

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



**TESIS PROFESIONAL**  
**EVALUACIÓN GEOMECÁNICA-GEOTÉCNICA DE LA CARRETERA**  
**EL TAYAL – SANTA ISOLINA BAJO, PROVINCIA DE CHOTA**  
**CAJAMARCA 2017**

**Para Optar el Título Profesional de:**  
**INGENIERO GEÓLOGO**

**Presentado por:**  
**Bach. Antony Michael Valdera Sánchez**

**Asesor**  
**Ing. Roberto Severino Gonzáles Yana**

**Cajamarca – Perú**  
**2019**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mi alma mater, Universidad Nacional de Cajamarca, en especial a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica por ser la sede de todos los conocimientos adquiridos en estos años.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a los docentes que con su sabiduría, conocimiento y apoyo, contribuyeron en mi desarrollo como persona y como profesional.

Debo extender un sincero agradecimiento a mi asesor Ing. Roberto Severino Gonzales Yana por la paciencia, apoyo y orientación constante en el desarrollo de la investigación.

Y, por supuesto, el agradecimiento más profundo y sentido va para mi familia, por su cariño, comprensión y apoyo incondicional. A mis padres y hermanos, quienes son mi motor, mayor inspiración y pilares fundamentales para la culminación de los objetivos y metas trazadas a lo largo de mi vida.

## **DEDICATORIA**

La finalización de la presente investigación no hubiese sido posible sin la cooperación desinteresada de todas y cada una de las personas que me acompañaron en el recorrido laborioso de este trabajo, y muchas de las cuales han sido un soporte muy fuerte en momentos de angustia y desesperación, por ello dedico esta investigación a mis familiares y amigos, en especial a mis padres Elvira y Antonio, por la fortaleza, virtudes y valores inculcados en mí.

.

## ÍNDICE

CONTENIDO	Pág.
AGRADECIMIENTO .....	i
DEDICATORIA.....	ii
ÍNDICE.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vii
ÍNDICE DE FOTOS .....	xii
LISTA DE ABREVIACIONES.....	xiv
RESUMEN .....	xv
ABSTRACT .....	xvi
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....	4
2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	4
2.2 BASES TEÓRICAS.....	5
2.2.1 Clasificación de los Macizos Rocosos.....	5
2.2.2 Criterios de Rotura .....	11
2.2.3 Análisis Cinemático .....	16
2.2.4 Análisis de Taludes.....	28
2.2.5 Factor de Seguridad .....	29
2.2.6 Método de Equilibrio Límite .....	29
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	34
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS .....	35
3.1 UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	35
3.1.1 Geográfica.....	35
3.1.2 Política .....	35
3.2 ACCESIBILIDAD .....	36
3.3 METODOLOGÍA .....	36
3.3.1 Población de estudio .....	36
3.3.2 Muestra .....	36
3.3.3 Unidad de Análisis .....	37
3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	37
3.4.1 Técnicas .....	37
3.4.2 Instrumentos y Equipos.....	38

