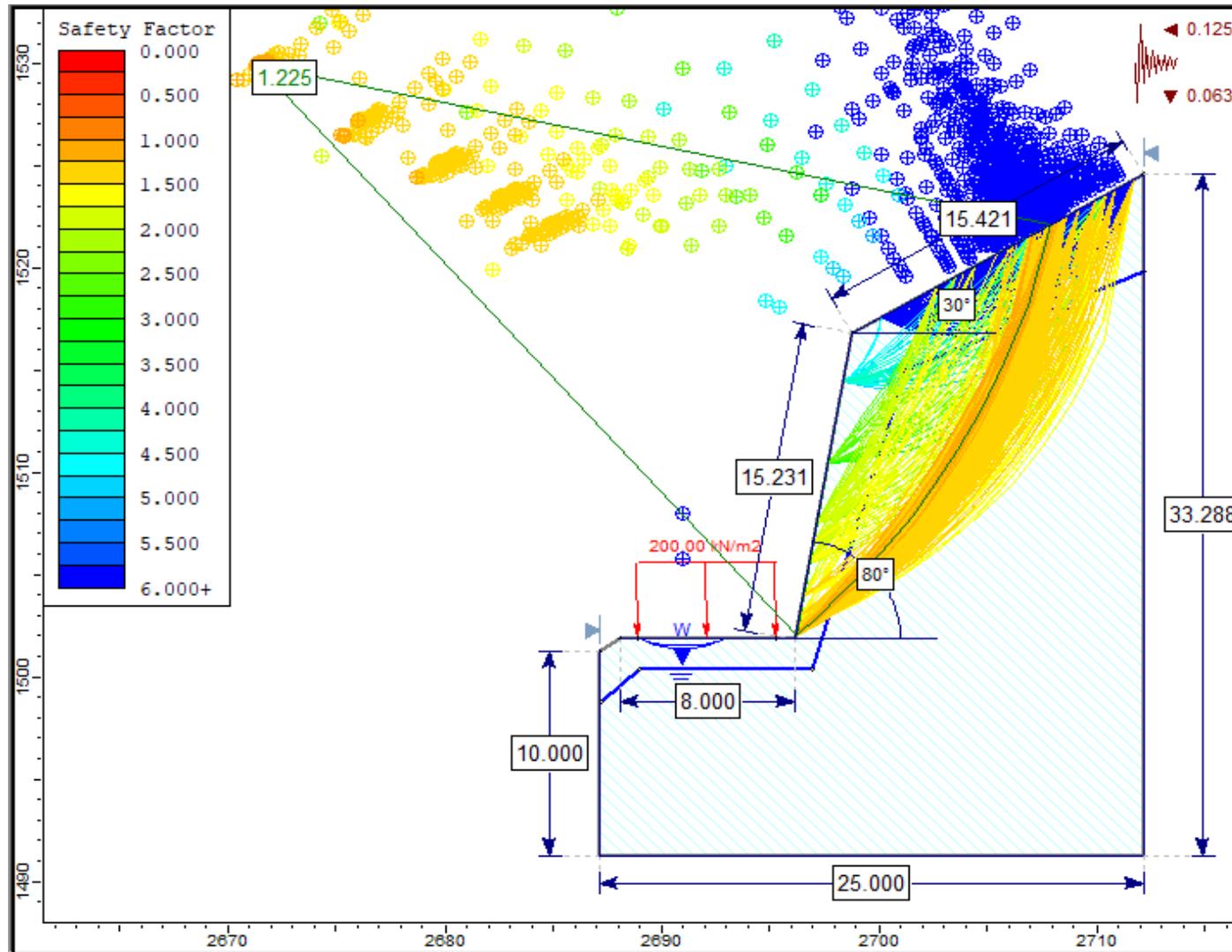


Figura 22. Talud 01-Análisis Slide en condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad Máxima.

### 3.9.2. TALUD O2

Se encuentra entre el Km 13+310-Km 13+350, Litológicamente está constituida por areniscas blanquecinas de grano medio con espesores de 0.20 a 0.25m e intercalado con estratos de carbón de la Formación Chimú (Ki-ch), en la parte superior del talud encontramos depósitos aluviales con bloques de 0.30 m, presenta meteorización y fracturamiento moderado, el estrato buza a favor del talud, el cual permite y favorece el desprendimiento de rocas.

Tabla 20. Talud O2-Coordenadas, orientación y geometría del talud.

DATUM		ZONA	COORDENADAS		COTA
WGS - 84	17 S		ESTE	NORTE	2073 m.s.n.m
			781616	9270223	
ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES			GEOMETRÍA DEL TALUD		
TIPO	DIP	DIP DIRECTION	ALTURA	12m	
ESTRATO	55	300	PIE	10 m	
FAMILIA 1	70	195	D	75	
FAMILIA 2	55	15	DD	345	

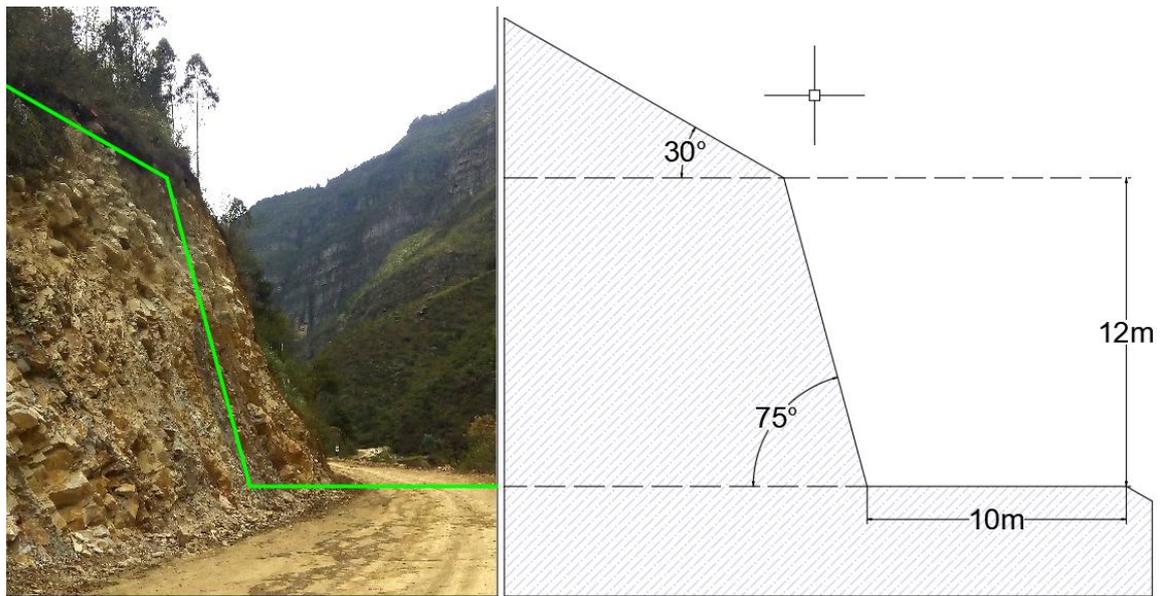


Figura 23. Talud O2-afloramiento de rocas areniscas y perfil del talud.

Tabla 21. Talud 02-Valores del macizo rocoso.

VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO (RMR)							
PARÁMETRO	RANGO DE VALORES Y VALORACIONES					Val	
Resistencia a compresión uniaxial (Mpa)	> 250 (15)	250 – 100 (12)	100 – 50 (7)	50 – 25 (4)	< 25 (2) < 5 (1) < 1(0)	7	
RQD (%)	90 – 100 (20)	75 – 90 (17)	50 – 75 (13)	25 – 50 (8)	< 25 (3)	13	
Espaciamiento	> 2 m (20)	0.6 – 2 m (15)	0.2 – 0.6 m (10)	0.06 – 0.2 m (8)	< 0.06 m (5)	10	
Condición de las Juntas	Persistencia	< 1m (6)	1 – 3 m (4)	3 – 10 m (2)	10 – 20 m (1)	> 20 m (0)	2
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.01 mm (5)	0.1 – 1.0 mm (4)	1 – 5 mm (1)	> 5mm (0)	5
	Rugosidad	Muy Rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Lisa (1)	Suave (0)	3
	Relleno	Ninguno (6)	Duro < 5 mm (4)	Duro > 5 mm (2)	Suave < 5 mm (1)	Suave > 5 mm (0)	4
	Alteración	Sana (6)	Lig. Alt (5)	Moder. Alt. (3)	Muy Alterada (1)	Descompuesta (0)	3
AGUA SUBTERRANEA	Seco (15)	Ligeramente Húmedo (10)	Húmedo (7)	Goteando (4)	Agua Fluyendo (0)	10	
<b>VALOR TOTAL RMR</b>						<b>57</b>	

Hallamos el RQD con la fórmula de Priest y Hudson (1976) con los valores determinado en campo (ver Tabla 22).

Tabla 22. Talud 02-Cálculo del RQD.

CÁLCULO DEL RQD				
$RQD = 100e^{-0.1\gamma(0.1\gamma+1)}$	ND	L(m)	$\lambda$	RQD
	34	2.5	13.6	60.57

Para calcular el GSI de Hoek (2014), se reemplaza en la fórmula de la Tabla 23, la cual está en función del RMR de Bieniawski (1989).

Tabla 23. Talud 02-Cálculo del GSI.

CÁLCULO DEL GSI			
$GSI = RMR_{89} - 5$		RMR	GSI
		57	52

Las propiedades Geomecánicas como los parámetros de entrada y de salida se indican en la Tabla 24 y Figura 24, la Cinemática de las discontinuidades se indican en las Figuras 16 - 17, por ultimo los factores de seguridad de los escenarios probabilísticos planteados se indican en las Figuras 18-22.

Tabla 24. Talud 02-Propiedades Geomecánicas de la Fm. Chimú.

PROPIEDADES GEOMECAÑICAS DE LA FORMACIÓN CHIMÚ					
PARÁMETROS DE ENTRADA (Clasificación de Hoek—Brown)			PARÁMETROS DE SALIDA		
Sigci ( $\sigma$ )	70Mpa	CRITERIO DE HOEK-BROWN	mb	0.564	
GSI	38		s	0.0001	
Mi	17		a	0.513	
D	0.7	PARAMETROS DE MOHR-COULOMB EQUIVALENTES	c	0.156	Mpa
Ei	19250 Mpa		$\phi$	53.93°	
MR	275	PÁRAMETROS DEL MACIZO ROCOSO	sigt	-0.0156	Mpa
			sigc	0.697	Mpa
			sigcm	6.583	Mpa
			Erm	1004.65	Mpa

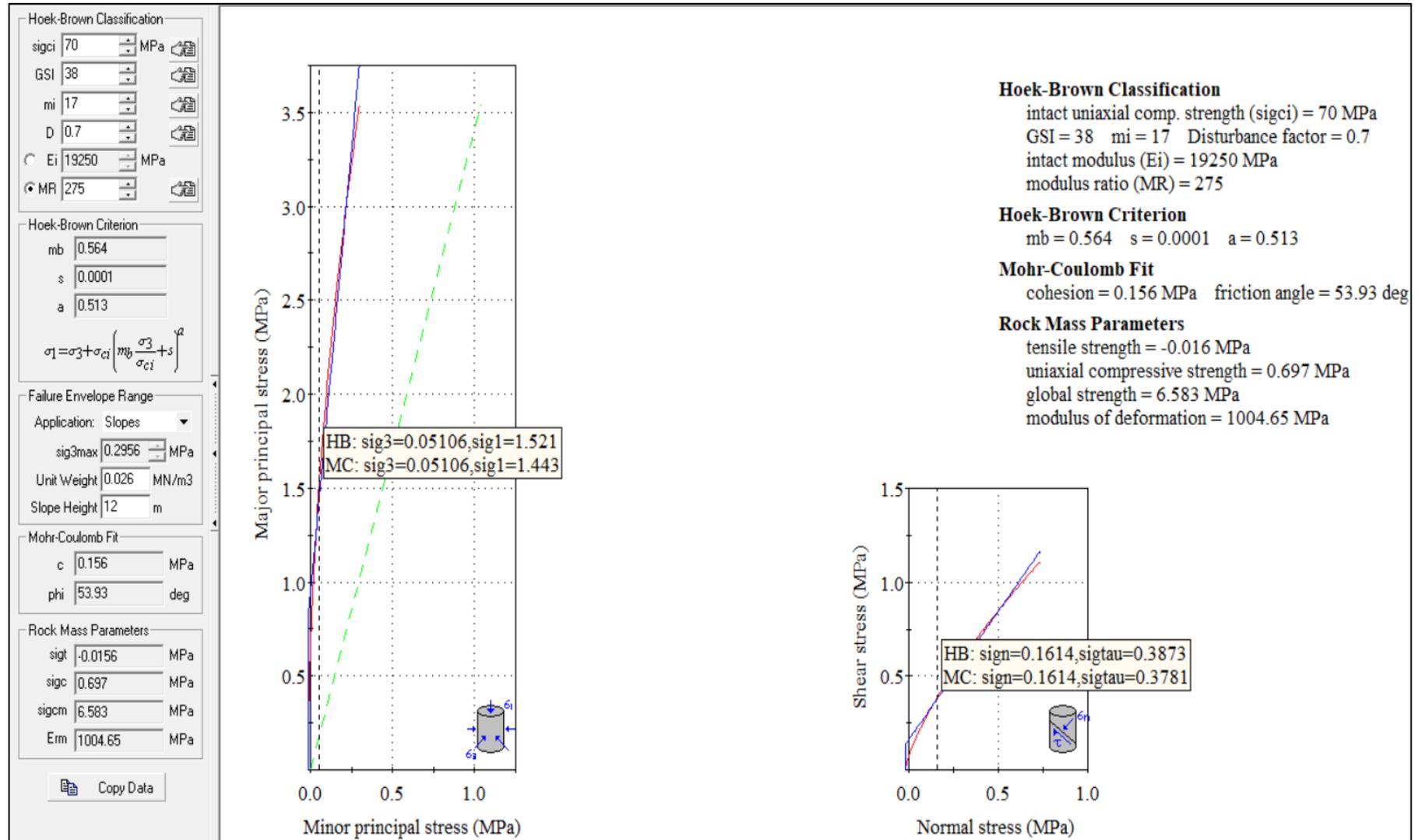


Figura 24. Talud 02-Propiedades Geomecánicas de las areniscas en la Fm. Chimú.

Rotura en cuña. Primera condición, las intersecciones de la familia 2 y el estrato caen dentro del ángulo de fricción interna; segunda condición el buzamiento de la intersección de las discontinuidades ( $\psi_i$ ) es mayor que el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) y menor que el buzamiento del talud ( $\psi_f$ ), cumpliéndose la siguiente desigualdad.  $\phi < \psi_i < \psi_f$ .

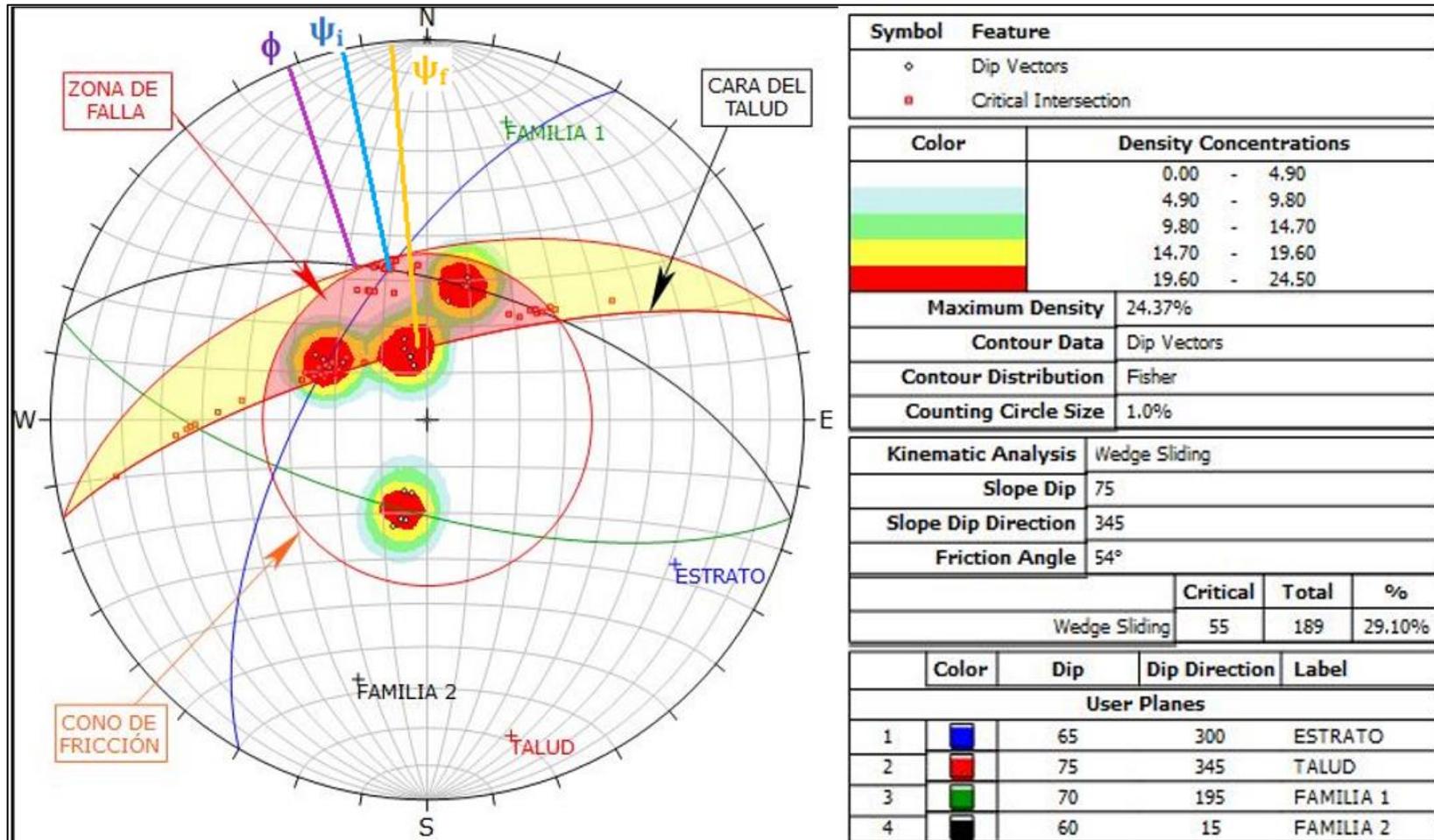


Figura 25. Talud 02-Análisis Cinemático, indican probabilidad de rotura tipo cuña.

Rotura planar. Primera condición, el buzamiento de la familia 2 ( $\psi_p$ ) es menor al buzamiento del talud ( $\psi_f$ ); segunda condición, el buzamiento de la familia 2 ( $\psi_p$ ) es mayor que el ángulo de fricción interna ( $\phi_p$ ).

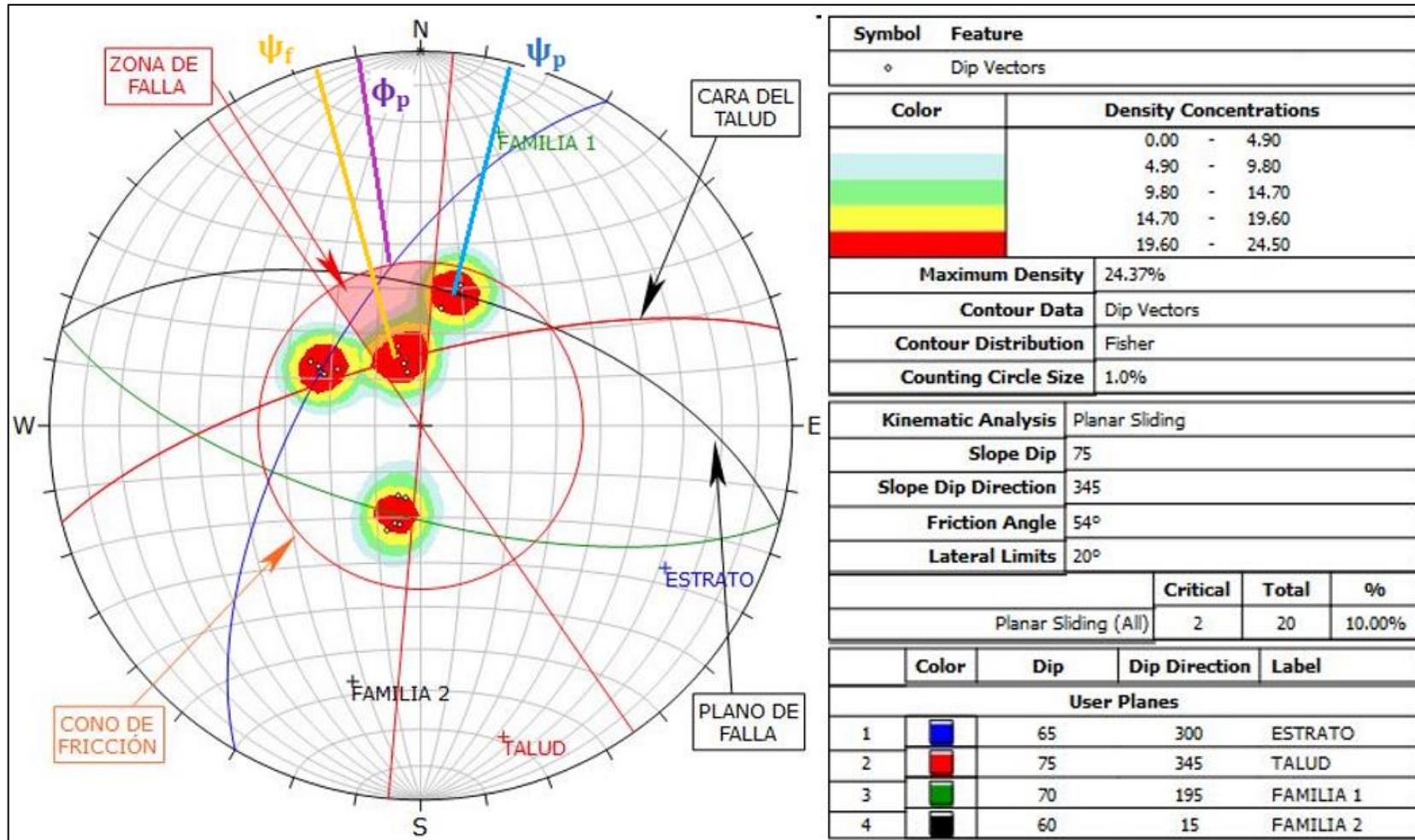


Figura 26. Talud 02-Análisis Cinemático, indican probabilidad de rotura planar.