	<b>Pág.</b>
<b>3.5</b>	<b>PROCEDIMIENTO.....39</b>
<b>3.6</b>	<b>GEOMORFOLOGÍA.....40</b>
3.6.1	Planicie .....40
3.6.2	Lomada.....41
3.6.3	Ladera.....42
3.6.4	Escarpa.....43
<b>3.7</b>	<b>GEOLOGÍA LOCAL.....44</b>
3.7.1	Grupo Crisnejas .....44
3.7.2	Grupo Pulluicana (Ks-p).....45
3.7.3	Depósitos Cuaternarios.....46
<b>3.8</b>	<b>GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....47</b>
3.8.1	Deformación dúctil .....47
3.8.2	Deformación frágil .....49
<b>3.9</b>	<b>ESTUDIO GEOTÉCNICO.....51</b>
3.9.1	Talud Crítico N° 01: .....57
3.9.2	Talud Crítico N° 02: .....69
3.9.3	Talud Crítico N° 03: .....79
3.9.4	Talud Crítico N° 04: .....89
3.9.5	Talud Crítico N° 05: ..... 102
3.9.6	Talud Crítico N° 06: ..... 112
3.9.7	Talud Crítico N° 07: ..... 125
3.9.8	Talud Crítico N° 08: ..... 137
<b>CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... 149</b>	
<b>4.1</b>	<b>PRESENTACIÓN DE RESULTADOS ..... 149</b>
4.1.1	Análisis de la Caracterización Geomecánica ..... 150
4.1.2	Análisis Estereográfico – Cinemático ..... 156
4.1.3	Análisis de Estabilidad ..... 159
<b>4.2</b>	<b>CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS..... 166</b>
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ..... 167</b>	
<b>5.1</b>	<b>CONCLUSIONES ..... 167</b>
<b>5.2</b>	<b>RECOMENDACIONES..... 168</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 169</b>	
<b>ANEXOS ..... 171</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Índice de calidad de la roca en función al RQD. ....	6
Tabla 2: Parámetros de valores para la clasificación <b>RMR89</b> .....	7
Tabla 3: Calidad de macizo rocoso en función al <b>RMR89</b> .....	8
Tabla 4: Cuantificación GSI mediante las condiciones de las discontinuidades y el RQD. ....	9
Tabla 5: Cuantificación GSI mediante las condiciones de las discontinuidades y el RQD. ....	10
Tabla 6: Guías para la estimación del factor de alteración del criterio de rotura de Hoek & Brown.....	15
Tabla 7: Métodos de análisis de estabilidad de taludes .....	33
Tabla 8: Coordenadas UTM - WGS-84 del tramo de investigación .....	35
Tabla 9: Acceso al área de investigación. ....	36
Tabla 10: Unidades Geomorfométricas.....	40
Tabla 11: Factor de Zona Definida en la Norma Técnica E.030.....	52
Tabla 12: Parámetros de entrada para el cálculo de los coeficientes sísmicos.....	53
Tabla 13: Descripción de escenarios para análisis de taludes. ....	56
Tabla 14: Opciones de entrada para el método Auto Refine Search.....	56
Tabla 15: Coordenadas y descripción de la Talud Crítico N° 01. ....	57
Tabla 16: Parámetros del Macizo Rcoso, orientación de las familias y geometría del Talud Crítico N°1.....	58
Tabla 17: Asignación de Valores para el Macizo Rcoso, Talud crítico N° 01. ....	59
Tabla 18: Estimación del GSI en términos del RQD y la Condición de las Juntas .....	60
Tabla 19: Coordenadas y descripción de la Talud Crítico N° 02. ....	69
Tabla 20: Parámetros del Macizo Rcoso, orientación de las familias y geometría del Talud Crítico N°2.....	70
Tabla 21: Asignación de Valores para el Macizo Rcoso, Talud crítico N° 02. ....	71
Tabla 22: Estimación del GSI en términos del RQD y la Condición de las Juntas .....	72
Tabla 23: Coordenadas y descripción de la Talud Crítico N° 03. ....	79
Tabla 24: Parámetros del Macizo Rcoso, orientación de las familias y geometría del Talud Crítico N°3.....	80
Tabla 25: Asignación de Valores para el Macizo Rcoso, Talud crítico N° 03. ....	81
Tabla 26: Estimación del GSI en términos del RQD y la Condición de las Juntas .....	82
Tabla 27: Coordenadas y descripción de la Talud Crítico N° 04. ....	89
Tabla 28: Parámetros del Macizo Rcoso, orientación de las familias y geometría del Talud Crítico N°4.....	90

	<b>Pág.</b>
Tabla 29: Asignación de Valores para el Macizo Rocoso, Talud crítico N° 04. ....	91
Tabla 30: Estimación del GSI en términos del RQD y la Condición de las Juntas .....	92
Tabla 31: Coordenadas y descripción de la Talud Crítico N° 05. ....	102
Tabla 32: Parámetros del Macizo Rocoso, orientación de las familias y geometría del Talud Crítico N°5. ....	103
Tabla 33: Asignación de Valores para el Macizo Rocoso, Talud crítico N° 05. ....	104
Tabla 34: Estimación del GSI en términos del RQD y la Condición de las Juntas .....	105
Tabla 35: Coordenadas y descripción de la Talud Crítico N° 06. ....	112
Tabla 36: Parámetros del Macizo Rocoso, orientación de las familias y geometría del Talud Crítico N°6. ....	113
Tabla 37: Asignación de Valores para el Macizo Rocoso, Talud crítico N° 06. ....	114
Tabla 38: Estimación del GSI en términos del RQD y la Condición de las Juntas .....	115
Tabla 39: Coordenadas y descripción de la Talud Crítico N° 07. ....	125
Tabla 40: Parámetros del Macizo Rocoso, orientación de las familias y geometría del Talud Crítico N°7. ....	126
Tabla 41: Asignación de Valores para el Macizo Rocoso, Talud crítico N° 07. ....	127
Tabla 42: Estimación del GSI en términos del RQD y la Condición de las Juntas .....	128
Tabla 43: Coordenadas y descripción de la Talud Crítico N° 08. ....	137
Tabla 44: Parámetros del Macizo Rocoso, orientación de las familias y geometría del Talud Crítico N°8. ....	138
Tabla 45: Asignación de Valores para el Macizo Rocoso, Talud crítico N° 08. ....	139
Tabla 46: Estimación del GSI en términos del RQD y la Condición de las Juntas .....	140
Tabla 47: Formaciones Geológicas de la zona de investigación.....	150
Tabla 48: Índice de Calidad de la Roca (RQD) para cada Talud Crítico .....	151
Tabla 49: Sistema de Valoración del Macizo Rocoso ( <b>RMR89</b> ) para cada Talud Crítico.....	152
Tabla 50: Índice de Resistencia Geológica (GSI) para cada Talud Crítico .....	153
Tabla 51: Parámetros de entrada al software RocData v.4.0 para cada Talud Crítico.....	155
Tabla 52: Parámetros de salida del software RocData v.4.0 para cada Talud Crítico.....	155
Tabla 53: Resultados obtenidos del software Dips v.6.0 para cada Talud Crítico .....	157
Tabla 54: Rangos de Factores de Seguridad recomendados por Hoek (2007). ....	159
Tabla 55: Análisis de los métodos de Equilibrio Límite en seis (6) escenarios, para cada Talud Crítico. ....	160