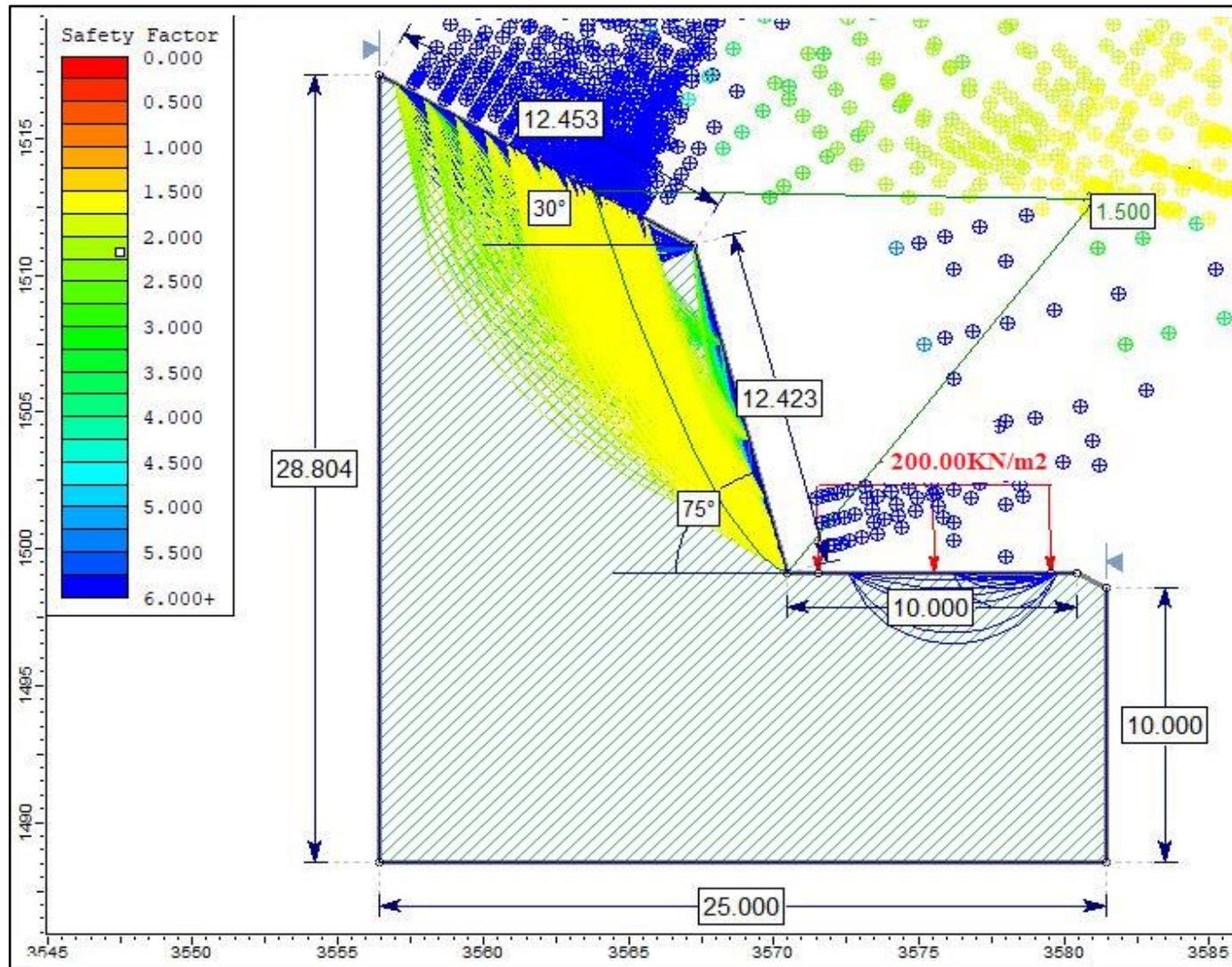


Figura 27. Talud 02-Análisis Slide en Condiciones Naturales.

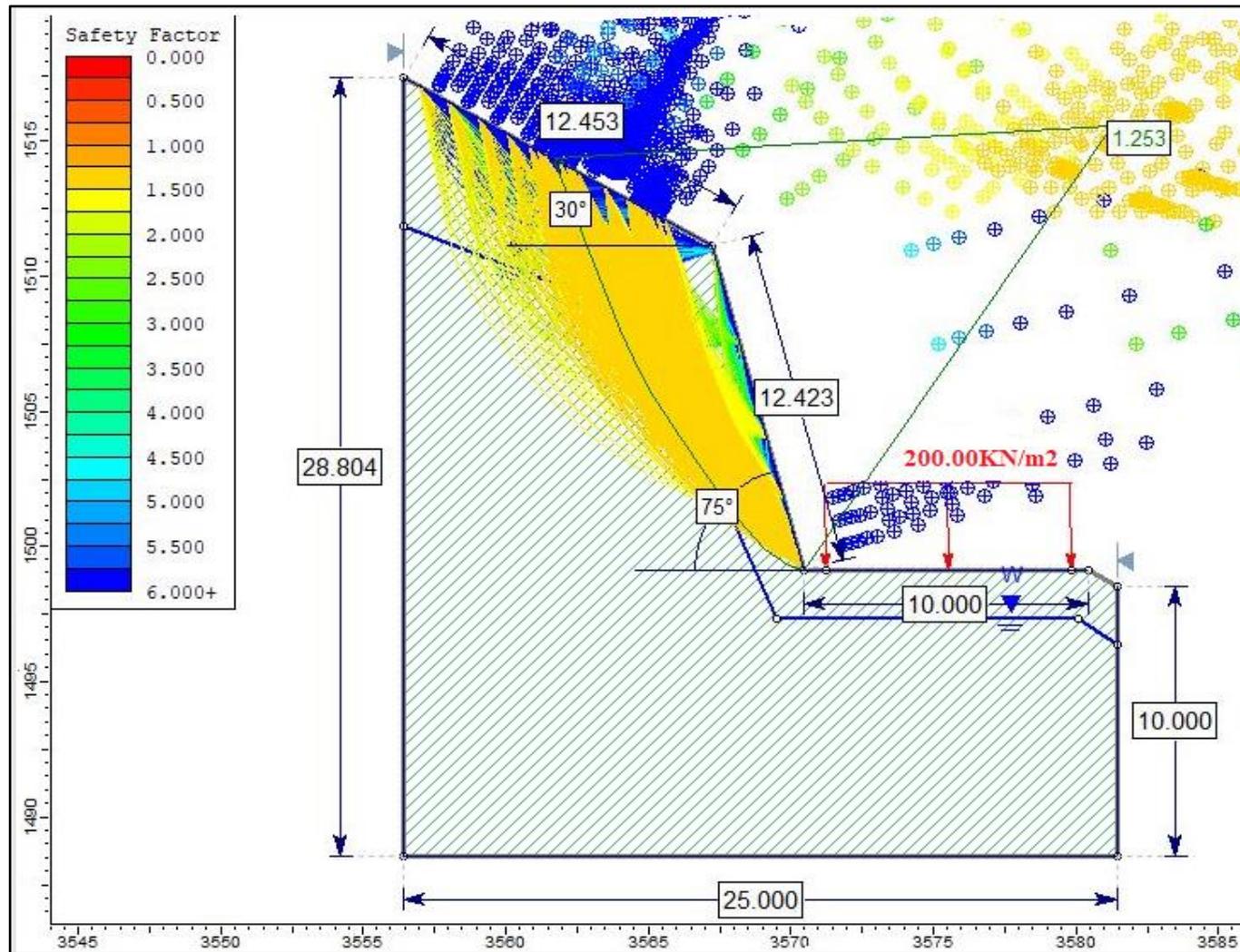


Figura 28. Talud 02-Análisis Slide en condiciones de Saturación Parcial

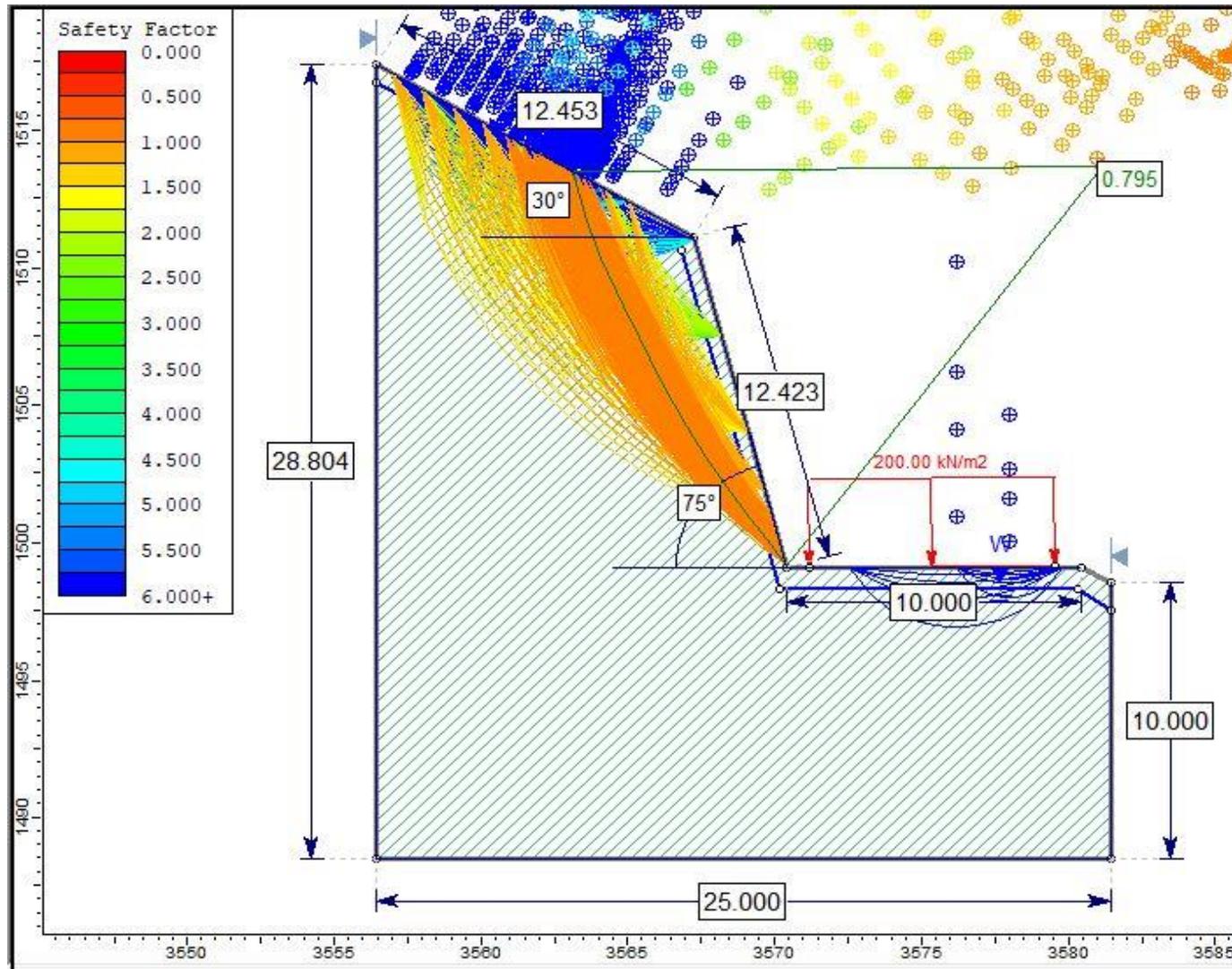


Figura 29. Talud 02-Análisis Slide en condiciones de Saturación Total.

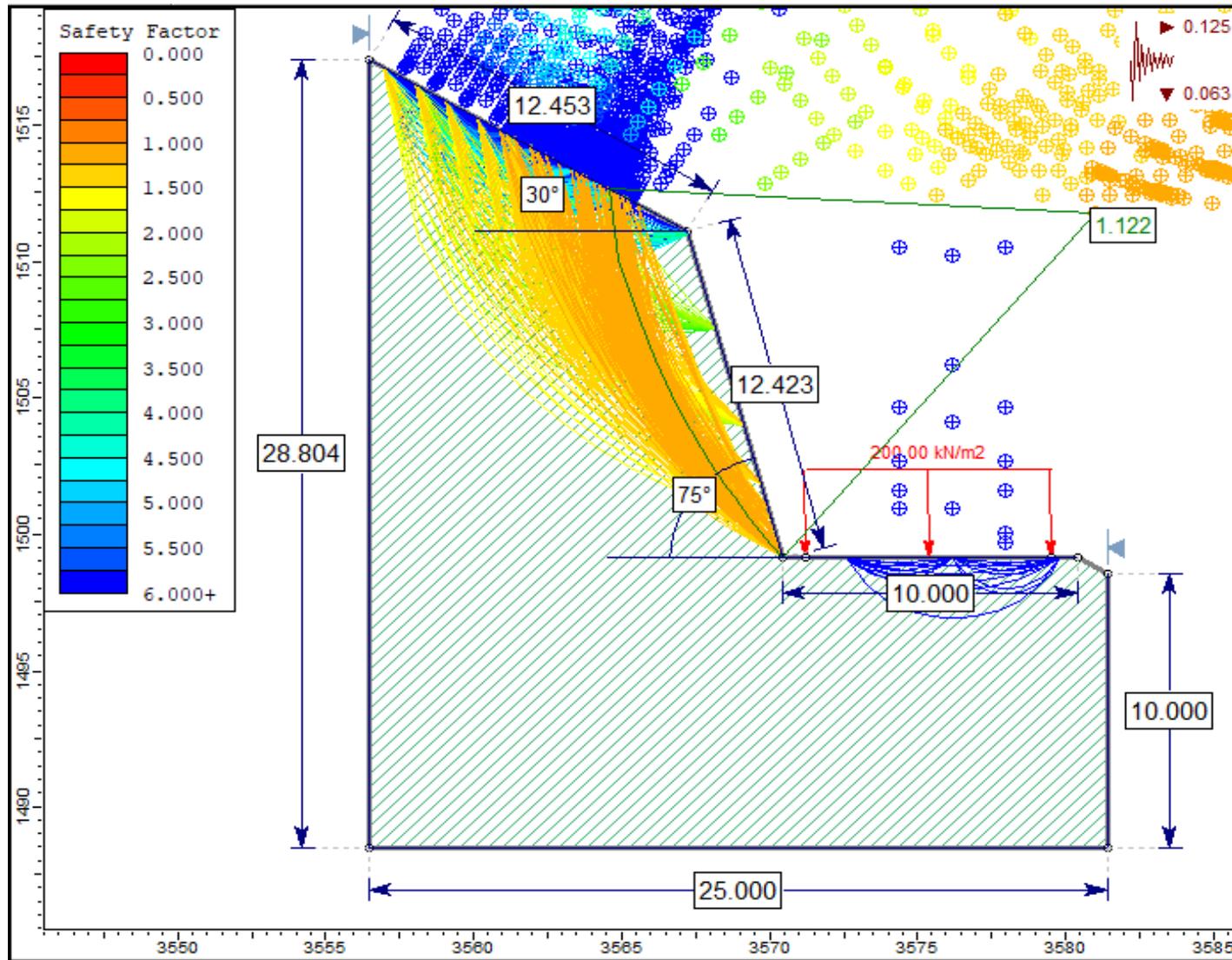


Figura 30. Talud 02-Análisis Slide en condiciones de Sismicidad Máxima.

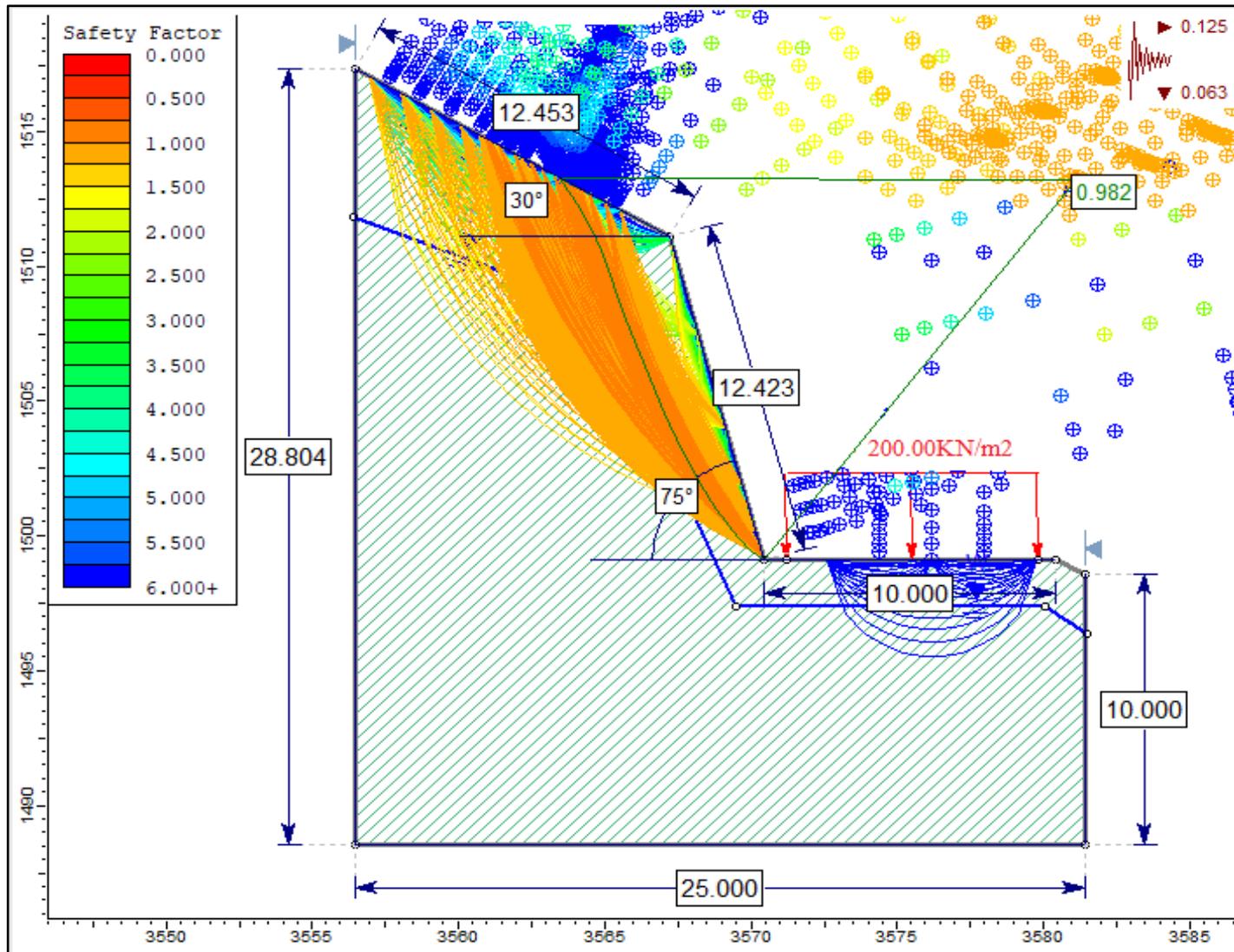


Figura 31. Talud 02-Análisis Slide en condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad Máxima.

### 3.9.3. TALUD O3

Se encuentra entre el Km 11+520-Km 11+580, está constituida por areniscas blanquecinas de grano medio perteneciente a la Formación Carhuaz (Ki-Ca), estratos de 0.60 a 0.80 m de espesor, conforman tres familias de discontinuidades moderadamente meteorizado y moderado fracturamiento, el estrato está buzando en contra del talud, sin embargo, no impide que haya desprendimiento de rocas, generando rotura tipo cuña.

Tabla 25. Talud O3-Coordenadas, orientación y geometría del talud.

DATUM		ZONA	COORDENADAS		COTA
WGS - 84		17 S	ESTE	NORTE	2395 m.s.n.m
			780477	9269249	
ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES			GEOMETRÍA DEL TALUD		
TIPO	DIP	DIP DIRECTION	ALTURA	17m	
ESTRATO	50	205	PIE	9 m	
FAMILIA 1	65	300	D	70	
FAMILIA 2	70	125	DD	360	

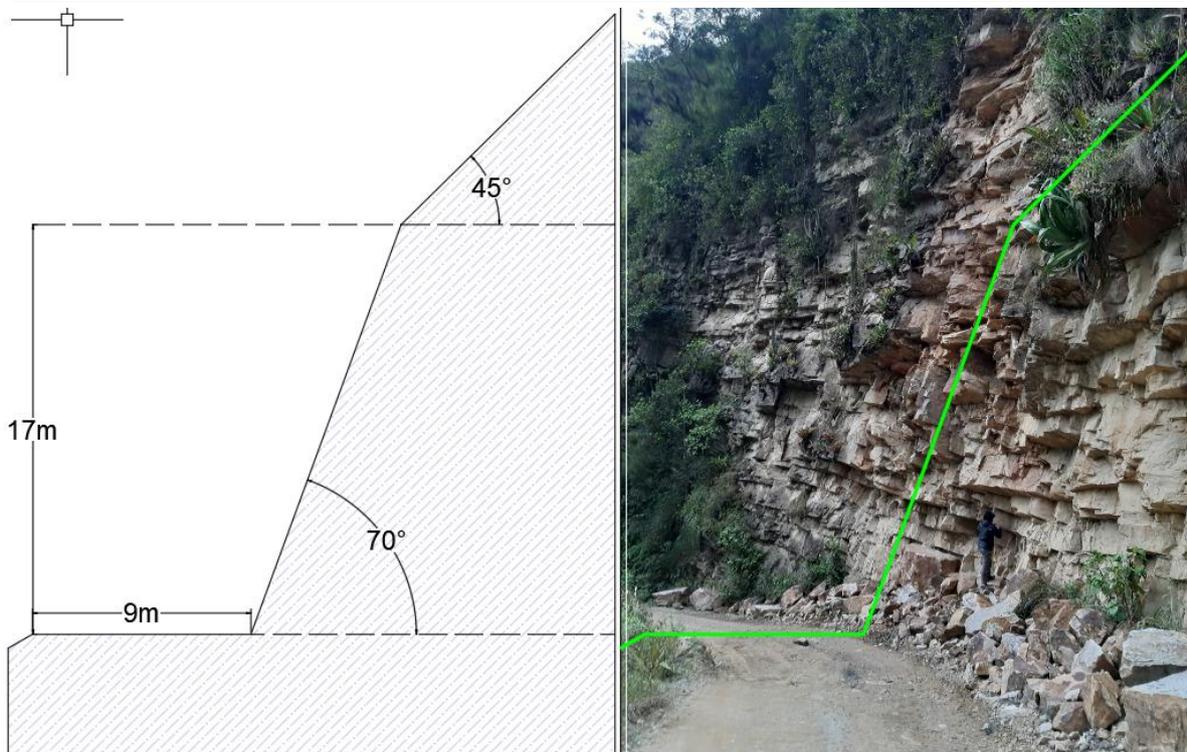


Figura 32. Talud O3-afloramiento de rocas areniscas y perfil del talud.

Tabla 26. Talud 03-Valores del macizo rocoso.

VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO (RMR)							
PARÁMETRO	RANGO DE VALORES					Val	
Resistencia a compresión uniaxial (Mpa)	> 250 (15)	250 – 100 (12)	100 – 50 (7)	50 – 25 (4)	< 25 (2) < 5 (1) < 1(0)	7	
RQD (%)	90 – 100 (20)	75 – 90 (17)	50 – 75 (13)	25 – 50 (8)	< 25 (3)	13	
Espaciamiento	> 2 m (20)	0.6 – 2 m (15)	0.2 – 0.6 m (10)	0.06 – 0.2 m (8)	< 0.06 m (5)	15	
Estado de las discontinuidades	Persistencia	< 1m (6)	1 – 3 m (4)	3 – 10 m (2)	10 – 20 m (1)	> 20 m (0)	2
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.01 mm (5)	0.1 – 1.0 mm (4)	1 – 5 mm (1)	> 5mm (0)	4
	Rugosidad	Muy Rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Lisa (1)	Suave (0)	3
	Relleno	Ninguno (6)	Duro < 5 mm (4)	Duro > 5 mm (2)	Suave < 5 mm (1)	Suave > 5 mm (0)	2
	Alteración	Sana (6)	Lig. Alt (5)	Moder. Alt. (3)	Muy Alterada (1)	Descompuesta (0)	3
AGUA SUBTERRANEA	Seco (15)	Húmedo (10)	Mojado (7)	Goteo (4)	Flujo (0)	10	
VALOR TOTAL RMR						59	

Hallamos el RQD con la fórmula de Priest y Hudson (1976) con los valores determinado en campo (ver Tabla 27).

Tabla 27. Talud 03-Cálculo del RQD.

CÁLCULO DEL RQD				
$RQD = 100e^{-0.1\gamma(0.1\gamma+1)}$	ND	L(m)	$\lambda$	RQD
	27	2	13.5	60.92

Para calcular el GSI de Hoek (2014), se reemplaza en la fórmula de la Tabla 28, la cual está en función del RMR de Bieniawski (1989).

Tabla 28. Talud 03-Cálculo del GSI.

CÁLCULO DEL GSI		
$GSI = RMR_{89} - 5$	RMR	GSI
	59	54

Las propiedades Geomecánicas como los parámetros de entrada y de salida se indican en la Tabla 29 y Figura 33, la Cinemática de las discontinuidades se indican en la Figura 34, por ultimo los factores de seguridad de los escenarios probabilísticos planteados se indican en las Figuras 35-39.

Tabla 29. Talud 03-Propiedades Geomecánicas Fm. Carhuaz.

PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE LA FORMACIÓN CARHUAZ					
PARÁMETROS DE ENTRADA (Clasificación de Hook—Brown)		PARÁMETROS DE SALIDA			
Sigci ( $\sigma$ )	75Mpa	CRITERIO DE HOOK-BROWN	mb	0.629	
GSI	40		s	0.0002	
Mi	17		a	0.511	
D	0.7	PARAMETROS DE MOHR-COULOMB EQUIVALENTES	c	0.209	Mpa
Ei	20625Mpa		$\phi$	53.01°	
MR	275	PÁRAMETROS DEL MACIZO ROCOSO	sigt	-0.0199	Mpa
			sigc	0.879	Mpa
			sigcm	7.528	Mpa
			Erm	1201.00	Mpa

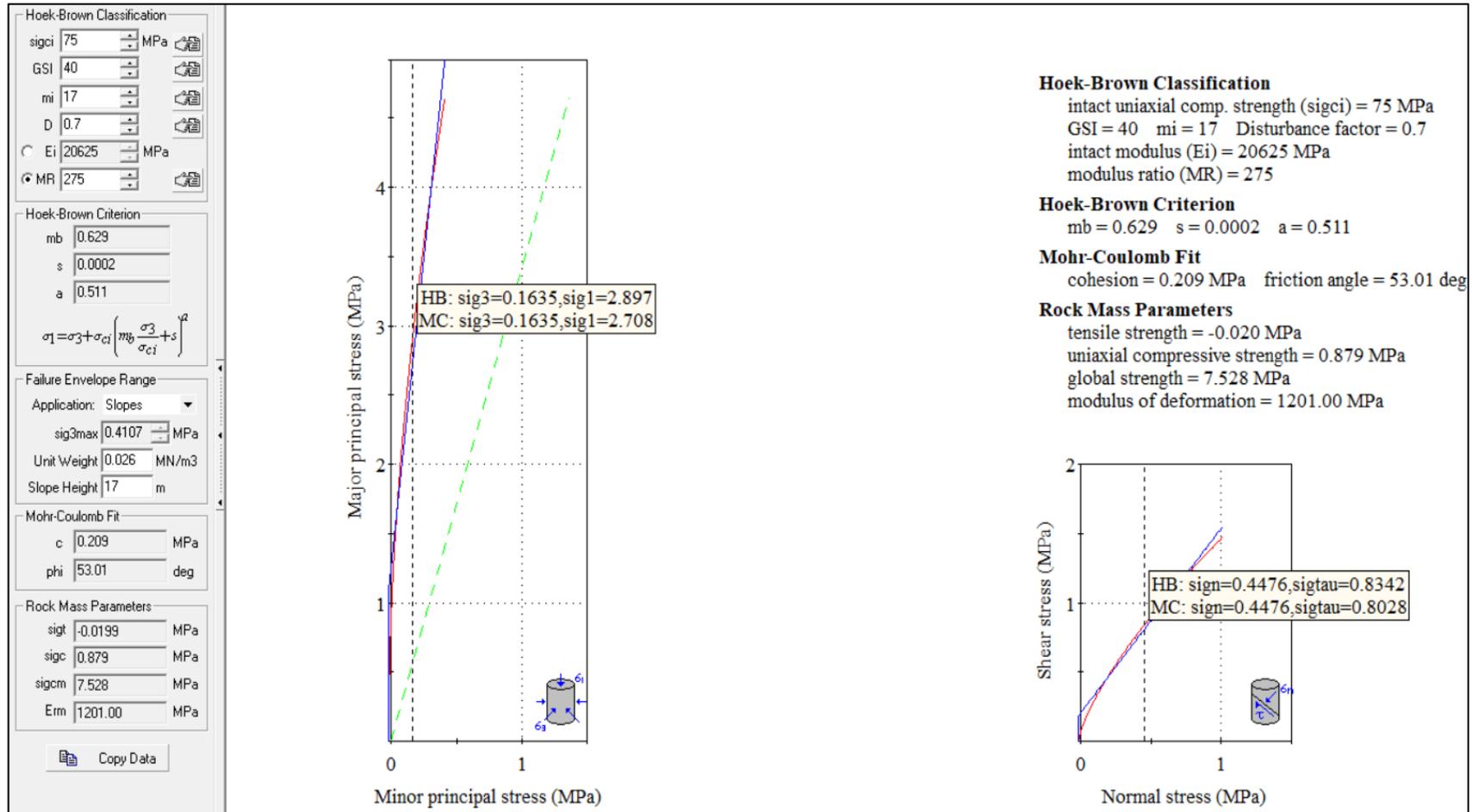


Figura 33. Talud 03-Propiedades Geomecánicas de la arenisca en la Fm. Carhuaz.

Rotura en cuña. Primera condición, las intersecciones de la familia 1 y la familia 2 caen dentro del ángulo de fricción interna; Segunda condición el buzamiento de la intersección de las discontinuidades ( $\psi_i$ ) es mayor que el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) y menor que el buzamiento del talud ( $\psi_f$ ), cumpliéndose la siguiente desigualdad  $\phi < \psi_i < \psi_f$ .

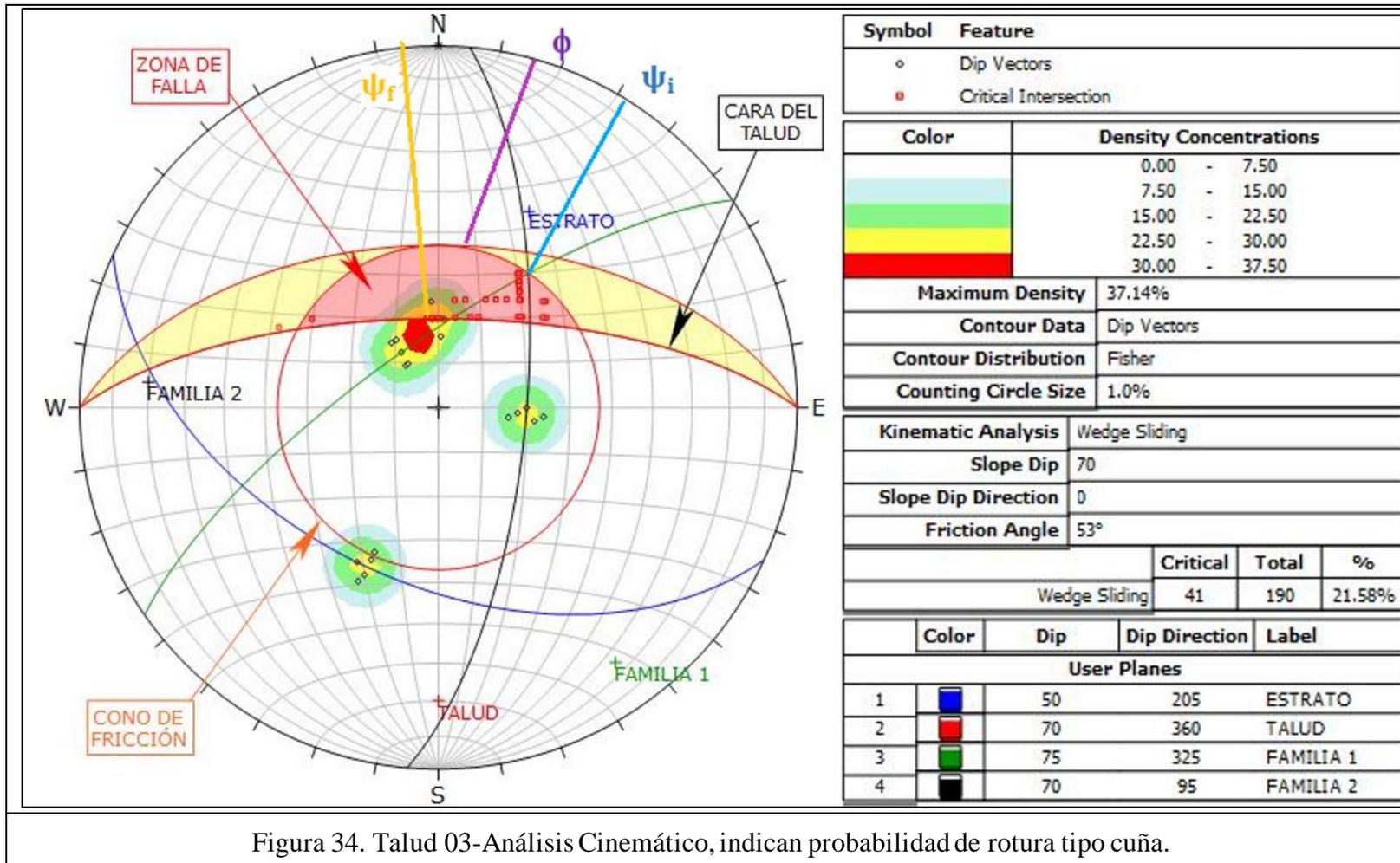


Figura 34. Talud 03-Análisis Cinemático, indican probabilidad de rotura tipo cuña.

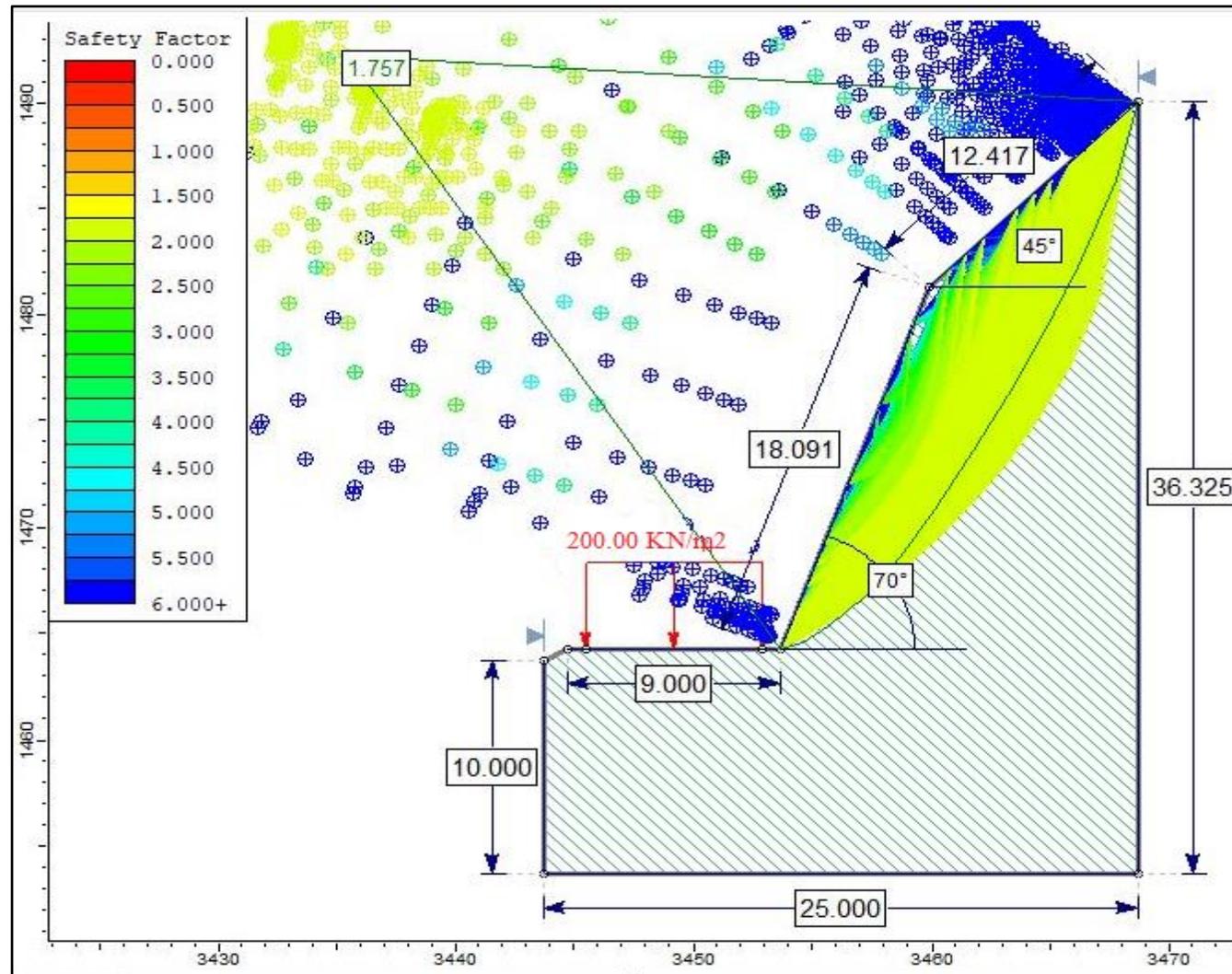


Figura 35. Talud 03-Análisis Slide en Condiciones Naturales.

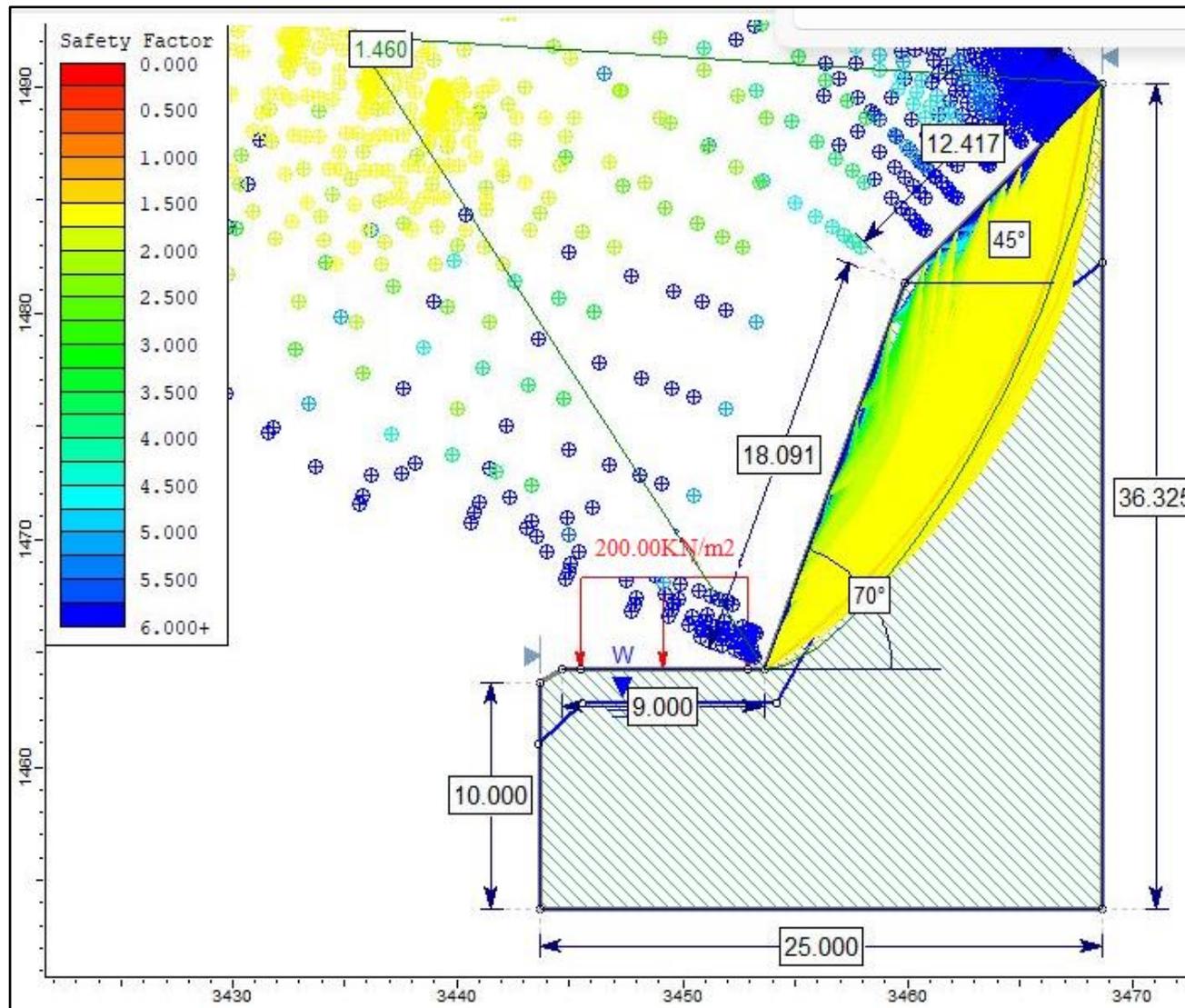


Figura 36. Talud 03-Análisis Slide en condiciones de Saturación Parcial.

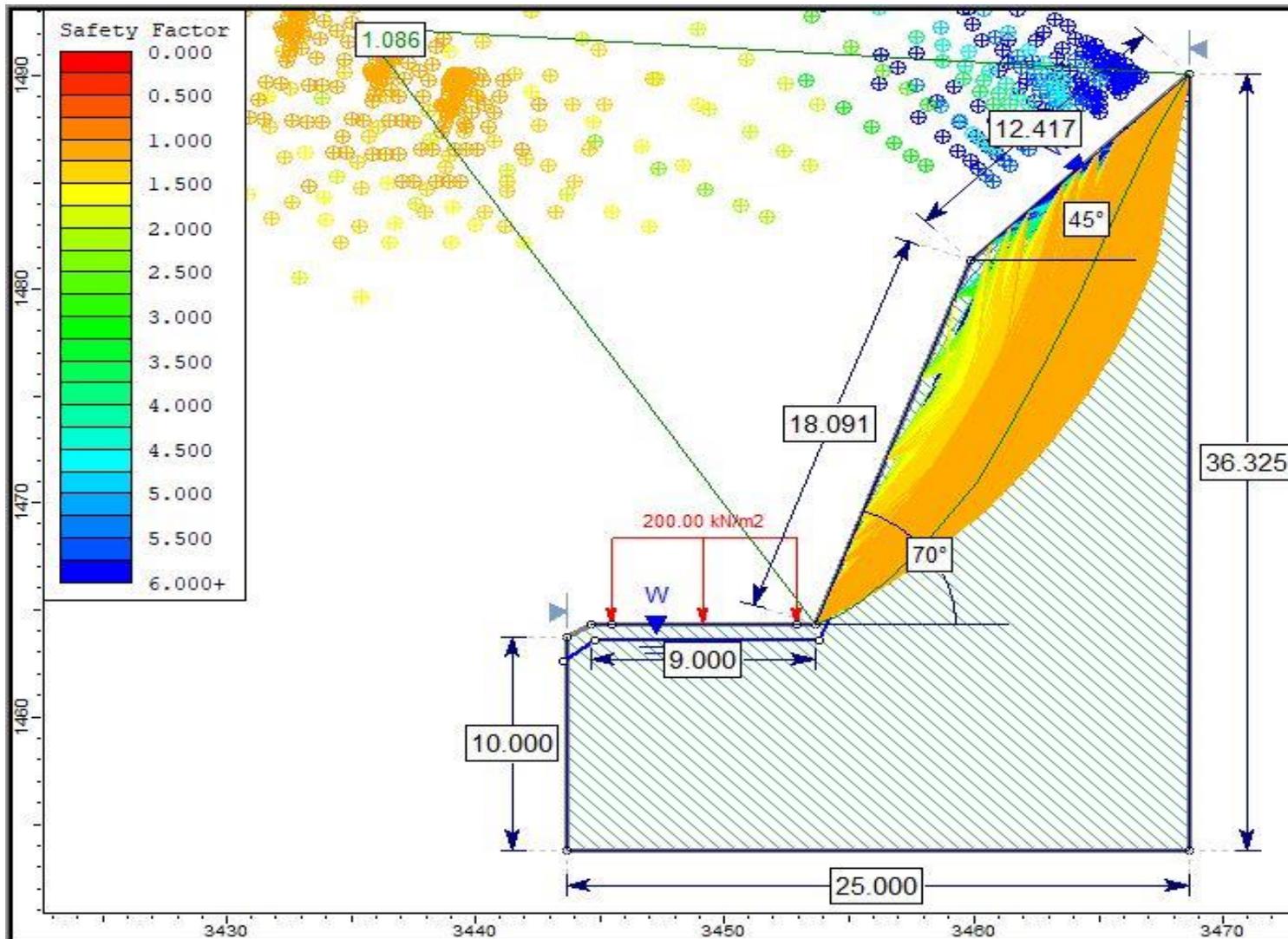


Figura 37. Talud 03-Análisis Slide en Condiciones de Saturación Total.

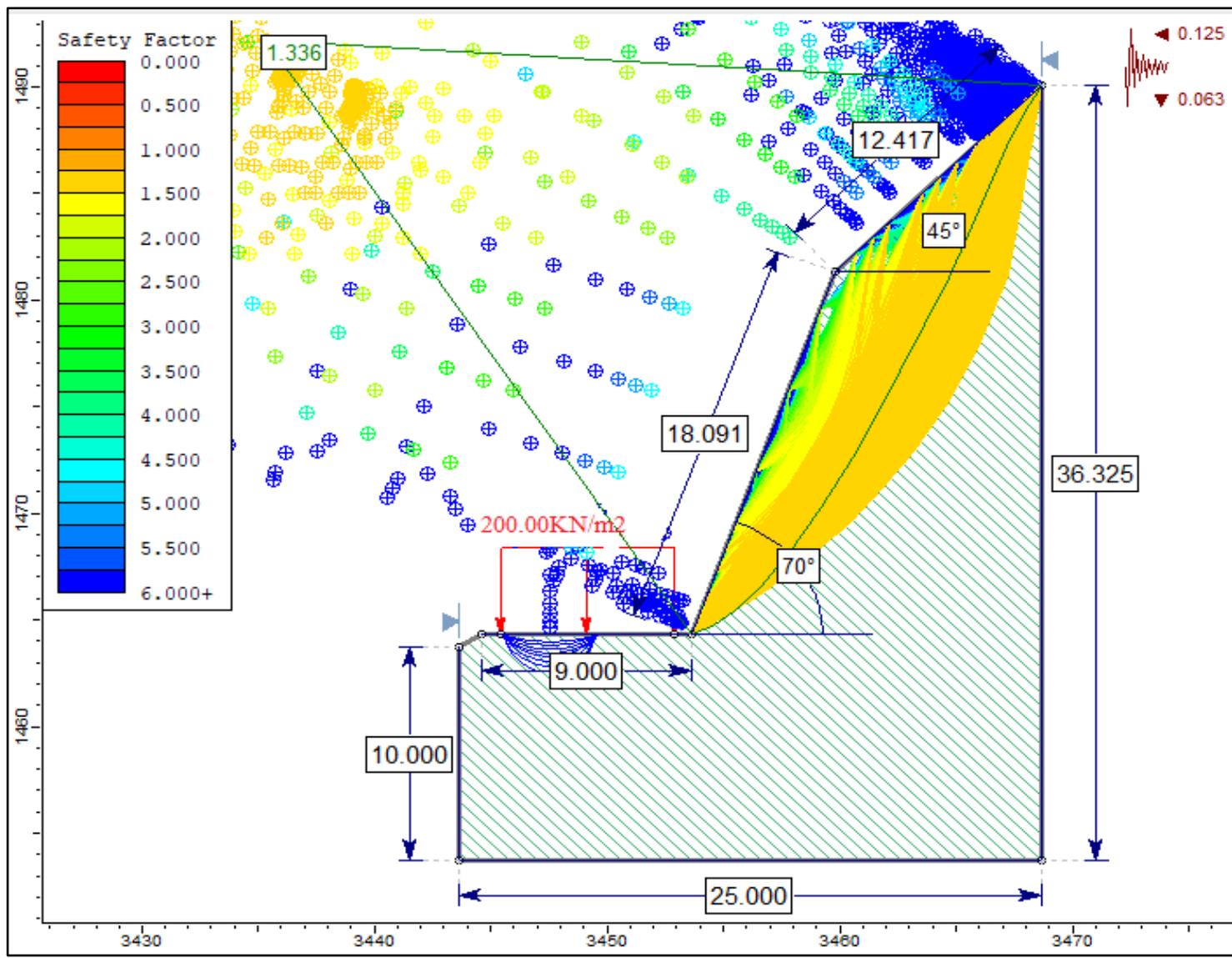


Figura 38. Talud 03-Análisis Slide en Condiciones de Sismicidad Máxima.