## 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).....	14
Figura 2: Disposición de las discontinuidades con respecto al talud para deslizamiento planar. (Hoek & Bray, 1981). ....	16
Figura 3: Análisis cinemático para mecanismo de rotura tipo planar. a) Modelo del mecanismo planar. b) Representación estereográfica. (Hoek & Bray, 1981). ....	18
Figura 4: Orientación de las familias de discontinuidades respecto al talud para roturas en cuña. (Hoek & Bray, 1981). ....	19
Figura 5: Análisis cinemático para mecanismo de rotura en cuña. a) Modelo del mecanismo de rotura en cuña. b) Representación estereográfica. (Hoek & Bray, 1981). ....	21
Figura 6: Criterio para saber si la cuña desliza a través de ambos planos de discontinuidad o a través de uno solo. (Ramírez & Alejano, 2004). ....	23
Figura 7: Criterio de análisis de cuña directa e inversa. (Ramírez & Alejano, 2004). ....	23
Figura 8: Orientación de las familias de discontinuidades respecto al talud para roturas por vuelco. (Hoek & Bray, 1981). ....	24
Figura 9: Tipos de rotura por vuelco. (Goodman & Bray, 1976). ....	25
Figura 10: Análisis cinemático para mecanismo de rotura por vuelco. a) Modelo del mecanismo de rotura por vuelco. b) Representación estereográfica. (Hoek & Bray, 1981). ....	27
Figura 11: Métodos de análisis de estabilidad de taludes. (Suárez, 2009). ....	28
Figura 12: División de la masa deslizante de una rotura circular en una serie de fajas o rebanadas verticales. (Ramírez & Alejano, 2004). ....	30
Figura 13: Esquema de fuerzas y aspectos geométricos en una rebanada. (Ramírez & Alejano, 2004). ....	31
Figura 14: Representación estereográfica del anticlinal en la que se puede apreciar la dirección del eje NO-SE y con plunge de 8°. ....	48
Figura 15: Representación estereográfica del sinclinal en la que se puede apreciar la dirección del eje NO-SE y con plunge de 5°. ....	49

Figura 16:	Representación de zonas sísmicas definidas en la Norma Técnica E.030, Diseño Sismo-Resistente del Reglamento Nacional de Edificaciones, con su modificatoria con Decreto Supremo N° 003-2016-Vivienda. (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2016).	52
Figura 17:	Cálculo de los coeficientes sísmicos horizontal ( $kh$ ) y vertical ( $kv$ ) mediante el Software Loadcap 2018.	54
Figura 18:	Promedio de precipitación y temperatura de Chota. (SENAMHI, 2018).	55
Figura 19:	Análisis de las Propiedades Geomecánicas en el software RocData v.4 correspondiente al Talud Crítico 01.	61
Figura 20:	Análisis Cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indica rotura planar.	62
Figura 21:	Análisis Cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indica rotura en cuña directa.	63
Figura 22:	Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de deslizamiento planar.	64
Figura 23:	Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de deslizamiento en cuña.	65
Figura 24:	Análisis Slide en condiciones naturales.	66
Figura 25:	Análisis Slide en condiciones de saturación parcial.	66
Figura 26:	Análisis Slide en condiciones de saturación total.	67
Figura 27:	Análisis Slide en condiciones de sismicidad.	67
Figura 28:	Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad.	68
Figura 29:	Análisis Slide en condiciones de saturación total y sismicidad.	68
Figura 30:	Análisis de las Propiedades Geomecánicas en el software RocData v.4 correspondiente al Talud Crítico 02.	73
Figura 31:	Análisis Cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indica rotura en cuña directa.	74
Figura 32:	Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de deslizamiento en cuña.	75
Figura 33:	Análisis Slide en condiciones naturales.	76
Figura 34:	Análisis Slide en condiciones de saturación parcial.	76
Figura 35:	Análisis Slide en condiciones de saturación total.	77
Figura 36:	Análisis Slide en condiciones de sismicidad.	77
Figura 37:	Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad.	78

	<b>Pág.</b>
Figura 38: Análisis Slide en condiciones de saturación total y sismicidad. ....	78
Figura 39: Análisis de las Propiedades Geomecánicas en el software RocData v.4 correspondiente al Talud Crítico 03. ....	83
Figura 40: Análisis Cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indica rotura en cuña directa. ....	84
Figura 41: Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de deslizamiento en cuña. ....	85
Figura 42: Análisis Slide en condiciones naturales. ....	86
Figura 43: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial. ....	86
Figura 44: Análisis Slide en condiciones de saturación total. ....	87
Figura 45: Análisis Slide en condiciones de sismicidad. ....	87
Figura 46: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad. ....	88
Figura 47: Análisis Slide en condiciones de saturación total y sismicidad. ....	88
Figura 48: Análisis de las Propiedades Geomecánicas en el software RocData v.4 correspondiente al Talud Crítico 04. ....	93
Figura 49: Análisis Cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indica rotura planar. ....	94
Figura 50: Análisis Cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indica rotura en cuña directa. ....	95
Figura 51: Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de deslizamiento planar. ....	96
Figura 52: Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de deslizamiento en cuña. ....	97
Figura 53: Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de rotura en vuelco. ....	98
Figura 54: Análisis Slide en condiciones naturales. ....	99
Figura 55: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial. ....	99
Figura 56: Análisis Slide en condiciones de saturación total. ....	100
Figura 57: Análisis Slide en condiciones de sismicidad. ....	100
Figura 58: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad. ....	101
Figura 59: Análisis Slide en condiciones de saturación total y sismicidad. ....	101
Figura 60: Análisis de las Propiedades Geomecánicas en el software RocData v.4 correspondiente al Talud Crítico 05. ....	106
Figura 61: Análisis Cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indica rotura en cuña directa. ....	107