### 3.9.4. TALUD O4

Se encuentra entre el Km 09+580-Km 09+620, constituida por areniscas cuarzosas blanquecinas de grano medio de la Formación Farrat (Ki-f), presentan tres discontinuidades, las mismas que de acuerdo a la cinemática en proyecciones estereográficas generan rotura tipo cuña, roca con moderado fracturamiento y leve meteorización.

Tabla 30. Talud O4- Coordenadas, orientación y geometría del talud.

DATUM		ZONA	COORDENADAS		COTA
WGS - 84	17 S		ESTE	NORTE	2438 m.s.n.m
			779763	9267853	
ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES			GEOMETRÍA DEL TALUD		
TIPO	DIP	DIP DIRECTION	ALTURA	18m	
ESTRATO	25	285	PIE	10 m	
FAMILIA 1	75	90	D	85	
FAMILIA 2	70	115	DD	75	

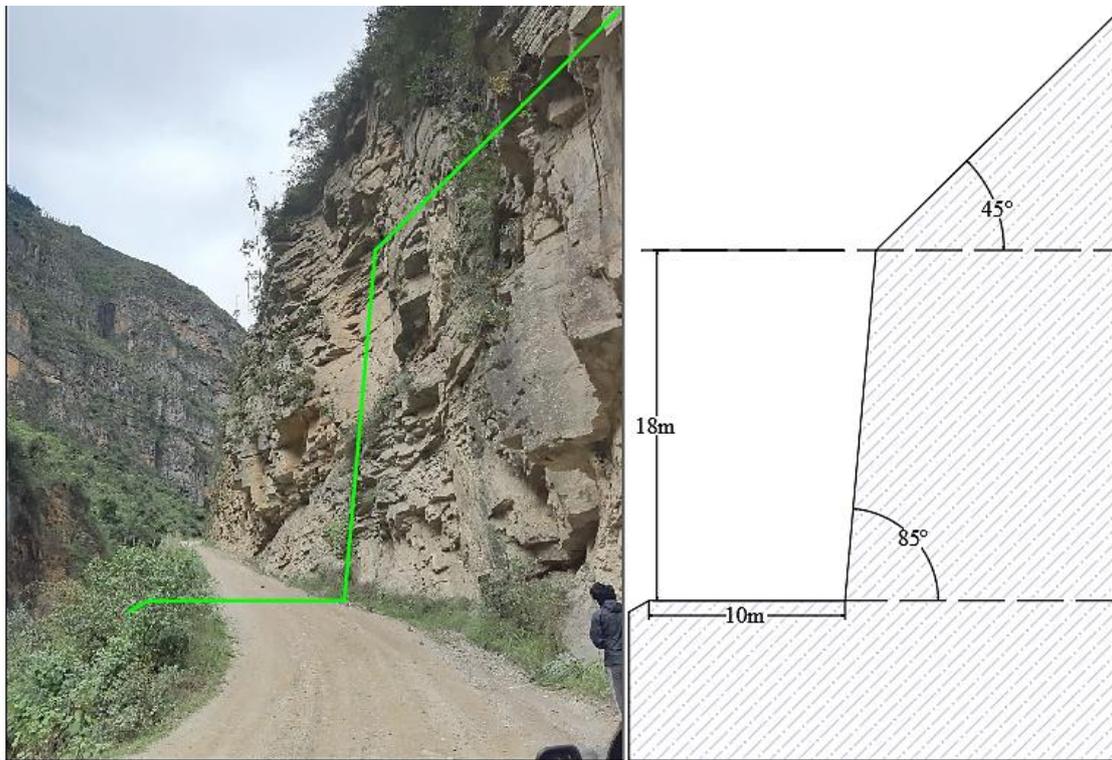


Figura 40. Talud O4- afloramiento de rocas areniscas y perfil del talud.

Tabla 31. Talud 04-Valores del macizo rocoso.

VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO (RMR)							
PARÁMETRO	RANGO DE VALORES Y VALORACIONES					Val	
<b>Resistencia a compresión uniaxial (Mpa)</b>	> 250 (15)	250 – 100 (12)	100 – 50 (7)	50 – 25 (4)	< 25 (2) < 5 (1) < 1(0)	7	
<b>RQD (%)</b>	90 – 100 (20)	75 – 90 (17)	50 – 75 (13)	25 – 50 (8)	< 25 (3)	13	
<b>Espaciamiento</b>	> 2 m (20)	0.6 – 2 m (15)	0.2 – 0.6 m (10)	0.06 – 0.2 m (8)	< 0.06 m (5)	10	
<b>Condición de las Juntas</b>	<b>Persistencia</b>	< 1m (6)	1 – 3 m (4)	3 – 10 m (2)	10 – 20 m (1)	> 20 m (0)	2
	<b>Abertura</b>	Cerrada (6)	< 0.01 mm (5)	0.1 – 1.0 mm (4)	1 – 5 mm (1)	> 5mm (0)	5
	<b>Rugosidad</b>	Muy Rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Lisa (1)	Suave (0)	3
	<b>Relleno</b>	Ninguno (6)	Duro < 5 mm (4)	Duro > 5 mm (2)	Suave < 5 mm (1)	Suave > 5 mm (0)	4
	<b>Alteración</b>	Sana (6)	Lig. Alt (5)	Moder. Alt. (3)	Muy Alterada (1)	Descompuesta (0)	5
<b>AGUA SUBTERRANEA</b>	Seco (15)	Ligeramente Húmedo (10)	Húmedo (7)	Goteando (4)	Agua Fluyendo (0)	10	
<b>VALOR TOTAL RMR</b>						<b>59</b>	

Hallamos el RQD con la fórmula de Priest y Hudson (1976) con los valores determinado en campo (ver Tabla 32).

Tabla 32. Talud 04-Cálculo del RQD.

CÁLCULO DEL RQD				
$RQD = 100e^{-0.1\gamma(0.1\gamma+1)}$	ND	L(m)	$\lambda$	RQD
	31	2	15.5	54.12

Para calcular el GSI de Hoek (2014), se reemplaza en la fórmula de la Tabla 33, la cual está en función del RMR de Bieniawski (1989).

Tabla 33. Talud crítico N° 04-Cálculo del GSI.

CÁLCULO DEL GSI		
$GSI = RMR_{89} - 5$	RMR	GSI
	59	54

Las propiedades Geomecánicas como los parámetros de entrada y de salida se indican en la Tabla 34 y Figura 41, la Cinemática de las discontinuidades se indican en la Figura 42, por ultimo los factores de seguridad de los escenarios probabilísticos planteados se indican en las Figuras 43-47.

Tabla 34. Talud 04-Propiedades Geomecánicas Fm. Farrat.

PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE LA FORMACIÓN FARRAT					
PARÁMETROS DE ENTRADA (Clasificación de Hook—Brown)		PARÁMETROS DE SALIDA			
Sigci ( $\sigma$ )	75Mpa	CRITERIO DE HOOK-BROWN	mb	0.742	
GSI	43		s	0.0003	
Mi	17		a	0.509	
D	0.7	PARAMETROS DE MOHR-COULOMB EQUIVALENTES	c	0.240	Mpa
Ei	20625Mpa		$\phi$	53.90°	
MR	275	PÁRAMETROS DEL MACIZO ROCOSO	sigt	-0.0261	Mpa
			sigc	1.117	Mpa
			sigcm	8.282	Mpa
			Erm	1429.47	Mpa

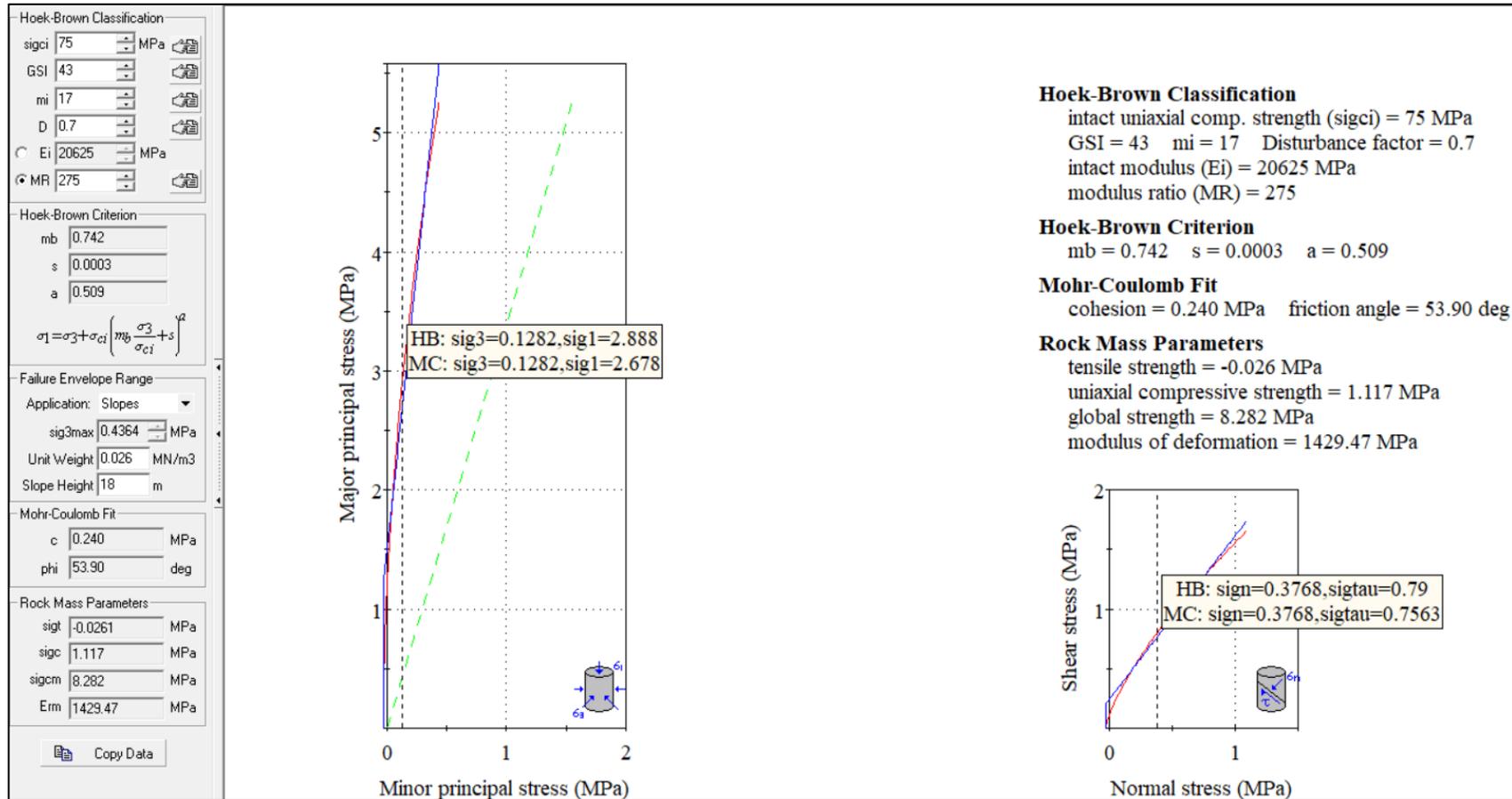


Figura 41. Talud 04-Propiedades Geomecánicas de las areniscas en la Fm. Farrat.

Rotura en cuña. Primera condición, las intersecciones de la familia 1 y la familia 2 caen dentro del ángulo de fricción interna; segunda condición, el buzamiento de la intersección de las discontinuidades ( $\psi_i$ ) es mayor que el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) y menor que el buzamiento del talud ( $\psi_f$ ), cumpliéndose la siguiente desigualdad.  $\phi < \psi_i < \psi_f$

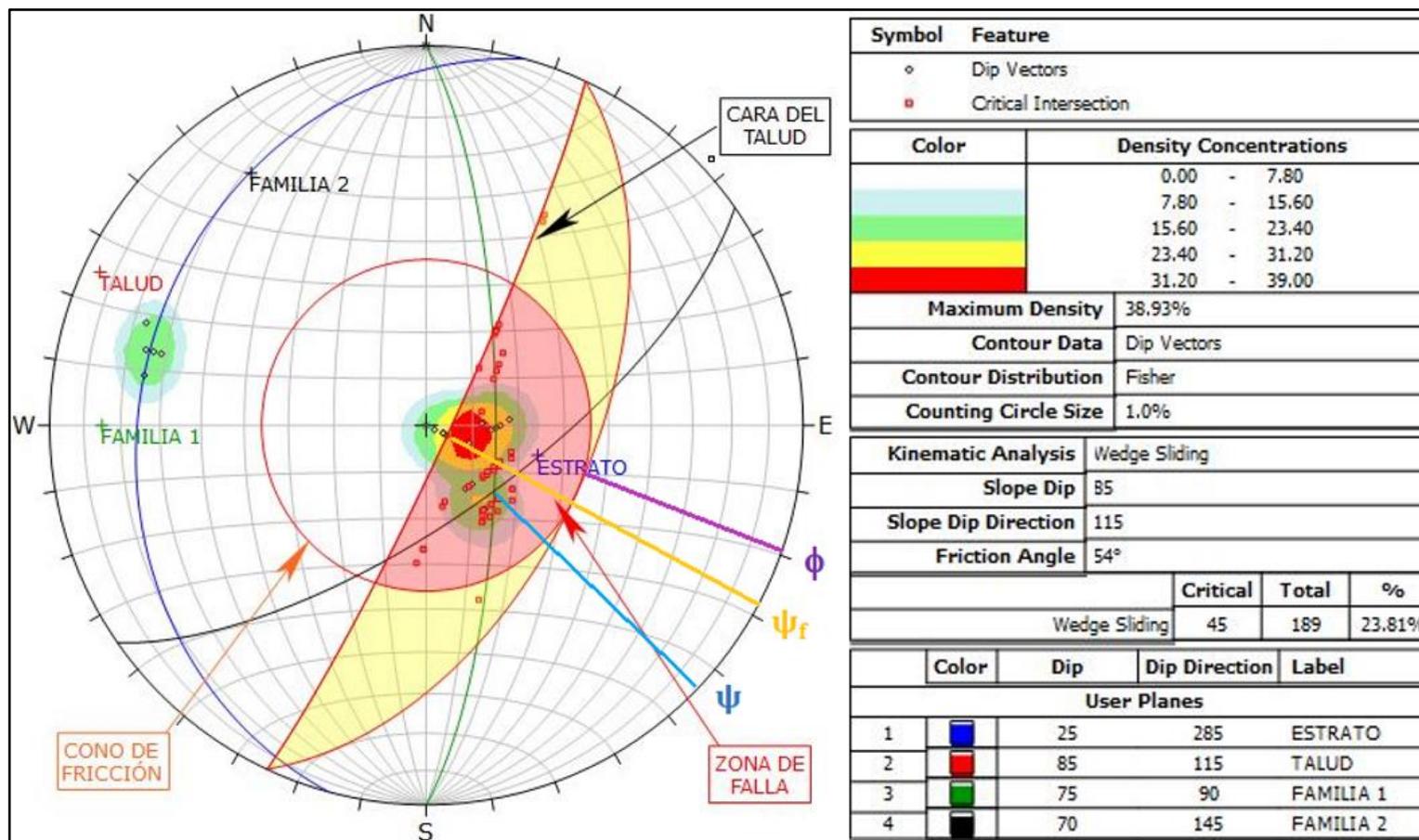


Figura 42. Talud 04-Análisis Cinemático, indican probabilidad de rotura tipo cuña.

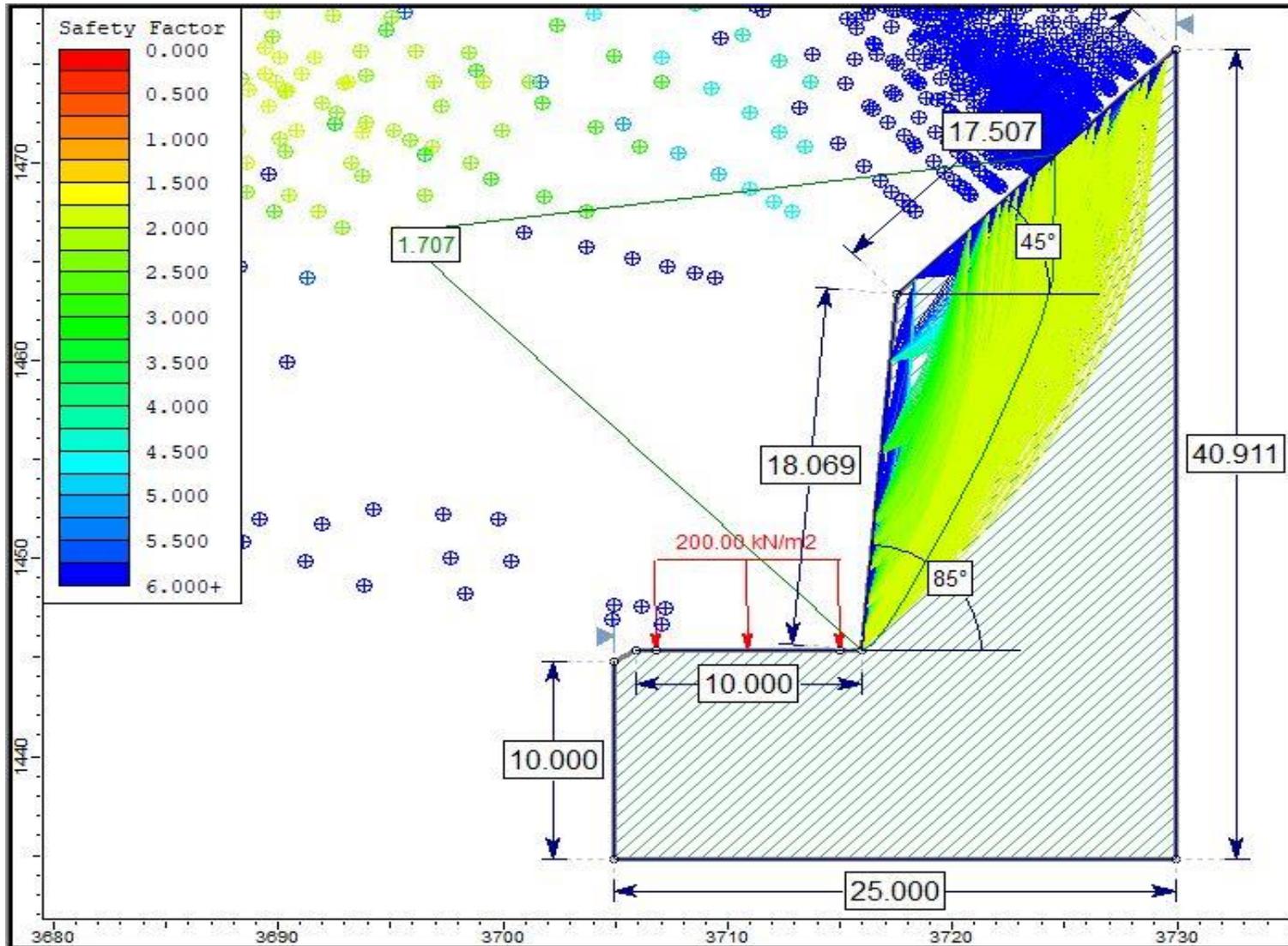


Figura 43. Talud 04-Análisis Slide en Condiciones Naturales.

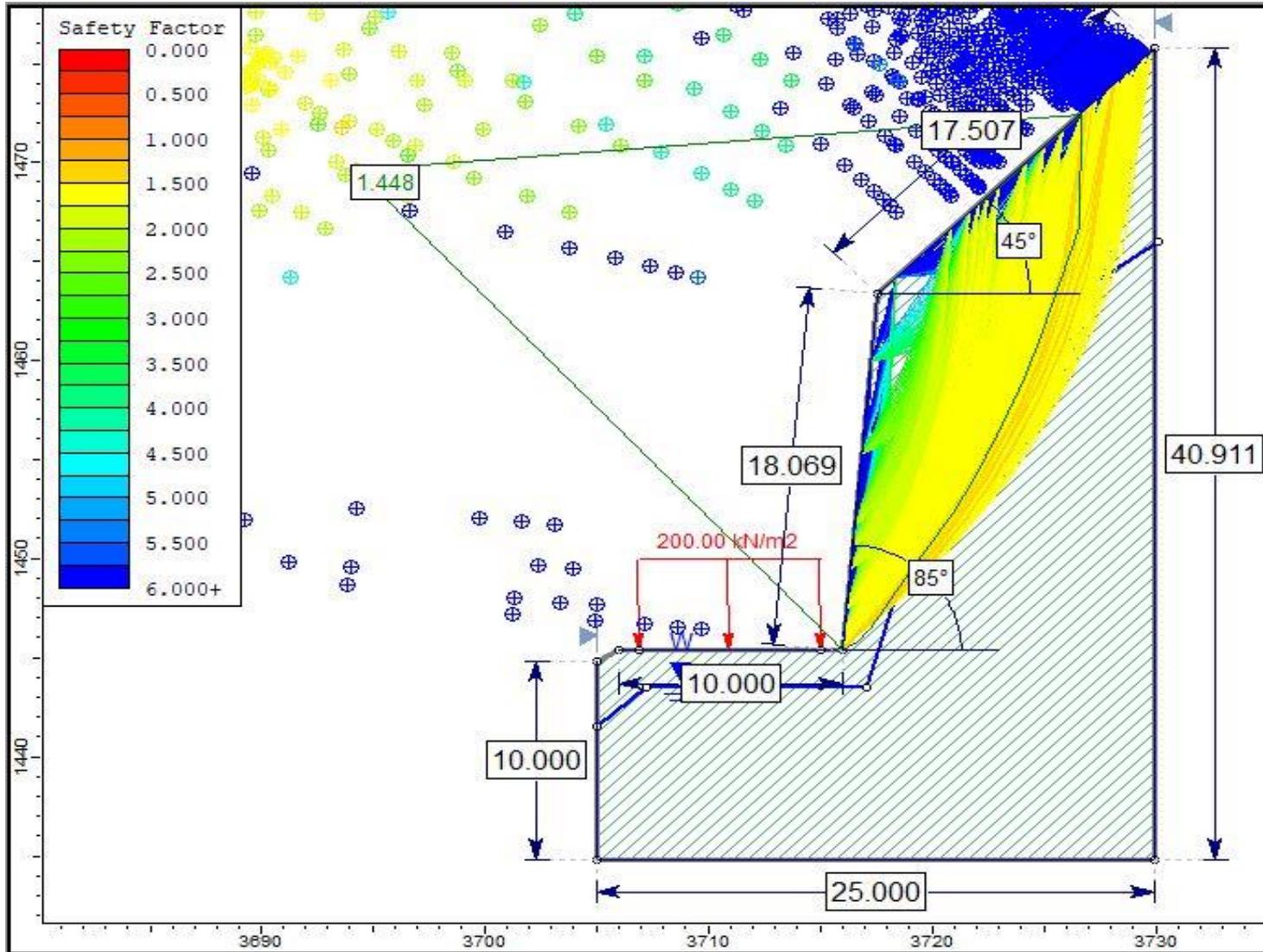


Figura 44. Talud 04-Análisis Slide en Condiciones de Saturación Parcial.

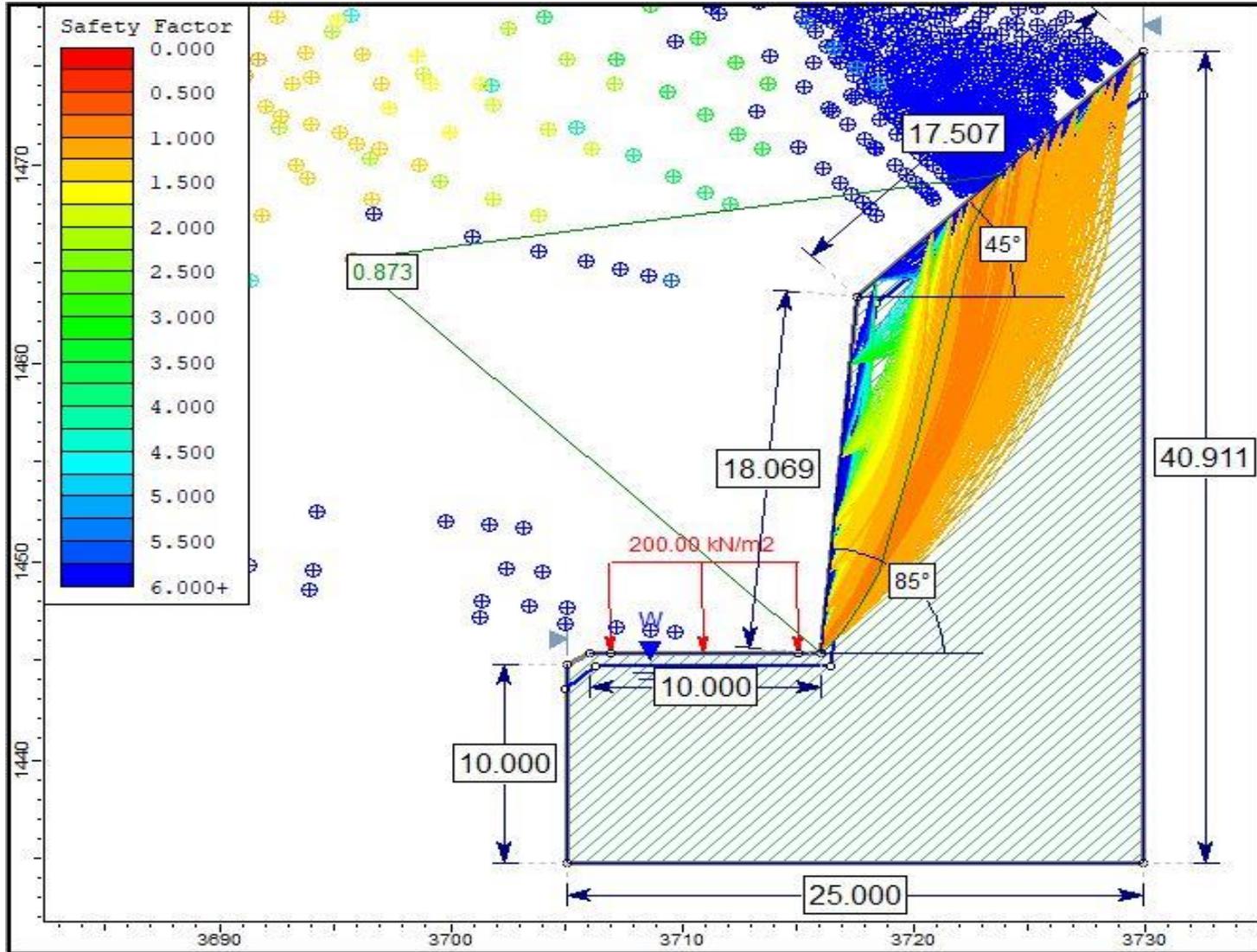


Figura 45. Talud 04-Análisis Slide en Condiciones de Saturación Total.



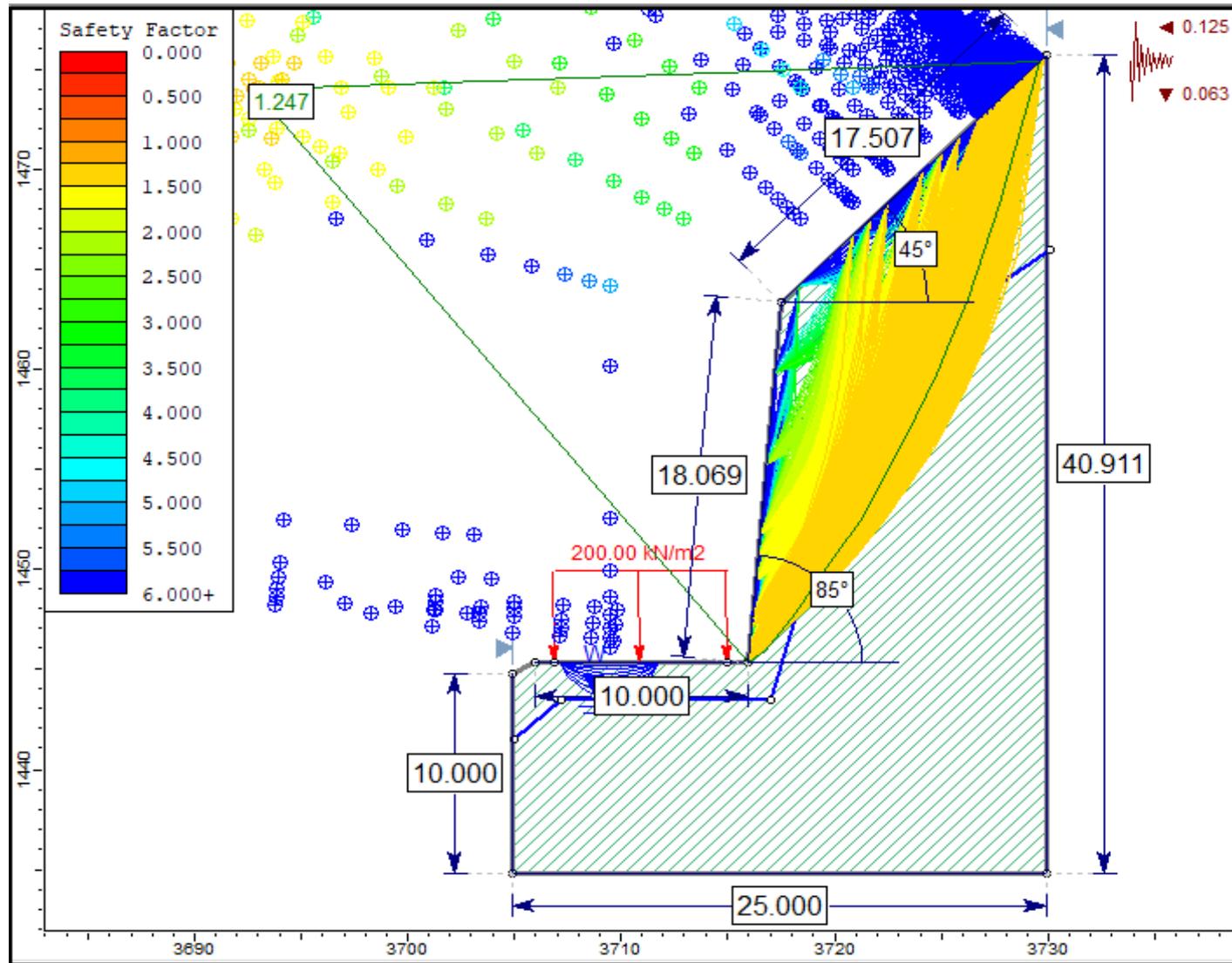


Figura 47. Talud 04-Análisis en Condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad.

### 3.9.5. TALUD O5

Se encuentra entre el Km 06+790-Km 06+860, Estratigráficamente pertenece a la Formación Chúlec (Ks-ch), constituida por calizas arenosas por intemperismo adquieren un color crema están moderadamente meteorizados y fracturados, tienen un su grosor de 200 a 250 m, de acuerdo a la cinemática de sus discontinuidades generan rotura tipo cuña.

Tabla 35. Talud O5- Coordenadas, orientación y geometría del talud.

DATUM		ZONA	COORDENADAS		COTA
WGS - 84	17 S		ESTE	NORTE	2403 m.s.n.m
			778045	9266323	
ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES			GEOMETRÍA DEL TALUD		
TIPO	DIP	DIP DIRECTION	ALTURA	10m	
ESTRATO	75	30	PIE	8 m	
FAMILIA 1	30	165	D	70	
FAMILIA 2	70	290	DD	155	

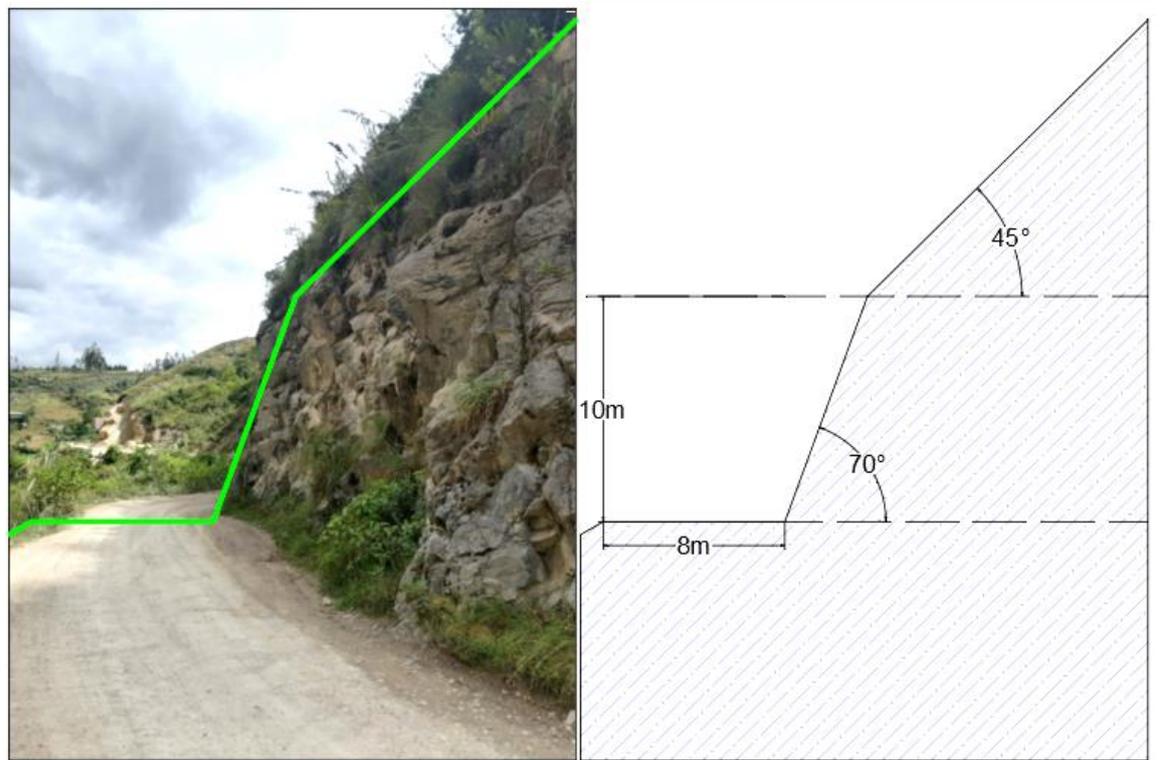


Figura 48. Talud O5-afloramiento de rocas calizas y perfil del talud.

Tabla 36. Talud 05-Valores del macizo rocoso.

<b>VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO (RMR)</b>							
<b>PARÁMETRO</b>	<b>RANGO DE VALORES Y VALORACIONES</b>					<b>Val</b>	
<b>Resistencia a compresión uniaxial (Mpa)</b>	> 250 (15)	250 – 100 (12)	100 – 50 (7)	50 – 25 (4)	< 25 (2) < 5 (1) < 1(0)	7	
<b>RQD (%)</b>	90 – 100 (20)	75 – 90 (17)	50 – 75 (13)	25 – 50 (8)	< 25 (3)	13	
<b>Espaciamiento</b>	> 2 m (20)	0.6 – 2 m (15)	0.2 – 0.6 m (10)	0.06 – 0.2 m (8)	< 0.06 m (5)	10	
<b>Condición de las Juntas</b>	<b>Persistencia</b>	< 1m (6)	1 – 3 m (4)	3 – 10 m (2)	10 – 20 m (1)	> 20 m (0)	4
	<b>Abertura</b>	Cerrada (6)	< 0.01 mm (5)	0.1 – 1.0 mm (4)	1 – 5 mm (1)	> 5mm (0)	5
	<b>Rugosidad</b>	Muy Rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Lisa (1)	Suave (0)	3
	<b>Relleno</b>	Ninguno (6)	Duro < 5 mm (4)	Duro > 5 mm (2)	Suave < 5 mm (1)	Suave > 5 mm (0)	4
	<b>Alteración</b>	Sana (6)	Lig. Alt (5)	Moder. Alt. (3)	Muy Alterada (1)	Descompuesta (0)	3
<b>AGUA SUBTERRANEA</b>	Seco (15)	Ligeramente Húmedo (10)	Húmedo (7)	Goteando (4)	Agua Fluyendo (0)	10	
<b>VALOR TOTAL RMR</b>						<b>58</b>	

Hallamos el RQD con la fórmula de Priest y Hudson (1976) con los valores determinado en campo (ver Tabla 37).

Tabla 37. Talud 05-Cálculo del RQD.

CÁLCULO DEL RQD				
$RQD = 100e^{-0.1\gamma(0.1\gamma+1)}$	ND	L(m)	$\lambda$	RQD
	33	2.5	13.2	61.90

Para calcular el GSI de Hoek (2014), se reemplaza en la fórmula de la Tabla 38, la cual está en función del RMR de Bieniawski (1989).

Tabla 38. Talud 05-Cálculo del GSI.

CÁLCULO DEL GSI		
$GSI = RMR_{89} - 5$	RMR	GSI
	58	53

Las propiedades Geomecánicas como los parámetros de entrada y de salida se indican en la Tabla 39 y Figura 49, la Cinemática de las discontinuidades se indican en la Figura 50, por ultimo los factores de seguridad de los escenarios probabilísticos planteados se indican en las Figuras 51-55.

Tabla 39. Talud 05-Propiedades Geomecánicas Fm Chúlec.

PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE LA FORMACIÓN CHULEC					
PARÁMETROS DE ENTRADA (Clasificación de Hook—Brown)		PARÁMETROS DE SALIDA			
Sigci ( $\sigma$ )	80Mpa	CRITERIO DE HOOK-BROWN	mb	0.372	
GSI	42		s	0.0002	
Mi	9		a	0.510	
D	0.7	PARAMETROS DE MOHR-COULOMB EQUIVALENTES	c	0.185	Mpa
Ei	72000Mpa		$\phi$	52.27°	
MR	900	PÁRAMETROS DEL MACIZO ROCOSO	sigt	-0.0481	Mpa
			sigc	1.100	Mpa
			sigcm	6.214	Mpa
			Erm	4703.17	Mpa

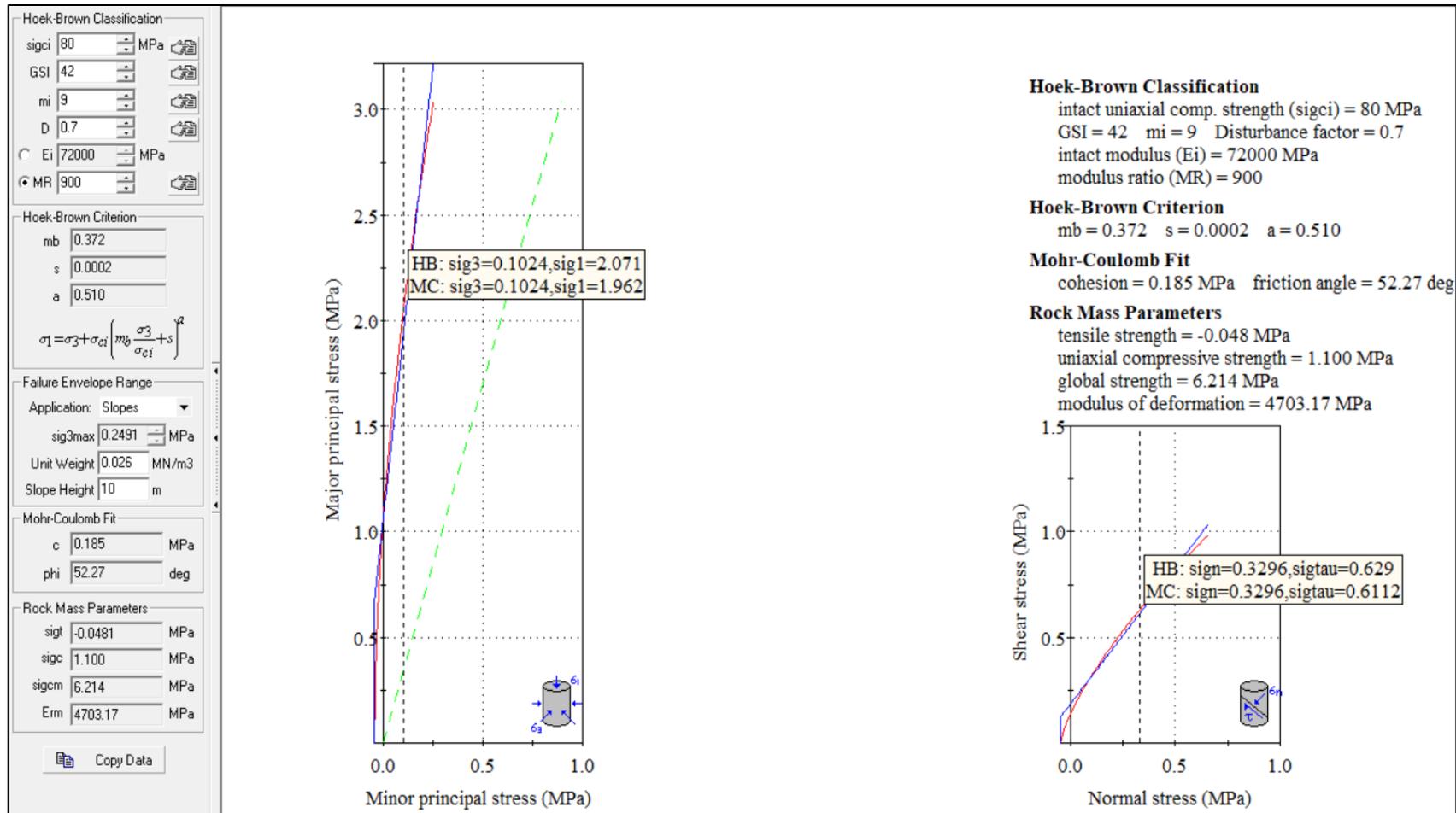


Figura 49. Talud 05-Propiedades Geomecánicas de las calizas en la Fm. Chúlec.

Rotura tipo cuña. Primera condición, las intersecciones de la familia 1 y la familia 2 caen dentro del ángulo de fricción interna; segunda condición, el buzamiento de la intersección de las discontinuidades ( $\psi_i$ ) es mayor que el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) y menor que el buzamiento del talud ( $\psi_f$ ), cumpliéndose la siguiente desigualdad  $\phi < \psi_i < \psi_f$ .

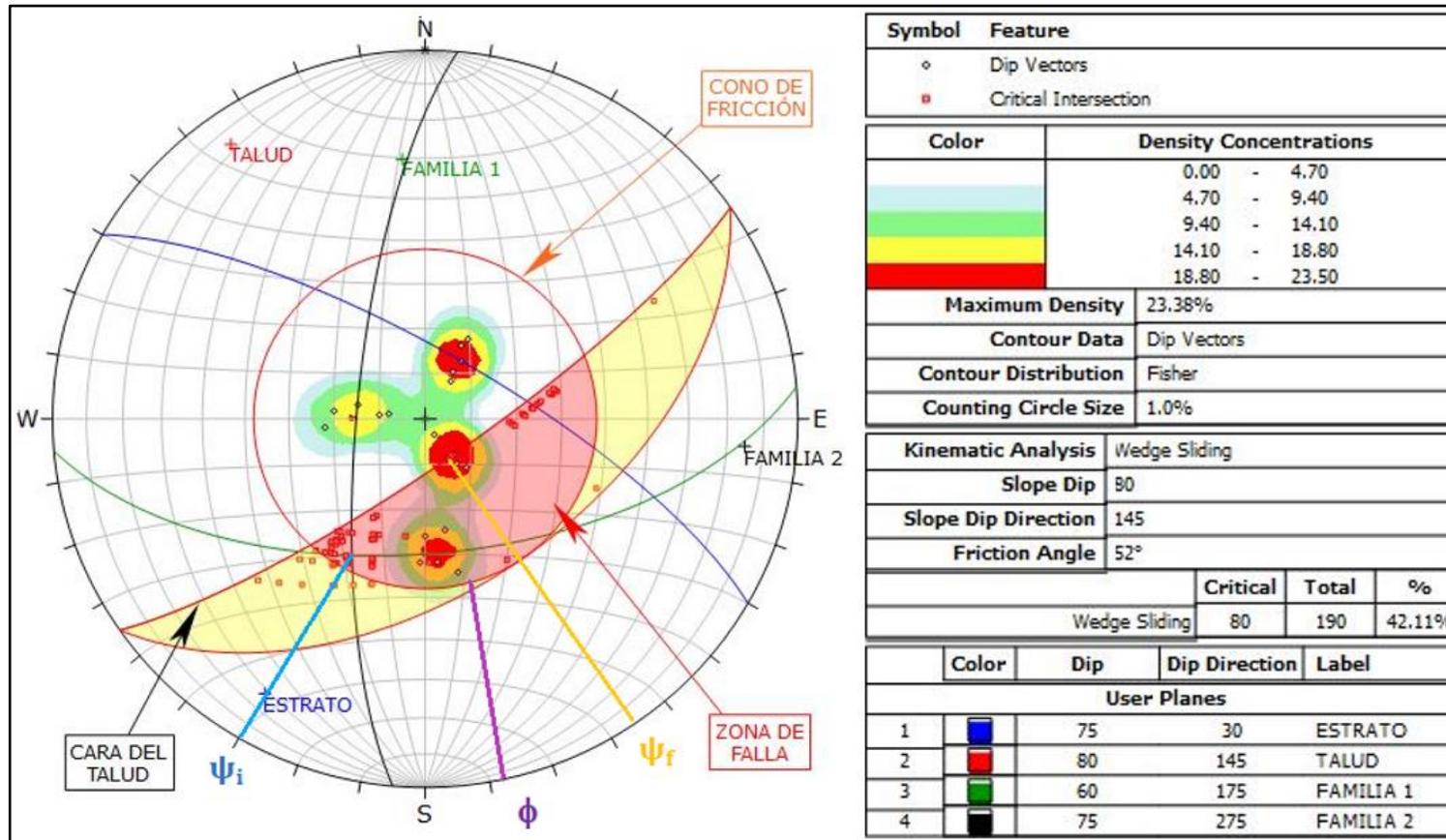


Figura 50. Talud 05-Análisis Cinemático, indican probabilidad de rotura tipo cuña.