	<b>Pág.</b>
Figura 62: Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de deslizamiento en cuña. ....	108
Figura 63: Análisis Slide en condiciones naturales. ....	109
Figura 64: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial. ....	109
Figura 65: Análisis Slide en condiciones de saturación total. ....	110
Figura 66: Análisis Slide en condiciones de sismicidad. ....	110
Figura 67: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad. ....	111
Figura 68: Análisis Slide en condiciones de saturación total y sismicidad. ....	111
Figura 69: Análisis de las Propiedades Geomecánicas en el software RocData v.4 correspondiente al Talud Crítico 06. ....	116
Figura 70: Análisis Cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indica rotura planar. ....	117
Figura 71: Análisis Cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indica rotura en cuña directa. ....	118
Figura 72: Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de deslizamiento planar. ....	119
Figura 73: Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de deslizamiento en cuña. ....	120
Figura 74: Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de rotura en vuelco. ....	121
Figura 75: Análisis Slide en condiciones naturales. ....	122
Figura 76: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial. ....	122
Figura 77: Análisis Slide en condiciones de saturación total. ....	123
Figura 78: Análisis Slide en condiciones de sismicidad. ....	123
Figura 79: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad. ....	124
Figura 80: Análisis Slide en condiciones de saturación total y sismicidad. ....	124
Figura 81: Análisis de las Propiedades Geomecánicas en el software RocData v.4 correspondiente al Talud Crítico 07. ....	129
Figura 82: Análisis Cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indica rotura planar. ....	130
Figura 83: Análisis Cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indica rotura en cuña directa. ....	131
Figura 84: Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de deslizamiento planar. ....	132
Figura 85: Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de deslizamiento en cuña. ....	133

	<b>Pág.</b>
Figura 86: Análisis Slide en condiciones naturales.....	134
Figura 87: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial. ....	134
Figura 88: Análisis Slide en condiciones de saturación total. ....	135
Figura 89: Análisis Slide en condiciones de sismicidad. ....	135
Figura 90: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad. ....	136
Figura 91: Análisis Slide en condiciones de saturación total y sismicidad. ....	136
Figura 92: Análisis de las Propiedades Geomecánicas en el software RocData v.4 correspondiente al Talud Crítico 08. ....	141
Figura 93: Análisis Cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indica rotura planar. ....	142
Figura 94: Análisis Cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indica rotura en cuña directa. ....	143
Figura 95: Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de deslizamiento planar. ....	144
Figura 96: Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de deslizamiento en cuña. ....	145
Figura 97: Análisis Slide en condiciones naturales.....	146
Figura 98: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial. ....	146
Figura 99: Análisis Slide en condiciones de saturación total. ....	147
Figura 100: Análisis Slide en condiciones de sismicidad. ....	147
Figura 101: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad. ....	148
Figura 102: Análisis Slide en condiciones de saturación total y sismicidad. ....	148
Figura 103: Factor de Seguridad para cada talud crítico en condiciones normales. ....	162
Figura 104: Factor de Seguridad para cada talud crítico en condiciones de saturación parcial. ....	163
Figura 105: Factor de Seguridad para cada talud crítico en condiciones de saturación total. ....	163
Figura 106: Factor de Seguridad para cada talud crítico en condiciones de sismicidad máxima.....	164
Figura 107: Factor de Seguridad para cada talud crítico en condiciones de sismicidad máxima y saturación parcial.....	165
Figura 108: Factor de Seguridad para cada talud crítico en condiciones de sismicidad máxima y saturación total.....	165