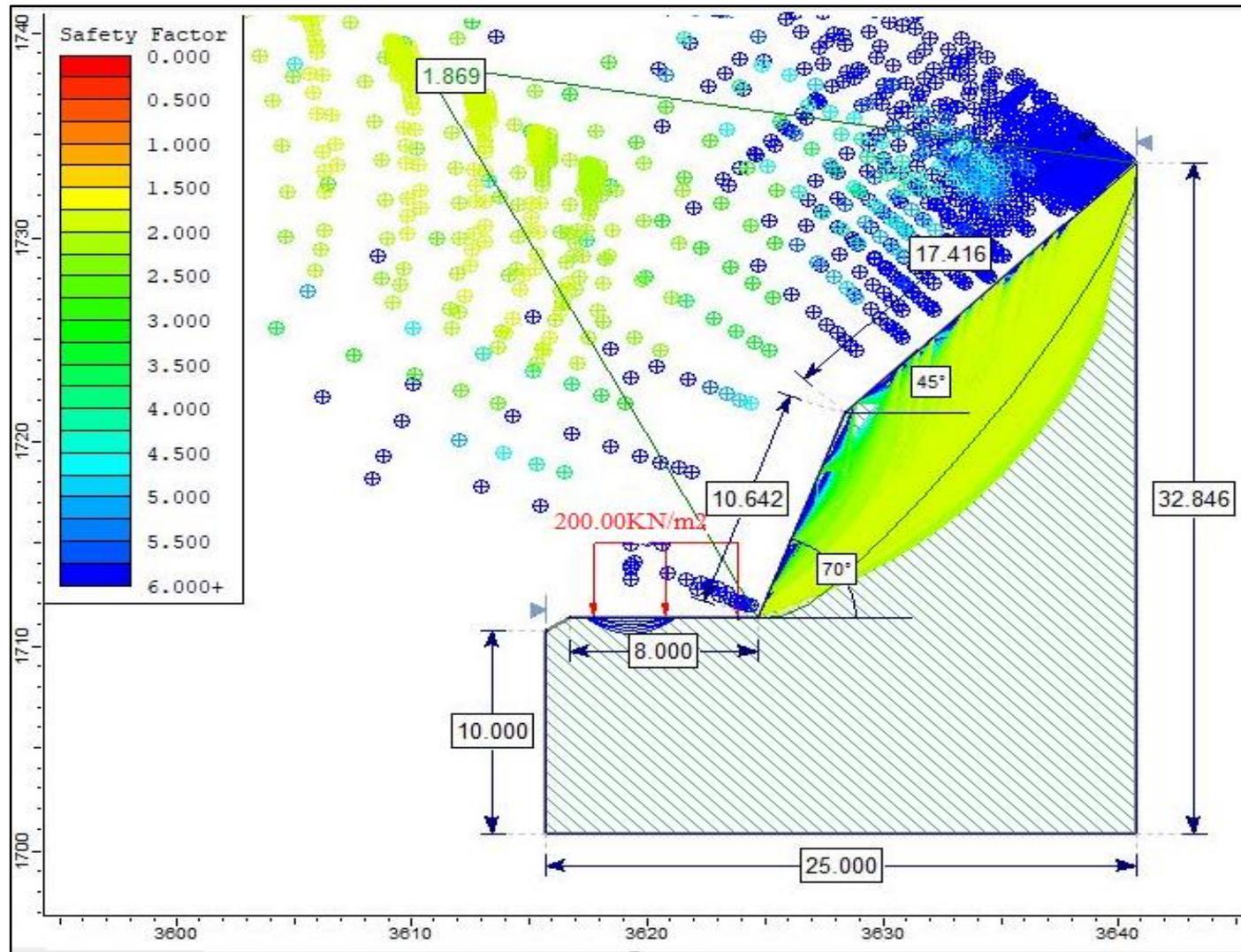


Figura 51. Talud 05-Análisis Slide en Condiciones Naturales.

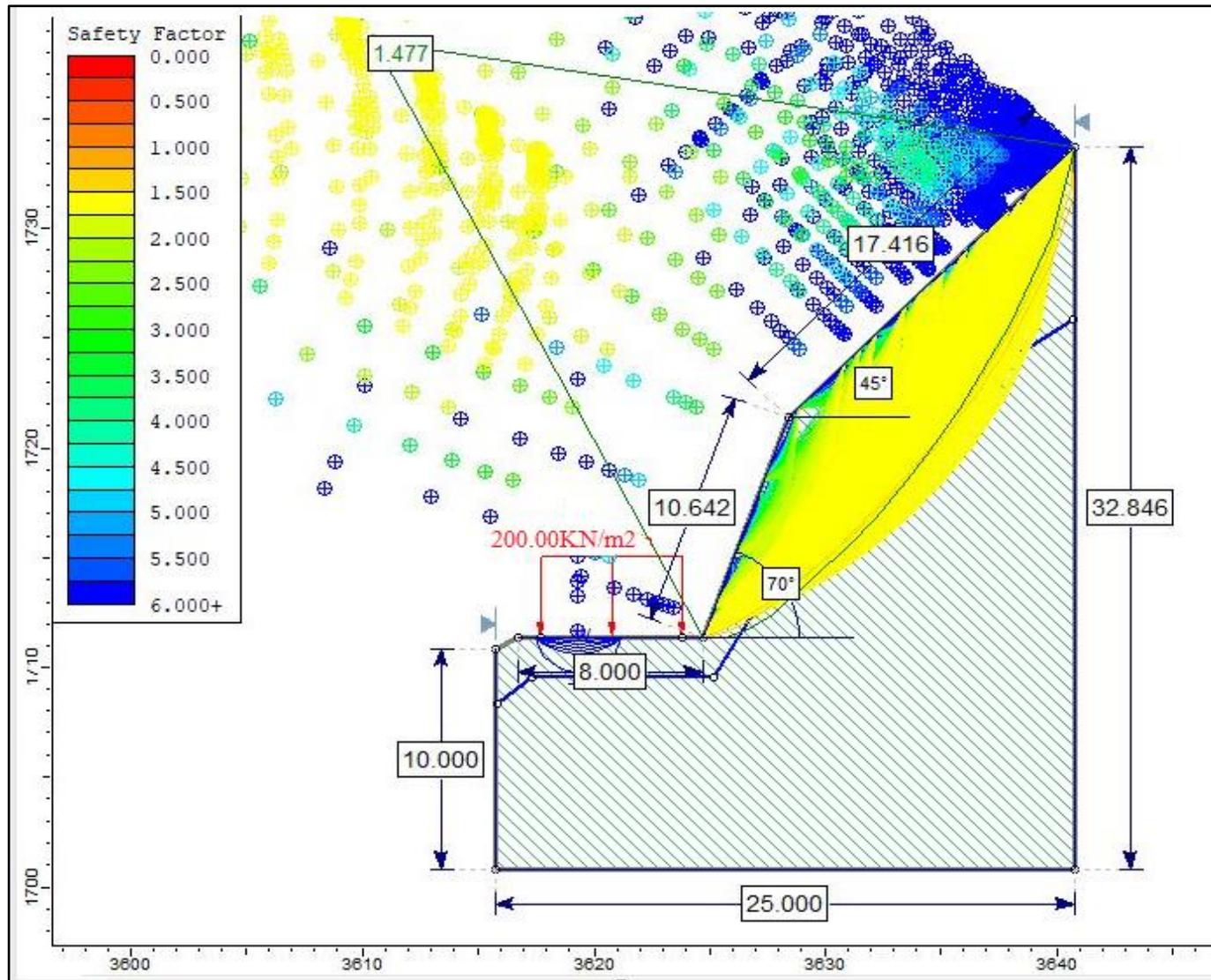


Figura 52. Talud 05-Análisis Slide en Condiciones de Saturación Parcial.



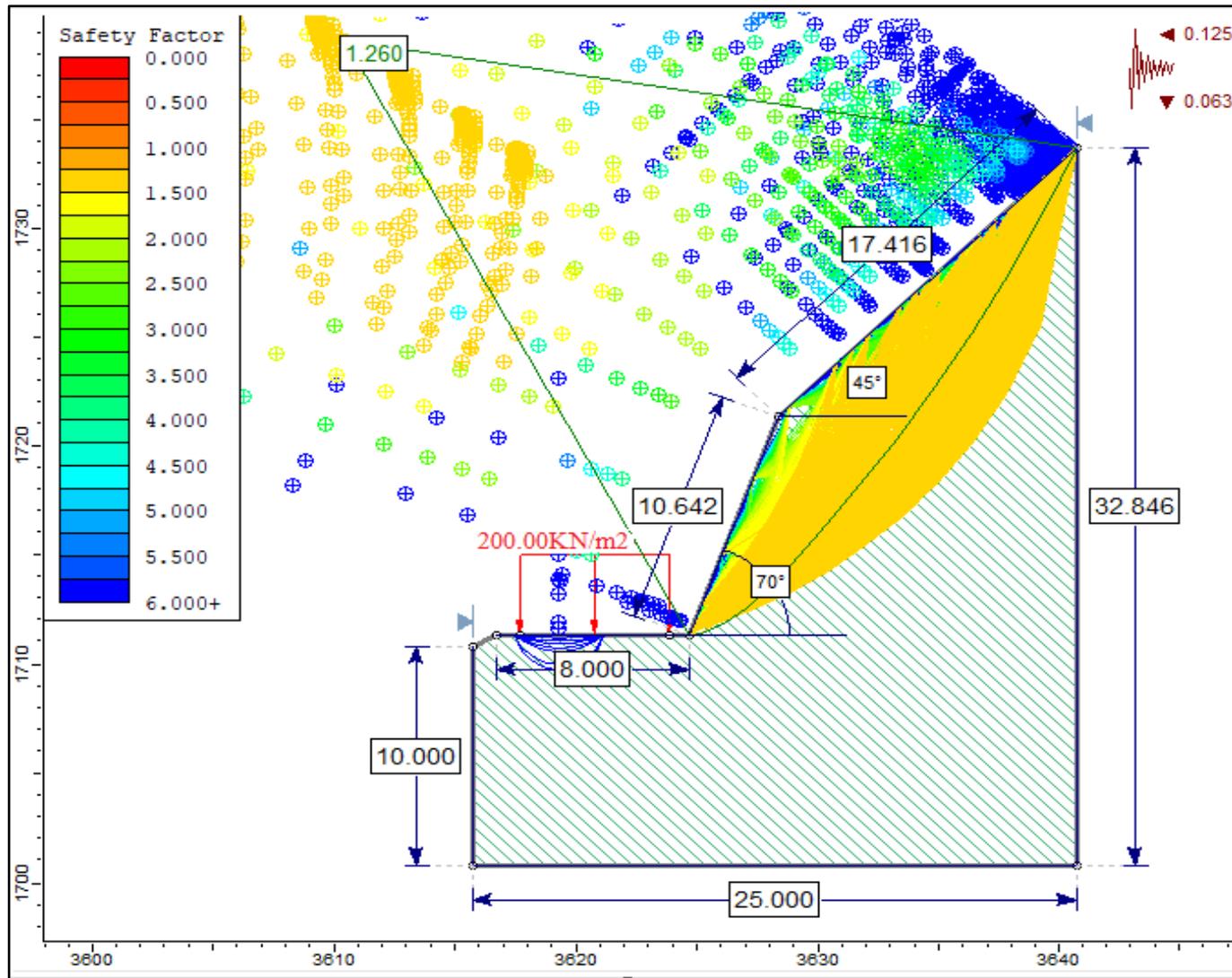


Figura 54. Talud 05-Análisis Slide en Condiciones de Sismicidad Máxima.

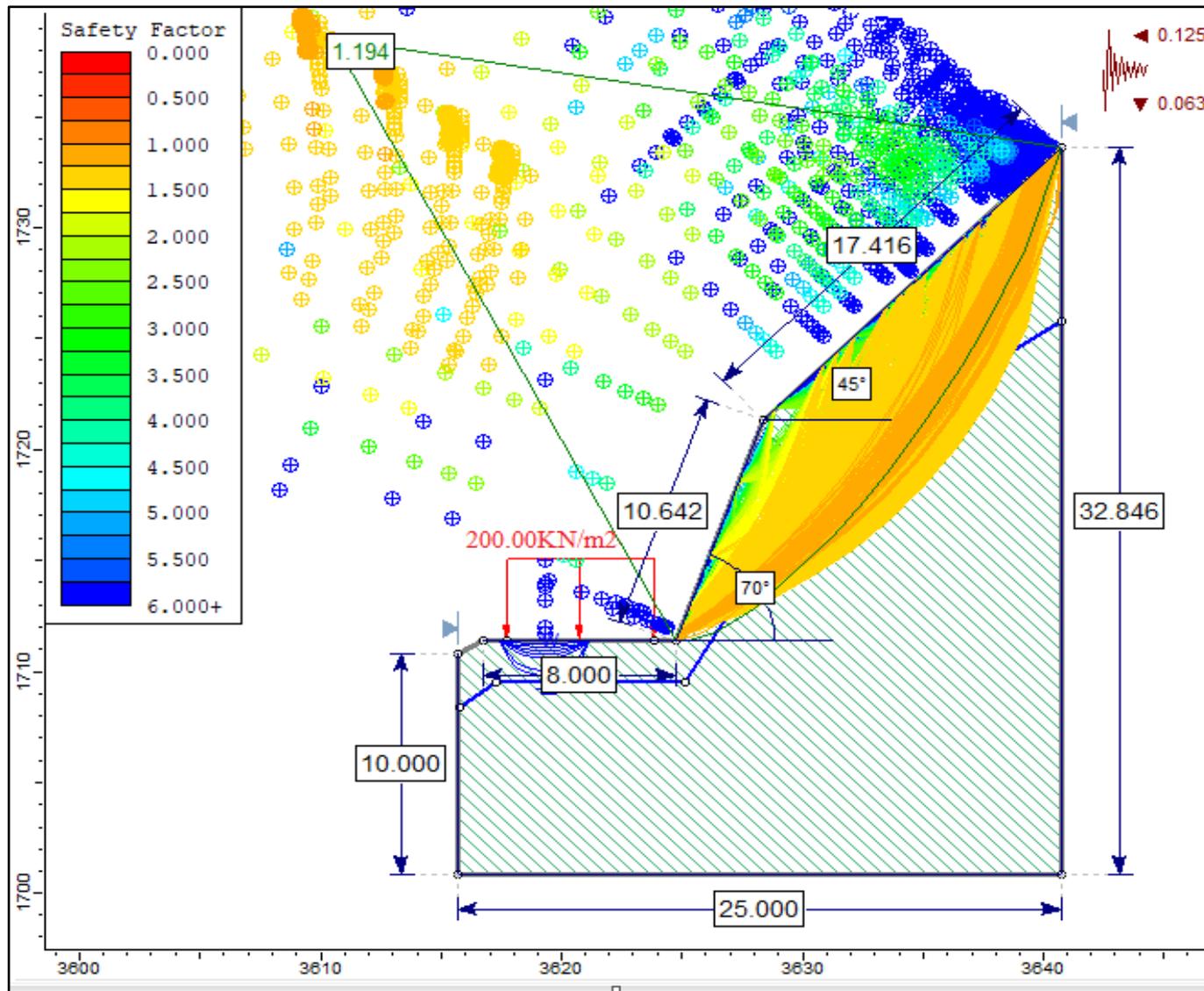


Figura 55. Talud 05-Análisis Slide en Condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad Máxima.

### 3.9.6. TALUD O6

Este talud se encuentra entre el Km 04+345-Km 04+395, estratigráficamente pertenece a la Formación Cajamarca (Ks-ca), constituida por calizas de coloración gris bastante macizas están levemente alteradas y meteorizadas, presentan estratificación subvertical y de acuerdo al análisis cinemático de sus discontinuidades en proyecciones estereográficas generan roturas tipo cuña.

Tabla 40. Talud O6- Coordenadas, orientación y geometría del talud.

DATUM		ZONA	COORDENADAS		COTA
WGS - 84		17 S	ESTE	NORTE	2433 m.s.n.m
			776801	9264691	
ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES			GEOMETRÍA DEL TALUD		
TIPO	DIP	DIP DIRECTION	ALTURA	17m	
ESTRATO	70	45	PIE	8 m	
FAMILIA 1	55	155	D	80	
FAMILIA 2	45	310	DD	165	

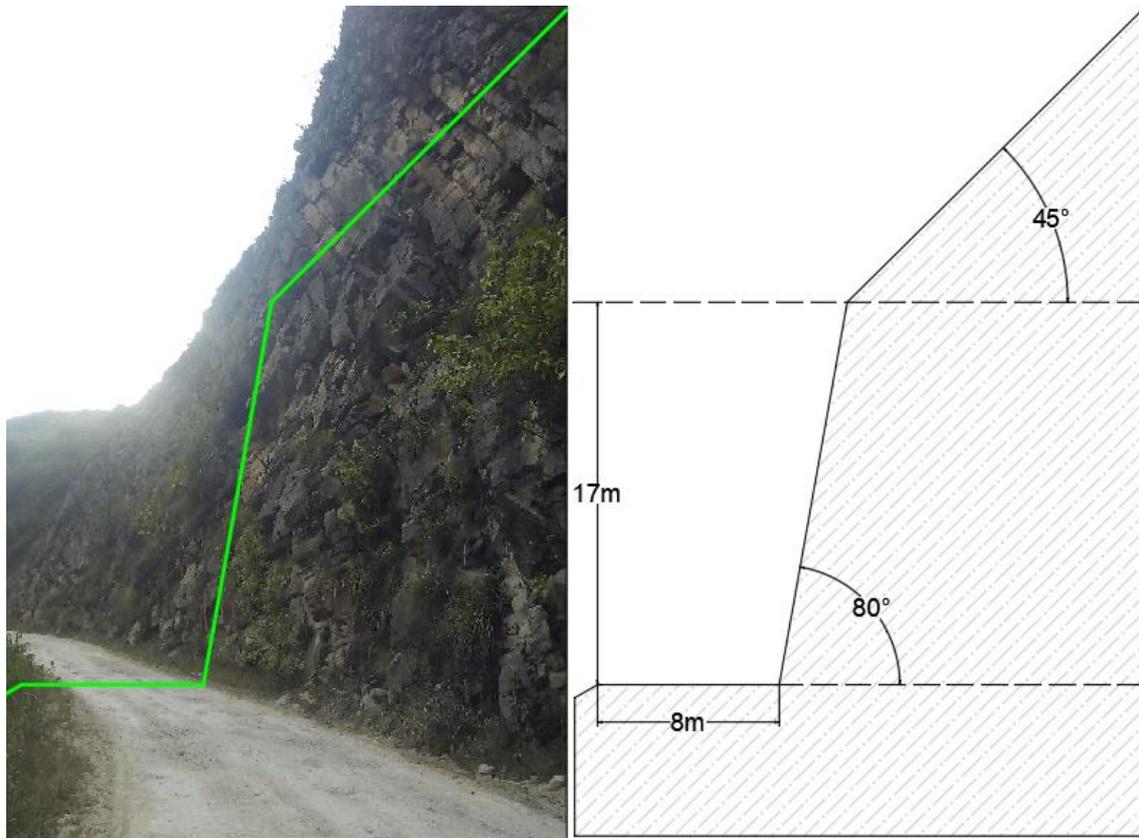


Figura 56. Talud O6-afloramiento de rocas calizas y perfil del talud.

Tabla 41. Talud 06-Valores del macizo rocoso.

<b>VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO (RMR)</b>							
<b>PARÁMETRO</b>	<b>RANGO DE VALORES Y VALORACIONES</b>					<b>Val</b>	
<b>Resistencia a compresión uniaxial (Mpa)</b>	> 250 (15)	250 – 100 (12)	100 – 50 (7)	50 – 25 (4)	< 25 (2) < 5 (1) < 1(0)	7	
<b>RQD (%)</b>	90 – 100 (20)	75 – 90 (17)	50 – 75 (13)	25 – 50 (8)	< 25 (3)	13	
<b>Espaciamiento</b>	> 2 m (20)	0.6 – 2 m (15)	0.2 – 0.6 m (10)	0.06 – 0.2 m (8)	< 0.06 m (5)	10	
<b>Condición de las Juntas</b>	<b>Persistencia</b>	< 1m (6)	1 – 3 m (4)	3 – 10 m (2)	10 – 20 m (1)	> 20 m (0)	2
	<b>Abertura</b>	Cerrada (6)	< 0.01 mm (5)	0.1 – 1.0 mm (4)	1 – 5 mm (1)	> 5mm (0)	5
	<b>Rugosidad</b>	Muy Rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Lisa (1)	Suave (0)	3
	<b>Relleno</b>	Ninguno (6)	Duro < 5 mm (4)	Duro > 5 mm (2)	Suave < 5 mm (1)	Suave > 5 mm (0)	4
	<b>Alteración</b>	Sana (6)	Lig. Alt (5)	Moder. Alt. (3)	Muy Alterada (1)	Descompuesta (0)	5
<b>AGUA SUBTERRANEA</b>	Seco (15)	Ligeramente Húmedo (10)	Húmedo (7)	Goteando (4)	Agua Fluyendo (0)	10	
<b>VALOR TOTAL RMR</b>						<b>59</b>	

Hallamos el RQD con la fórmula de Priest y Hudson (1976) con los valores determinado en campo (ver Tabla 42).

Tabla 42. Talud 06-Cálculo del RQD.

CÁLCULO DEL RQD				
$RQD = 100e^{-0.1\gamma(0.1\gamma+1)}$	ND	L(m)	$\lambda$	RQD
	31	2	15.5	54.12

Para calcular el GSI de Hoek (2014), se reemplaza en la fórmula de la Tabla 43, la cual está en función del RMR de Bieniawski (1989).

Tabla 43. Talud 06-Cálculo del GSI.

CÁLCULO DEL GSI			
$GSI = RMR_{89} - 5$		RMR	GSI
		59	54

Las propiedades Geomecánicas como los parámetros de entrada y de salida se indican en la Tabla 44 y Figura 57, la Cinemática de las discontinuidades se indican en la Figura 58, por ultimo los factores de seguridad de los escenarios probabilísticos planteados se indican en las Figuras 59-63.

Tabla 44. Talud 06-Propiedades Geomecánicas Fm. Cajamarca.

PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE LA FORMACIÓN CAJAMARCA					
PARÁMETROS DE ENTRADA (Clasificación de Hook—Brown)		PARÁMETROS DE SALIDA			
Sigci ( $\sigma$ )	75Mpa	CRITERIO DE HOOK-BROWN	mb	0.352	
GSI	41		s	0.0002	
Mi	9		a	0.511	
D	0.7	PARAMETROS DE MOHR-COULOMB EQUIVALENTES	c	0.204	Mpa
Ei	67500Mpa		$\phi$	48.18°	
MR	900	PÁRAMETROS DEL MACIZO ROCOSO	sigt	-0.0412	Mpa
			sigc	0.952	Mpa
			sigcm	5.639	Mpa
			Erm	4160.40	Mpa

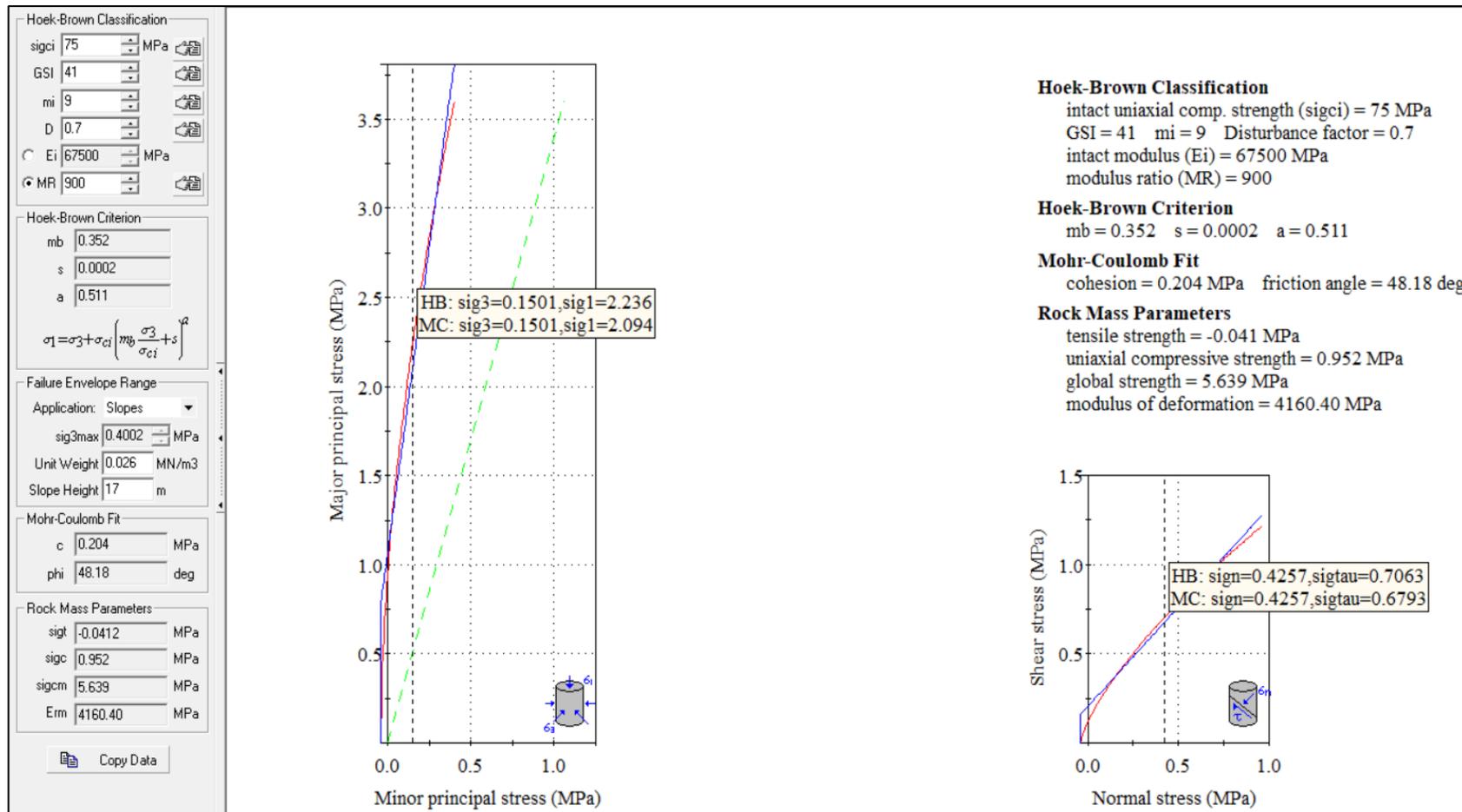


Figura 57. Talud 06-Propiedades Geomecánicas de la caliza en la Fm. Cajamarca.

Rotura tipo cuña. Primera condición, las intersecciones de la familia 1 y el estrato caen dentro del ángulo de fricción interna; segunda condición, el buzamiento de la intersección de las discontinuidades ( $\psi_i$ ) es mayor que el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) y menor que el buzamiento del talud ( $\psi_f$ ), cumpliéndose la siguiente desigualdad.  $\phi < \psi_i < \psi_f$

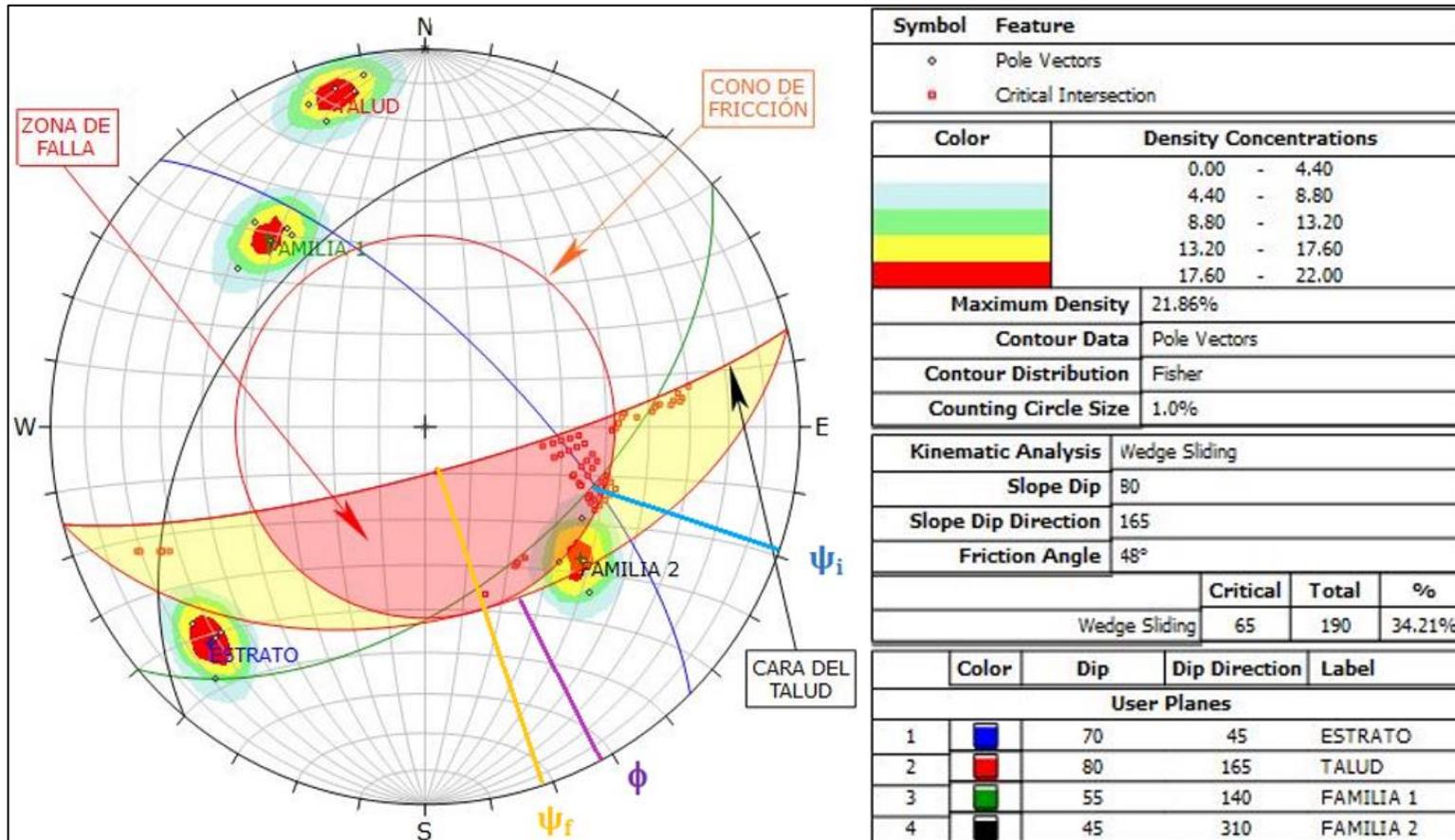


Figura 58. Talud 06-Análisis Cinemático, indican probabilidad de rotura tipo cuña.

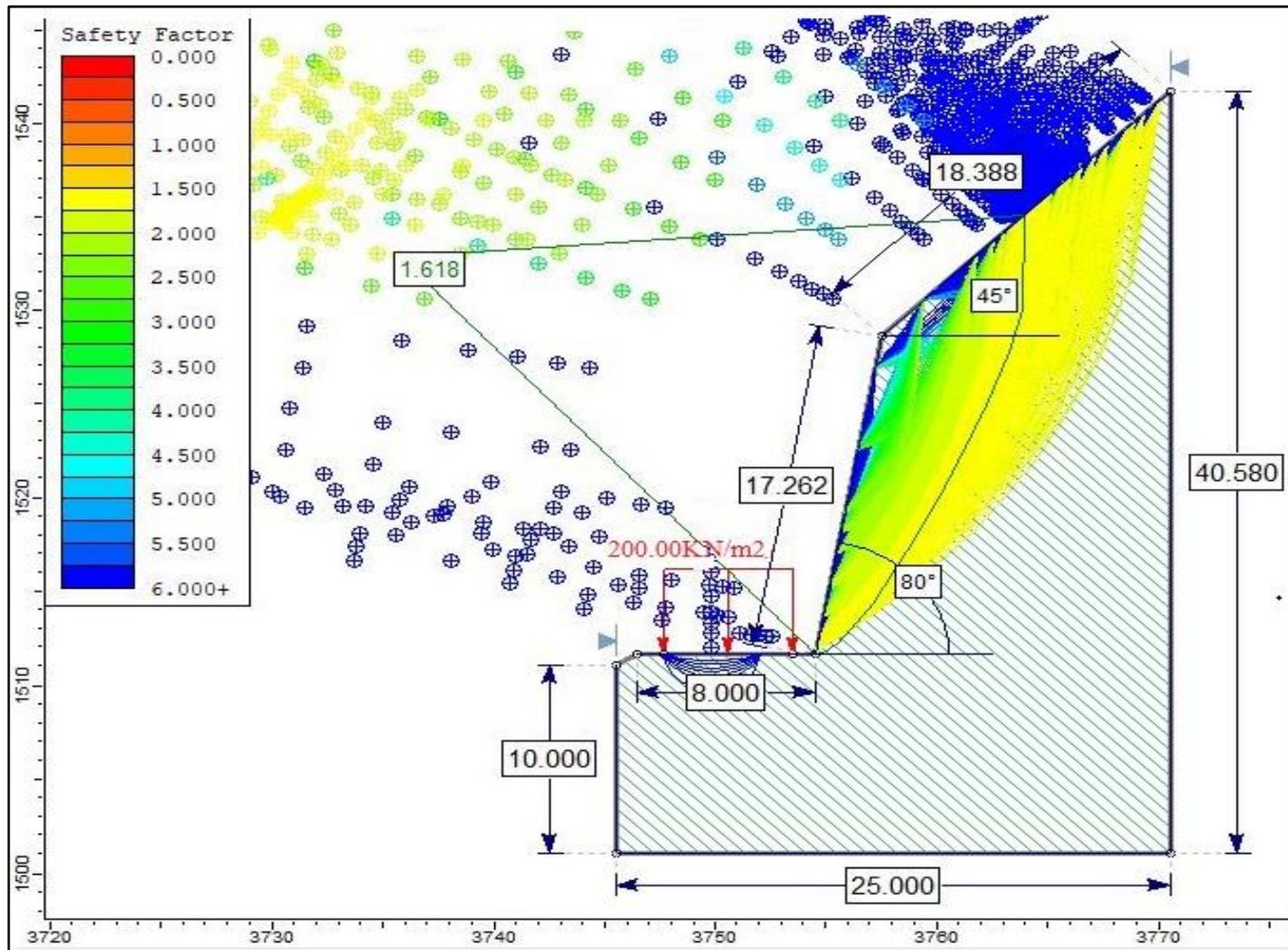


Figura 59. Talud 06-Análisis en Condiciones Naturales.

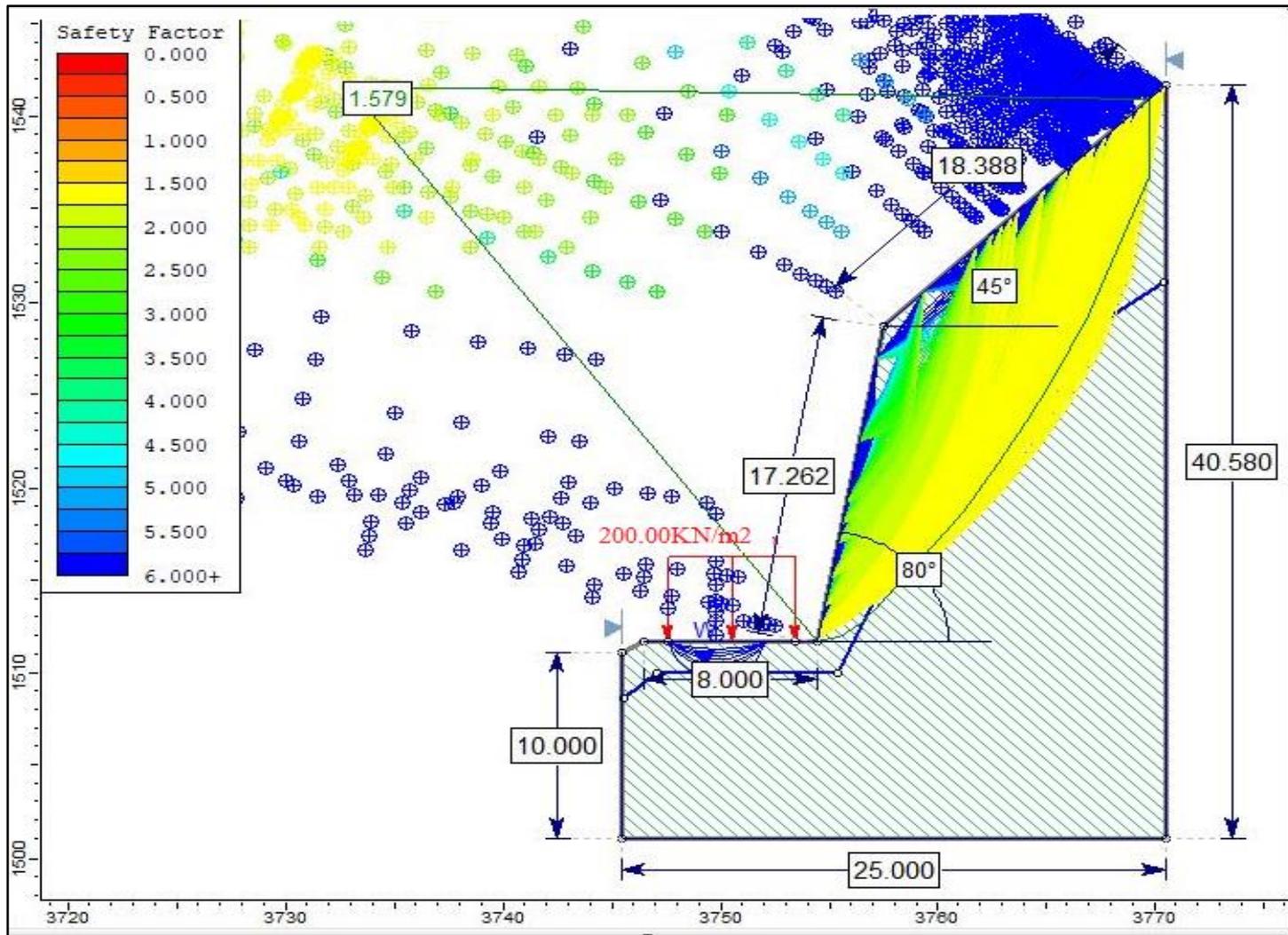


Figura 60. Talud 06-Análisis en Condiciones de Saturación Parcial.

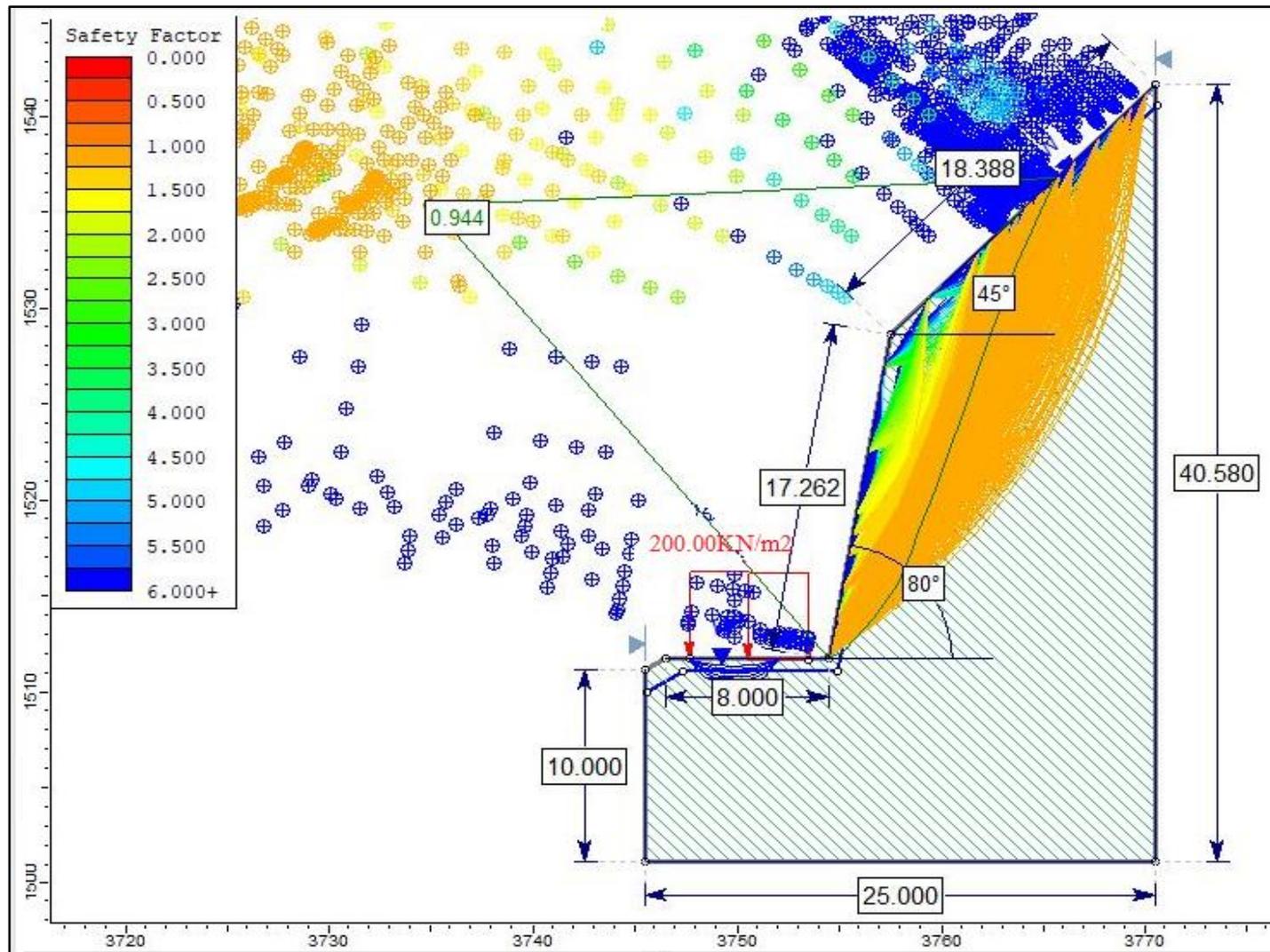


Figura 61. Talud 06-Análisis en Condiciones de Saturación Total.

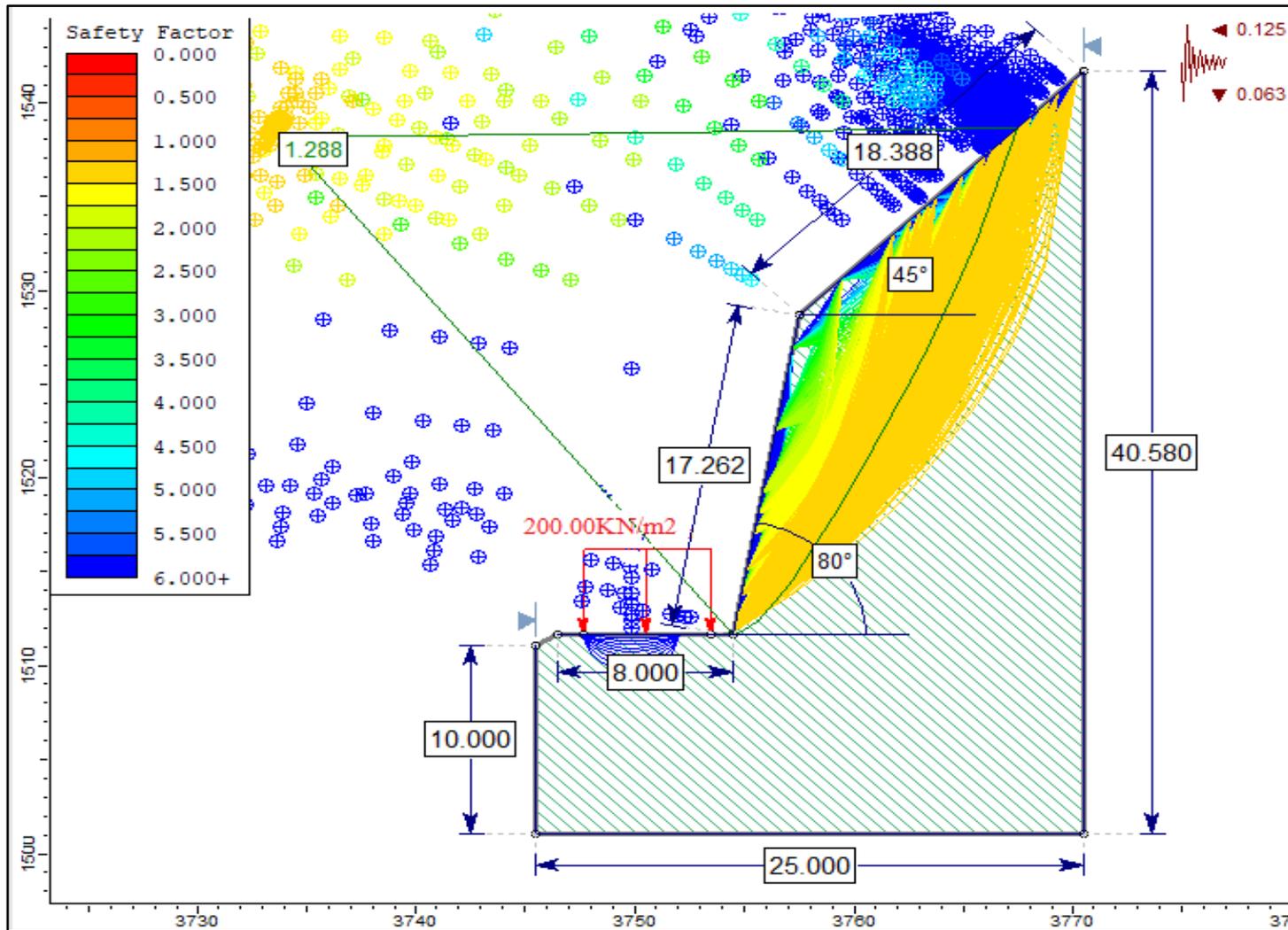


Figura 62. Talud 06-Análisis en Condiciones de Sismicidad Máxima.