## ÍNDICE DE FOTOS

	Pág.
Foto 1: Planicie con pendiente aproximada de 5°, ubicada al margen izquierdo del Río Chotano en depósitos fluviales a 200 m del Centro Poblado El Tayal. Coordenadas: E 774280, N 9277347, Cota 1997 m.s.n.m. ....	41
Foto 2: Lomadas con pendiente aproximada de 20°, de uso agrícola y ganadero, ubicada al margen derecho del Río Chotano en depósitos aluviales y fluvio-aluviales. Coordenadas: E 742764, N 9280084, Cota 1955 m.s.n.m. ...	42
Foto 3: Laderas con pendiente aproximada de 40° a 45°, ubicada al margen derecho del Río Chotano en depósitos aluviales. Coordenadas: E 743227, N 9278979, Cota 1967 m.s.n.m. ....	42
Foto 4: Escarpas con pendiente aproximada de 70° a 75°, ubicada al margen derecho del Río Chotano en la Formación Pariatambo. Las geoformas de la fotografía no constituyen zonas críticas por lo que su dirección de buzamiento se encuentra opuesto a la dirección del buzamiento del talud. Coordenadas: E 743227, N 9278979, Cota 1967 m.s.n.m. ....	43
Foto 5: Calizas nodulares de estratificación delgada de la formación chúlec, con color de meteorización gris amarillento. Coordenadas: E 743172, N 9279246, Cota 1947. ....	44
Foto 6: Calizas con intercalación de lutitas bituminosas en estratificación delgada formando lajas características de la Formación Pariatambo. Coordenadas: E 740371, N 9281362, Cota 1862. ....	45
Foto 7: Caliza arenosa del Grupo Pulluicana con color de meteorización gris-amarillento. Coordenadas: E 738257, N 9282239, Cota 1785. ....	46
Foto 8: Anticlinal en la Formación Pariatambo, cuyo eje intersecta en la progresiva del km 128+200 con dirección SO-NE. Flanco derecho: DIP/42°, DD/126°. Flanco izquierdo: DIP/32°, DD/286°. Coordenadas: E 740345, N 9281356, Cota 1856. ....	47
Foto 9: Sinclinal cortado por una falla inversa en la Formación Pariatambo, cuyo eje intersecta en la progresiva del km 128+180 con dirección SO-NE. Flanco derecho: DIP/68°, DD/118°. Flanco izquierdo: DIP/48°, DD/292°. Coordenadas: E 740180, N 9281343, Cota 1847. ....	48
Foto 10: Falla inversa ubicado en la Formación Pariatambo. Orientación: DIP/64°, DD/82°. Coordenadas: E 740728, N 9281315, Cota 1871. ....	50
Foto 11: Familias principales de diaclasas ubicadas en la Formación Pulluicana. Familia 1: DIP/34°, DD/346°. Familia 2: DIP/74°, DD/234°. Familia 3: DIP/42°, DD/144°. Coordenadas: E 743138, N 9279599, Cota 1946. ....	50

	<b>Pág.</b>
Foto 12: Afloramiento de calizas nodulares en estratificación delgada de la Formación Chúlec (Ki - Ch), en las progresivas Km 133+883 - Km 133+923. ....	57
Foto 13: Punto inicial y perfil del Talud Crítico N°1 en las progresivas Km 133+883 - Km 133+923. ....	58
Foto 14: Afloramiento de calizas arenosas en estratificación delgada de la Formación Chúlec (Ki - Ch), en las progresivas Km 131+632 - Km 131+682. ....	69
Foto 15: Perfil del Talud Crítico N°2 en las progresivas Km 131+632 - Km 131+682..	70
Foto 16: Afloramiento de calizas arenosas en estratificación delgada de la Formación Chúlec (Ki - Ch), en las progresivas Km 131+405 - Km 131+445. ....	79
Foto 17: Perfil del Talud Crítico N°3 en las progresivas Km 131+405 - Km 131+445..	80
Foto 18: Afloramiento de calizas arenosas en estratificación delgada de la Formación Chúlec (Ki - Ch), en las progresivas Km 129+043 - Km 129+083. ....	89
Foto 19: Perfil del Talud Crítico N°4 en las progresivas Km 129+043 - Km 129+083. ....	90
Foto 20: Afloramiento de calizas bituminosas en estratificación delgada de la Formación Pariatambo (Ki - Pa), en las progresivas Km 128+195 - Km 128+235. ....	102
Foto 21: Perfil del Talud Crítico N°5 en las progresivas Km 128+195 - Km 128+235. ....	103
Foto 22: Afloramiento de calizas grisáceas en estratificación irregular del Grupo Pulluicana (Ks - P), en las progresivas Km 126+582 - Km 126+632. ....	112
Foto 23: Perfil del Talud Crítico N°6 en las progresivas Km 126+582 - Km 126+632. ....	113
Foto 24: Afloramiento de calizas arenosas, perteneciente al Grupo Pulluicana (Ks - P), en las progresivas Km 126+318 - Km 126+358. ....	125
Foto 25: Perfil del Talud Crítico N°7 en las progresivas Km 126+318 - Km 126+358. ....	126
Foto 26: Afloramiento de calizas arenosas, perteneciente al Grupo Pulluicana (Ks - P), en las progresivas Km 125+183 - Km 125+233. ....	137
Foto 27: Perfil del Talud Crítico N°8 en las progresivas Km 125+183 - Km 125+233. ....	138

## LISTA DE ABREVIACIONES

<b>CEN:</b>	Comité Europeo de Normalización.
<b>EN:</b>	Estado Natural.
<b>FS:</b>	Factor de Seguridad.
<b>GSI:</b>	Índice de Resistencia Geológica.
<b>INGEMMET:</b>	Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.
<b>JCond<sub>89</sub>:</b>	Condiciones de superficie de las discontinuidades.
<b>Km:</b>	Kilómetro.
<b>MDE:</b>	Modelo Digital de Elevaciones.
<b>MDT:</b>	Modelo Digital del Terreno.
<b>MR:</b>	Relación modular.
<b>O.P.C.M:</b>	Ordenanza del Presidente del Consejo de Ministros.
<b>RQD:</b>	Índice de Calidad de la Roca.
<b>RMR<sub>89</sub>:</b>	Sistema de Valoración del Macizo Rocosó.
<b>SAS:</b>	Statistical Analysis Systems (Sistema de Análisis Estadístico).
<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>ST-SM:</b>	Combinación de la Saturación Total con Sismicidad Máxima.
<b>TIN:</b>	Red Irregular de Triángulos.
<b>UTM:</b>	Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator.
<b>WGS-84:</b>	Sistema Geodésico Mundial 1984.