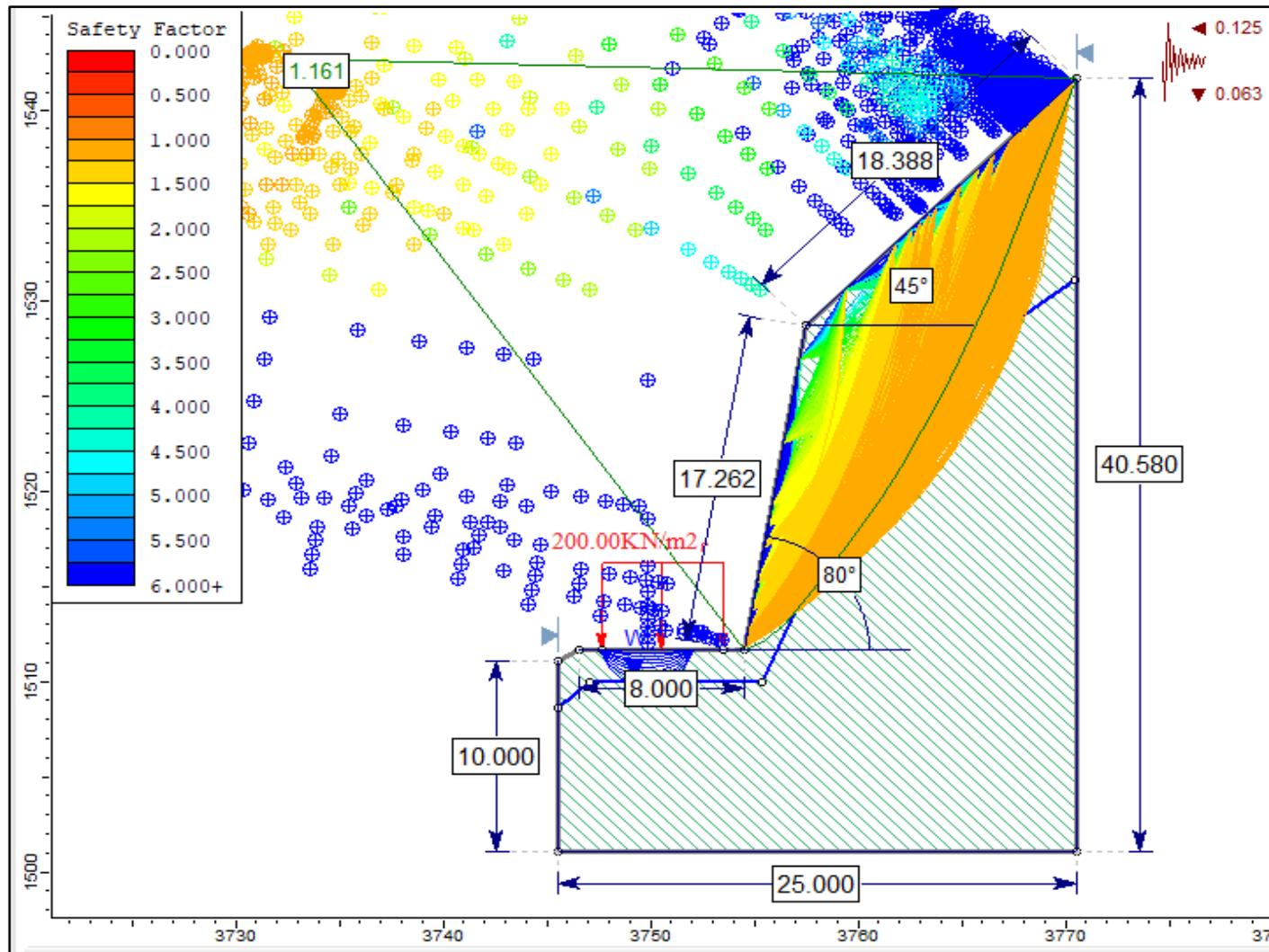


Figura 63. Talud 06-Análisis en Condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad Máxima.

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. RESULTADOS

Se evaluaron seis taludes a lo largo de la carretera Ahijadero – Santa Rosa, los cuales de acuerdo al análisis Geotécnico presentan inestabilidad, las rocas presente en el área de investigación consta de areniscas, lutitas grises, calizas y depósitos cuaternarios de tipo aluvial y fluvial de la secuencia estratigráfica del Grupo Goyllarisquizga, Formación Chúlec, Puilliucana y Cajamarca(Plano 05), de acuerdo a la clasificación de unidades morfogénicas de Rodriguez,2014 se reconocieron unidades geomorfológicas como planicies, lomadas, laderas y escarpas(Plano 04).

Se ha elaborado perfiles transversales en los seis puntos críticos a lo largo de la carretera, describiendo la altura, inclinación y dirección del plano del talud, los cuales influyen para determinar el factor de seguridad e inestabilidad del talud.

Tabla 45. Columna estratigráfica de la zona de investigación.

LEYENDA						
ERATEMA	SISTEMA	SERIE	PISO	UNIDADES LITOSTRATIGRÁFICAS		
CENOZOICO	CUATERNARIO	RECIENTE		Depósitos Fluviales	Q-fl	
				Depósitos Aluviales	Q-al	
MESOZOICA	CRETACEO	MEDIO	Turoniano	Fm. Cajamarca	ks-ca	
			Cenomaniano	Gpo. Pullucana	ks-pu	
			Albiano	Fm. Chúlec	ki-chu	
		INFERIOR	Gpo. Goyllarisquizga	Aptiano	Fm. Farrat	ki-f
				Barremiano Hauteriviano	Fm. Carhuaz	ki-ca
				Valanginiano	Fm. Chimú	ki-chi

#### 4.1.1. Análisis Geomecánico

- De acuerdo al análisis del RQD y grado de fracturamiento se tiene roca de calidad regular están entre 50-75% (ver Tabla 46).

Tabla 46. Resumen del RQD de cada talud.

TALUD	$\lambda$	RQD	CALIDAD
N°01	30 Dis/2m	55.7%	Regular
N°02	34Dis/2.5m	60.5%	Regular
N°03	27 Dis/2m	60.9%	Regular
N°04	31 Dis/2m	54.1%	Regular
N°05	33Dis/2.5m	61.9%	Regular
N°06	31 Dis/2m	54.1%	Regular

- De acuerdo a la caracterización Geomecánica RMR<sub>89</sub>, tenemos roca de calidad regular, cuyos valores están dentro del rango de 41 – 6 (ver Tabla 47).

Tabla 47. Resumen del RMR de cada talud.

TALUD	RMR <sub>89</sub>	CLASE	CALIDAD
N°01	57	III	Regular
N°02	57	III	Regular
N°03	59	III	Regular
N°04	59	III	Regular
N°05	58	III	Regular
N°06	59	III	Regular

- En cuanto al GSI tenemos valores desde 57 a 59, los cuales definen bloques formados por 3 familias de discontinuidades (ver Tabla 48).

Tabla 48. Resumen del GSI de cada talud.

GSI = RMR <sub>89</sub> – 5		
TALUD	RMR	GSI
N°01	57	52
N°02	57	52
N°03	59	54
N°04	59	54
N°05	58	53
N°06	59	54

➤ Propiedades Geomecánicas de las Rocas.

Para determinar las propiedades mecánicas de las rocas, se utilizó el software RocData v.4.0, el cual se basa en los criterios de Hoek - Brown y Mohr - Coulomb. Los parámetros de entrada son: compresión uniaxial Sigci ( $\sigma_{ci}$ ), GSI, la constante del material (mi), la cual depende del tipo de roca; factor de perturbación del macizo rocoso (D); se considera el valor de 0.7 recomendado para taludes; el módulo de elasticidad de la roca intacta (Ei); valor de la relación modular depende del tipo de roca y su textura (MR) (ver Tabla 49).

Tabla 49. Resumen Parámetros de entrada para cada Talud.

Talud	$\sigma_{ci}$ (MPa)	GSI	Mi	D	Ei (MPa)	MR
N°01	80	43	17	0.7	22000	275
N°02	70	38	17	0.7	19250	275
N°03	75	40	17	0.7	20625	275
N°04	75	43	17	0.7	26625	275
N°05	80	42	9	0.7	72000	900
N°06	75	41	9	0.7	67500	900

Por otro lado, los parámetros de salida que arroja el software RocData v.4.0 son: criterio de rotura generalizado de Hoek & Brown ( $mb$ ,  $s$  y  $a$ ); la cohesión y ángulo de fricción de Mohr-Coulomb equivalente ( $c$  y  $\phi$ ); y los parámetros del macizo rocoso ( $\sigma_t$ ,  $\sigma_c$ ,  $\sigma_{cm}$ ,  $E_{rm}$ ) (ver Tabla 50).

Tabla 50. Resumen de Parámetros de Salida de cada Talud.

Talud	Parámetros Criterio de Rotura Generalizado de Hoek - Brown			Parámetros de Mohr - Coulomb equivalente		Parámetros del Macizo Rocosos			
	$mb$	$s$	$a$	$c$ (MPa)	$\phi$	$\sigma_t$ (MPa)	$\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_{cm}$ (MPa)	$E_{rm}$ (MPa)
N°01	0.742	0.0003	0.509	0.227	55.44°	-0.0279	1.191	8.834	1524.77
N°02	0.564	0.0001	0.513	0.156	53.93°	-0.0156	0.697	6.583	1004.65
N°03	0.629	0.0002	0.511	0.209	53.01°	-0.0199	0.879	7.528	1201.00
N°04	0.742	0.0003	0.509	0.240	53.90°	-0.0261	1.117	8.282	1429.47
N°05	0.372	0.0002	0.510	0.185	52.27°	-0.0481	1.100	6.214	4703.17
N°06	0.352	0.0002	0.511	0.204	48.18°	-0.0412	0.952	5.639	4160.40

#### 4.1.2. Cinemática de las Discontinuidades

Para la toma de datos utilizamos un registro Geotécnico de Tolentino, 2008, con el protocolo Dip(D) y Dip Direction (DD), los datos se han procesado con el software Dips v.6, los mismos que de acuerdo a la evaluación cinemática de tres discontinuidades en proyecciones estereográficas tenemos roturas tipo planar y cuña principalmente a lo largo de la carretera Ahijadero-Santa Rosa (ver Tabla 51).

Tabla 51. Análisis con software Dips v.6.0 para cada Talud.

Talud	Litología	Familia	Orientación		Ángulo de Fricción	Análisis Cinemático	
			Dip	Dip Dirección		Rotura Planar %	Rotura en Cuña%
N°01	Arenisca	Estrato	30	265	55°	29.1	33.16
		Familia 01	80	10			
		Familia 02	85	120			
		Talud	80	340			
N°02	Arenisca	Estrato	65	300	54°	10	29.1
		Familia 01	70	195			
		Familia 02	60	15			
		Talud	75	345			
N°03	Arenisca	Estrato	50	205	53°	-	21.58
		Familia 01	75	325			
		Familia 02	70	95			
		Talud	70	360			
N°04	Arenisca	Estrato	25	285	54°	-	23.81
		Familia 01	75	90			
		Familia 02	70	145			
		Talud	85	115			
N°05	Caliza	Estrato	75	30	52°	-	42.11
		Familia 01	60	175			
		Familia 02	75	275			
		Talud	80	145			
N°06	Caliza	Estrato	70	45	48°	-	34.21
		Familia 01	55	140			
		Familia 02	45	310			
		Talud	80	165			

### 4.1.3. Análisis de Estabilidad

Se ha tomado seis puntos de control a lo largo de la carretera Ahijadero -Santa Rosa, se realizó la caracterización Geomecánica utilizando el RMR; RQD y el GSI, con el software Rock Data v4 hallamos la cohesión (C) y el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ), con el software Dips v.6.0 se analizó la cinemática de las discontinuidades para determinar el tipo de rotura en cada talud, por último con el software Slide v.6.0 se halló el factor de seguridad en cinco escenarios probabilísticos planteados (ver Tabla 53), se utilizó métodos de dovelas de Bishop Simplificado, LE/Morgenstern-Price y Spencer, los cuales utilizan equilibrio de fuerzas y de momentos, El número de dovelas por superficie de análisis fue de 25, tolerancia de 0.005 y 50 máximas iteraciones, por último, el método de búsqueda de la falla crítica fue de Auto Refine Search (recomendado para fallas no circulares).

Se consideró cuatro parámetros para el análisis del FS en el software Slide v.6.0 los cuales se describen a continuación: 1. Geométricos (sección de corte de cada talud, altura, pendiente y la dirección del talud); 2. Geotécnicos (a partir de la caracterización geomecánica); 3. Sísmicos (se determina por zona sísmica con el software LOADCAP) y 4. Hidrogeológicos (simula un nivel freático creando escenarios de saturación y cambios en las tensiones efectivas aumentando la posibilidad de falla, se añadió una carga externa de  $200 \text{ KN/m}^2$ , que simula el peso que recibe la carretera provocando inestabilidad del talud por el transporte de vehículos. Para la zonificación, se utiliza el Factor de Seguridad de Hoek (ver Tabla 52).

Tabla 52. Rangos de factores de seguridad.

Factor de Seguridad	
Inestable	< 1.0
Estable relativo	1.0 - 1.3
Estable a corto plazo	1.3 - 1.5
Estable a largo plazo	> 1.5

Fuente: Hoek, 2007

Tabla 53. Resumen del Factor de Seguridad para cada Talud.

Talud	Escenario	Métodos de Equilibrio Límite – Factor de Seguridad			Factor de Seguridad Promedio	Condición de Estabilidad
		Bishop Simplificado	Spencer	LE/Morgenstern-Price		
<b>Talud 01</b>	Estado Natural	1.927	2.162	2.179	2.089	Estable a largo plazo
	Saturación Parcial	1.547	1.554	1.54	1.547	Estable a largo plazo
	Saturación Total	0.898	0.906	0.905	0.903	Inestable
	Sismicidad Máxima	1.582	1.685	1.686	1.651	Estable a largo plazo
	Combinación SP y SM	1.313	1.252	1.225	1.263	Estable relativo
<b>Talud 02</b>	Estado Natural	1.5	1.544	1.515	1.52	Estable a largo plazo
	Saturación Parcial	1.253	1.277	1.248	1.259	Estable a corto plazo
	Saturación Total	0.838	0.795	0.784	0.806	Inestable
	Sismicidad Máxima	1.122	1.137	1.122	1.127	Estable a corto plazo
	Combinación SP y SM	0.982	0.993	0.965	0.98	Inestable
<b>Talud 03</b>	Estado Natural	1.757	1.794	1.77	1.774	Estable a largo plazo
	Saturación Parcial	1.46	1.519	1.474	1.484	Estable a corto plazo
	Saturación Total	1.105	1.09	1.086	1.094	Estable relativo
	Sismicidad Máxima	1.336	1.357	1.339	1.344	Estable a corto plazo
	Combinación SP y SM	1.235	1.243	1.206	1.228	Estable relativo
<b>Talud 04</b>	Estado Natural	1.707	2.024	2.073	1.935	Estable a largo plazo
	Saturación Parcial	1.448	1.565	1.563	1.525	Estable relativo
	Saturación Total	0.873	0.958	0.91	0.914	Inestable
	Sismicidad Máxima	1.315	1.368	1.34	1.341	Estable a corto plazo
	Combinación SP y SM	1.247	1.25	1.251	1.249	Estable relativo

Talud	Escenario	Métodos de Equilibrio Límite – Factor de Seguridad			Factor de Seguridad Promedio	Condición de Estabilidad
		Bishop Simplificado	Spencer	LE/Morgenstern-Price		
<b>Talud 05</b>	Estado Natural	1.869	1.897	1.87	1.879	Estable a largo plazo
	Saturación Parcial	1.477	1.502	1.487	1.489	Estable a corto plazo
	Saturación Total	0.982	0.985	0.961	0.976	Inestable
	Sismicidad Máxima	1.26	1.275	1.248	1.261	Estable relativo
	Combinación SP y SM	1.194	1.236	1.176	1.202	Estable relativo
<b>Talud 06</b>	Estado Natural	1.618	1.78	1.832	1.743	Estable a largo plazo
	Saturación Parcial	1.579	1.74	1.675	1.665	Estable a largo plazo
	Saturación Total	0.944	0.978	0.955	0.959	Estable relativo
	Sismicidad Máxima	1.288	1.292	1.291	1.29	Estable a largo plazo
	Combinación SP y SM	1.161	1.2	1.127	1.163	Estable relativo

#### 4.2. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

De acuerdo a la investigación se contrastó la hipótesis general, el trabajo realizado tanto descriptivo como explicativo y los resultados obtenidos, afirmamos que el comportamiento Geotécnico de los macizos rocosos, entre la carretera de los Centros Poblados Ahijadero-Santa Rosa, están determinadas por las condiciones Geológicas-Geotécnicas, las cuales son afectadas por las variables detonantes como la precipitación (incrementa la saturación de agua disminuyendo la resistencia al corte) y sismicidad inducida por el laboreo de minería artesanal, generando zonas críticas. Por todo lo antes mencionado se concluye y se afirma que es una zona inestable.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

El comportamiento Geotécnico de los taludes críticos está influenciado por cuatro factores **1.** Geométricos (altura, pendiente y dirección del talud); **2.** litomorfoestructuras (Litología, Geoformas y Estructuras); **3.** Sísmicos (la tectónica y por la sismicidad inducida generada producto del laboreo subterráneo artesanal) y **4.** Hidrogeológicos (saturación de agua reduciendo la resistencia al corte).

Litológicamente está constituida por arenisca, lutitas grises, y calizas de las Formaciones Chimú, Carhuaz, Farrat, Chúlec, Puilliucana y Cajamarca; así como depósitos cuaternarios aluviales y fluviales; las unidades morfogénicas identificadas son: planicies, lomadas, laderas y escarpas de acuerdo a la clasificación de Rodriguez,2016.

Los datos estructurales de la dirección de los estratos tienen tendencia al NW, SW y NE, con buzamiento promedio entre 25° y 75°; las familias que forman las discontinuidades tienen dirección con tendencia al NE, SE, SW y NW, las mismas que generan zonas críticas provocando roturas tipo planar y cuñas principalmente de acuerdo a la evaluación en proyecciones estereográficas en el software Dips v6.0.

La caracterización Geomecánica determinada mediante métodos empíricos utilizando el RQD, RMR y GSI se tiene macizos rocosos de tipo III (calidad regular), los mismos que están entre los rangos de 41-60, la resistencia a la compresión uniaxial varía de 50 -100 Mpa (requiere más de un golpe con el martillo de Geólogo para romperla), con planos moderadamente meteorizados, ligeramente húmedos, rellenos de arcilla y ligeramente rugosos.

Los factores de seguridad de los taludes 01,02,04 y 05 en condiciones de saturación total son inestable; el talud 02 en combinación de saturación parcial y sismicidad máxima es inestable; los taludes 01,03,04,05 y 06 en combinación de saturación parcial y sismicidad máxima es estable relativo; el talud 04 en condiciones de saturación parcial es estable relativo; el talud 05 en condiciones de sismicidad máxima es estable relativo, por último el talud 06 en condiciones de saturación total es estable relativo.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

Instituto Vial Distrital de Bambamarca debe ampliar la investigación realizando ensayos especiales de laboratorio como corte directo y triaxiales, así como también ensayos en los materiales no consolidados, para obtener resultados más exactos.

El Consejo Provincial de Bambamarca debe supervisar los estudios Geotécnicos que realicen el IVDB y el ministerio de transportes antes, durante y después de la construcción de la carretera Ahijadero -Santa Rosa.

Instituto Vial Distrital de Bambamarca durante la construcción de la carretera analice con mayor profundidad los tramos críticos y además ejecute estabilización de taludes según las condiciones Geotécnicas de la carretera.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Hoek, E.; Carranza Torres, C.; Corkum, B. 2002. El criterio de rotura de Hoek – Brown. Edición 2002.

Hoek, E. 2013. Quantification of the Geological Strength Index Chart. 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium. Laín, R. 2004. Rotura planar y rotura en cuña. Madrid, España.

Puell, F.; De la Puente, P. y Arenillas, M. 2004. La linealización del Criterio de Hoek-Brown en el Análisis de Estabilidad General de Taludes en Roca. Revista de Obras Públicas N° 3.446.

Deere, DU.; Deere DW. 1989. Rock Quality Designation (RQD) After Twenty Years. 1 ed. Washington, DC, USA, U.S. Department of Commerce National Technical Information Service. 101 p. Contract Report GL-89-1. US Army Corps of Engineers.

Marinos, P.; Hoek, E. 2000. GSI: A Geologically Friendly Tool for Rock Mass Strength Estimation. Proceedings of the GeoEng 2000 at the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2006). Modificatoria Decreto Supremo N°003-2016-VIVIENDA. Norma E.030 Diseño Sismorresistente.

Ramírez, P.; Alejano, L. 2004. Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes. Madrid, España, Universidad Politécnica de Madrid.

González de Vallejo, L. 2004. Ingeniería Geológica. Madrid-España. Editorial Pearson Educación S. A.

Suarez, J.2009. Deslizamiento: Análisis Geotécnico 1<sup>ed</sup> Bucaramanga, Colombia, Universidad Industrial de Santander.P.127-157.

Rocscience Inc, 2004. Biblioteca de Referencia en la Ingeniería de Rocas creado por el Dr. Evert Hoek. Ontario-Canadá.

Tolentino, V. 2008. Registro Geológico-Geotécnico. Lima-Perú. Formato en el Anexo 01.

Rodríguez, R. 2016. Método de investigación geológico-geotécnico para el análisis de inestabilidad de laderas por deslizamientos zona Ronquillo - Corisorgona Cajamarca - Perú. Tesis Magistral. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú.

Rojas, C. 2018. “Comportamiento Geotécnico De Los Taludes Críticos De La Carretera Lajas – El Tayal Provincia De Chota”. Tesis de pregrado Universidad Nacional de Cajamarca. 180p.

Montoya, F. 2014. “Evaluación Geotécnica de los taludes de la carretera Cruz Blanca - El Gavilán. Cajamarca”, Tesis de pregrado Universidad Nacional de Cajamarca. 151p.

Wilson, J. 1984. Boletín N° 38. Geología de los cuadrángulos de Jayanca (13-d), Incahuasi (13-e), Cutervo (13-f), Chiclayo (14-d), Chongoyape (14-e), Chota (14-f), Celendín (14-g), Pacasmayo (15-d) y Chepén (15-e). Lima, Perú: INGEMMET.

Dávila, J. 2011. Diccionario Geológico. Lima-Perú. Ingemmet.

## **ANEXOS**

### **➤ PLANOS:**

- 1. PLANO DE UBICACIÓN.**
- 2. PLANO DE ACCESIBILIDAD.**
- 3. PLANO MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES.**
- 4. PLANO GEOMORFOLÓGICO.**
- 5. PLANO GEOLÓGICO.**
- 6. PLANO GEOMECÁNICO.**
- 7. PLANOS DE ZONIFICACIÓN:**
  - 7.1. CONDICIONES ESTADO NATURAL.**
  - 7.2. CONDICIONES DE SATURACIÓN PARCIAL.**
  - 7.3. CONDICIONES DE SATURACIÓN TOTAL.**
  - 7.4. CONDICIONES DE SISMICIDAD MÁXIMA.**
  - 7.5. CONDICIONES DE SATURACIÓN PARCIAL Y SISMICIDAD MÁXIMA.**