## RESUMEN

La investigación analiza el comportamiento geomecánico - geotécnico de taludes críticos en la carretera El Tayal - Santa Isolina Bajo. La geología está representada por una secuencia calcárea del Grupo Crisnejas y Grupo Pulluicana. Dicha vía se encuentra inmersa en taludes inestables producto de la meteorización, el alto grado de fracturamiento originado por procesos tectónicos de compresión, las propiedades físico - mecánicas de los macizos rocosos e igualmente asociado a las variables desencadenantes de la infiltración de agua y la sismicidad. En ocho taludes críticos se estimaron parámetros geomecánicos mediante la aplicación de clasificaciones geomecánicas, así como el uso del software RocData v.4.0 para la determinación del ángulo de fricción y la cohesión. El análisis cinemático realizado con el software Dips v.6.0, determina mecanismos de rotura principalmente de tipo cuña seguido de roturas planares, influenciadas por el ángulo de fricción y por factores geométricos de los taludes. Mediante el uso del software Slide v.6.0 se calcularon los Factores de Seguridad por medio de tres métodos del Equilibrio Límite, bajo seis condiciones (Estado Natural, Saturación Parcial, Saturación Total, Sismicidad Máxima, Saturación Parcial con Sismicidad Máxima y Saturación Total con Sismicidad Máxima) que representan el estado actual y pronóstico del talud, teniendo como base las propiedades geomecánicas de las rocas, nivel freático y sismicidad de los Taludes Críticos. Finalmente, la zonificación en Estado de Saturación Total muestra inestabilidad en los Taludes Críticos 01, 02 y 04 con  $FS < 1$ , en Estado de Saturación Parcial con Sismicidad es inestable el Talud Crítico 04 y en Estado de Saturación Total con Sismicidad son inestables los Taludes Críticos 01, 02, 03, 04, 05 y 07 con  $FS < 1$ .

**Palabras clave:** Geomecánica, Cinemática, Talud, Equilibrio Límite, Factor de Seguridad.

## **ABSTRACT**

The investigation analyzes the geomechanical - geotechnical behavior of critical slopes on the El Tayal - Santa Isolina Bajo highway. The geology is represented by a limestone sequence of the Crisnejas Group and Pulluicana Group. This route is immersed in unstable slopes resulting from weathering, the high degree of fracture caused by tectonic compression processes, the physical - mechanical properties of rock masses and also associated with the triggers of water infiltration and seismicity. In eight critical slopes, geomechanical parameters were estimated through the application of geomechanical classifications, as well as the use of RocData v.4.0 software to determine the friction angle and cohesion. The kinematic analysis performed with the Dips v.6.0 software, determines breakage mechanisms mainly wedge type followed by flat breaks, influenced by the friction angle and geometric slope factors. Using the Slide v.6.0 software, the Factors of Safety are calculated by means of three methods of the Limit Equilibrium, under six conditions (Natural State, Partial Saturation, Total Saturation, Maximum Seismicity, Partial Saturation with Maximum Seismicity and Total Saturation with Seismicity Maximum) that represent the current state and slope forecast, based on the geometric properties of the rocks, water table and seismicity of the critical slopes. Finally, the zoning in the State of Total Saturation shows instability in the Critical Slopes 01, 02 and 04 with  $FS < 1$ , in the State of Partial Saturation with Seismicity the Critical Slope 04 is unstable and in the State of Total Saturation with Seismicity the Critical Slopes 01, 02, 03, 04, 05 and 07 with  $FS < 1$ .

Keywords: Geomechanics, Kinematics, Slope, Limit Equilibrium, Factor of Safety.

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

La inestabilidad de taludes constituye el problema principal en la concepción y diseño de carreteras, tanto desde el punto de vista económico como de seguridad. Por lo cual, empezar a manejar el control de deslizamientos y desprendimientos de los taludes en las carreteras es de suma importancia. El desarrollo de modelos de cálculo numérico, ha permitido que su modelización se haya convertido en una herramienta de cálculo muy aplicada. Los estudios en el diseño de taludes se vienen realizando, aplicando los conceptos de cinemática y de equilibrio límite como métodos de cálculo.

El área de investigación comprende los taludes ubicados en la carretera El Tayal - Santa Isolina Bajo, donde se evidencia problemas de deslizamientos y desprendimientos de rocas en los taludes debido al intenso fracturamiento de las rocas calizas en las Formaciones del Cretácico Superior Chúlec, Pariatambo y Grupo Pulluicana, lo cual representa un peligro constante para dicha vía que une la Costa Norte del Perú con la Provincia de Chota. La saturación de los macizos rocosos están afectados por la infiltración debido a las precipitaciones pluviales y a la sismicidad, determinando el comportamiento geotécnico de las rocas. El objetivo es determinar los Factores de Seguridad con la finalidad de zonificar las zonas críticas. Para realizar un análisis de la estabilidad a lo largo del eje de la carretera, considerando la litomorfoestructura, infiltración y sismicidad, se formula la incógnita ¿Cuál es la evaluación geotécnica en los taludes de la carretera El Tayal - Santa Isolina Bajo?

Evaluando la geomecánica - geotecnia de los macizos rocosos se determinarán las zonas más inestables de los taludes en la carretera El Tayal - Santa Isolina Bajo, los cuales se encuentran en condiciones inestables y dependen de las características litomorfoestructurales y las variables de infiltración y sismicidad.

La carretera El Tayal - Santa Isolina Bajo, representan un peligro constante para la transitabilidad por dicha vía debido a los desprendimientos y deslizamientos de rocas, es por ello que se realizará una investigación geomecánica - geotécnica, considerando las litomorfoestructuras, infiltración y sismicidad, lo cual determinará la inestabilidad de los taludes en los macizos rocosos.

La investigación se realizó en el campo de la geomecánica - geotecnia, de manera exploratoria, descriptiva y explicativa, analizando y evaluando las zonas críticas en la carretera El Tayal - Santa Isolina Bajo, con el objetivo general de Evaluar el comportamiento geomecánico - geotécnico de los taludes en la carretera El Tayal – Santa Isolina Bajo, y con la finalidad de facilitar el control sistemático de la investigación, los objetivos específicos son: Realizar el cartografiado geológico, Analizar el comportamiento litomorfoestructural y determinar las propiedades geomecánicas de los taludes, Definir el comportamiento geotécnico de los taludes, Calcular los Factores de Seguridad de los taludes mediante el software Slide v.7 y Zonificar los taludes críticos. Tras la elaboración del presente trabajo de investigación, existieron algunas limitaciones, que de alguna u otra manera dificultaron el desarrollo de la misma, entre ellas: Recursos económicos insuficientes para ensayos de compresión triaxial en laboratorio y la escasa información en la zona debido al factor social; por lo cual, la investigación es de carácter deductivo e interpretativo, pero argumentado.

El proyecto de investigación se encuentra dividido en V Capítulos, cuya estructura se pueden describir:

En el Capítulo I, Introducción, se muestra el origen del problema y la formulación del problema, importancia y objetivos de la investigación.

En el Capítulo II, Marco Teórico de la Investigación, contiene un resumen de antecedentes, bases teóricas actualizadas que se consideran imprescindibles en el desarrollo de la investigación, la definición de términos básicos utilizados; así como también, referencias de libros u obras de algunos autores que servirán para enriquecer las teorías.

En el Capítulo III, Materiales y Métodos. En este acápite se describe a detalle la ubicación geográfica donde se desarrolló la investigación y cada uno de los procedimientos, técnicas e instrumentos utilizados para la recolección y procesamiento de datos de la investigación.

En el Capítulo IV, Análisis y Discusión de Resultados. Se exponen las estaciones con su respectivo análisis y se detallan los resultados obtenidos contrastándose con la hipótesis planteada.

En el Capítulo V, se detallan las conclusiones derivadas de los resultados de la investigación y en base a los objetivos planteados, y se mencionan algunas recomendaciones.

Por último se mencionan las referencias bibliográficas y se presentan los anexos en donde se adjunta la información complementaria utilizada en el desarrollo de la investigación.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

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

Consortio Vial Hualgayoc (2010), realizó el estudio definitivo para la rehabilitación y mejoramiento de la carretera Chongoyape – Cochabamba - Cajamarca. Tramo Chota – Bambamarca – Hualgayoc. Donde se realiza un estudio geológico y geotécnico teniendo en cuenta las características litomorfoestructurales de los taludes. Se identificaron cuatro áreas inestables donde se desarrollaron deslizamientos de tipo rotacional.

Montoya (2014), realizó la evaluación geotécnica de los taludes de la carretera Cruz Blanca – El Gavilán. Busca determinar el comportamiento litomorfoestructural, la identificación de los factores que propician la inestabilidad, identifica zonas críticas altamente peligrosas, sectorizando y caracterizando por tramos los problemas de índole geotécnico. Además se establece las diferencias entre los factores de seguridad de los taludes calculados con esfuerzos totales, efectivos y un factor sísmico. Concluye en un decremento hasta del 98% de su Factor de Seguridad.

Rodrigo (2017), realizó un análisis de estabilidad de taludes en la carretera Lajas – Ajipampa. Analiza la estabilidad de los taludes en depósitos cuaternarios y en las Formaciones Pariatambo, Quilquiñan – Mujarrún, Pulluicana y Cajamarca. El análisis del Factor de Seguridad lo realizó mediante el Software Slide y RocPlane concluyendo que en estado de saturación y sismicidad, los taludes de macizo rocoso son estables y suelos – macizos rocosos son inestables, además realiza una zonificación y propone medidas de estabilización.

Rojas (2018), determinó el comportamiento geotécnico de los taludes críticos de la carretera Lajas - El Tayal, Provincia de Chota. Determina el comportamiento geotécnico de los taludes en rocas de la Formación Carhuaz del Grupo Goyllarisquizga, Formaciones del Cretácico Superior; Inca, Chúlec, Pariatambo, Grupo Pulluicana, Grupo Quilquiñan y la Formación Cajamarca; mediante clasificaciones geomecánicas, análisis cinemático y aplicando el método de equilibrio límite. Concluye que los principales factores de inestabilidad son originados por un fuerte fracturamiento producto de la geotectónica regional-local, la meteorización y las variables desencadenantes de deslizamiento y desprendimiento como la precipitación y sismicidad.

Saézn (2015), realizó una evaluación geotécnica de los taludes en el tramo de carretera El Gavilán – Chigden. Donde se busca determinar el comportamiento litomorfoestructural de los taludes en el tramo de carretera km 150+860 – km 162+000 y cuyo estudio se realizó en 4 zonas críticas altamente peligrosas. Concluye que los principales factores de inestabilidad son la precipitación, infiltración y cambios de temperatura, los cuales disminuyen los esfuerzos de resistencia en las rocas.

Zavala & Barrantes (2007), realizó para el INGEMMET el inventario, cartografiado y evaluación de zonas críticas por Peligros Geológicos y Geohidrológicos en la Región de Cajamarca. Busca identificar, georeferenciar y determinar el grado de peligrosidad de las ocurrencias de procesos de movimientos en masa.

## **2.2 BASES TEÓRICAS.**

### **2.2.1 Clasificación de los Macizos Rocosos**

La clasificación de los macizos rocosos se basa en factores que determinan su comportamiento geomecánico, como la litología y propiedades de la matriz rocosa, estructura geológica y las 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 más utilizadas para investigaciones en taludes son: RQD, RMR y GSI.

### 2.2.1.1 Índice de Calidad de la Roca (RQD)

Desarrollada por Deere en 1964 y publicada por primera vez en 1967 por Deere y sus colegas de la Universidad de Illinois (Deere et al., 1967, citado por U. Deere & W. Deere, 1989). Fue propuesto para estimar cuantitativamente la calidad del macizo rocoso, mediante el uso de piezas de testigo de perforación diamantina mayores a 10 cm recuperado en un sondeo. La relación, propuesta por Deere, entre el valor numérico RQD y la calidad de la roca desde el punto de vista de la ingeniería se muestra en la Tabla 1. Priest & Hudson (1976) encontraron que se podía obtener una estimación razonable de RQD a partir de mediciones del espaciamiento de las discontinuidades realizadas en la recuperación de los núcleos en una perforación diamantina (Hoek et al., 2013). Se calcula mediante la 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: U. Deere & W. Deere (1980).

### 2.2.1.2 Sistema de Valoración del Macizo Rocosos (RMR<sub>89</sub>)

La actualización de la valoración del macizo rocoso presentada por Bieniawski (1989), constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que combina el RQD con otras observaciones como la presencia de agua y la meteorización. Bieniawski propuso originalmente que su clasificación comprendiera ocho parámetros, posteriormente modificó su sistema, quedando finalmente cinco parámetros básicos (Hoek & Brown, 1980). El sistema de clasificación del macizo rocoso se presenta en la Tabla 2 para cada uno de los siguientes cinco parámetros.

- Resistencia a la compresión uniaxial de la roca.
- Grado de fracturación en términos del RQD
- Espaciado de las discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades.
- Condiciones de agua subterránea.

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

PARAMETRO		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		
VALOR			30	23	13	6	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: Hoek et al. (1995).

Bieniawski (1989) publicó un conjunto de directrices para la dirección de soporte de túneles en roca (Hoek et al., 1995). Dentro de las cuales se presenta la calidad del macizo rocoso en función a la valoración del RMR. Esta clasificación se presenta en la Tabla 3.

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: Hoek et al. (1995).

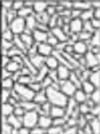
### 2.2.1.3 Índice de Resistencia Geológica (GSI)

El Índice de Resistencia Geológica (GSI), se desarrolló específicamente para la estimación de las propiedades del macizo rocoso, en lugar del refuerzo y soporte de túneles del RMR. Hoek (1994) desarrolló el GSI y su uso para el criterio de rotura de Hoek y Brown, y fue presentada en 1995. Hoek & Brown (1997) presenta una revisión del desarrollo del criterio y las ecuaciones propuestas; sin embargo, aún era un sistema de roca dura equivalente al RMR. A partir de 1998 se desarrolló el sistema GSI con el objetivo de incluir macizos rocosos de mala calidad (Marinos & Hoek, 2000) siendo un sistema de clasificación cualitativa del macizo rocoso, como se muestra en la Tabla 4. Hoek et al. (2013), presentaron una propuesta de cuantificación del GSI sobre la base de dos parámetros bien establecidos; la condición de las discontinuidades y el RQD, presentada en la Tabla 5. El valor del GSI viene dado por la suma de dos escalas que dan como resultado la siguiente relación.

$$GSI = 1.5 JCond_{89} + RQD/2$$

La Tabla 5 presenta modificaciones menores al cuadro del GSI publicado por Marinos & Hoek (2000), eliminando la fila superior e inferior al no cumplir con las condiciones de homogeneidad e isotropía inherentes en la definición del GSI.

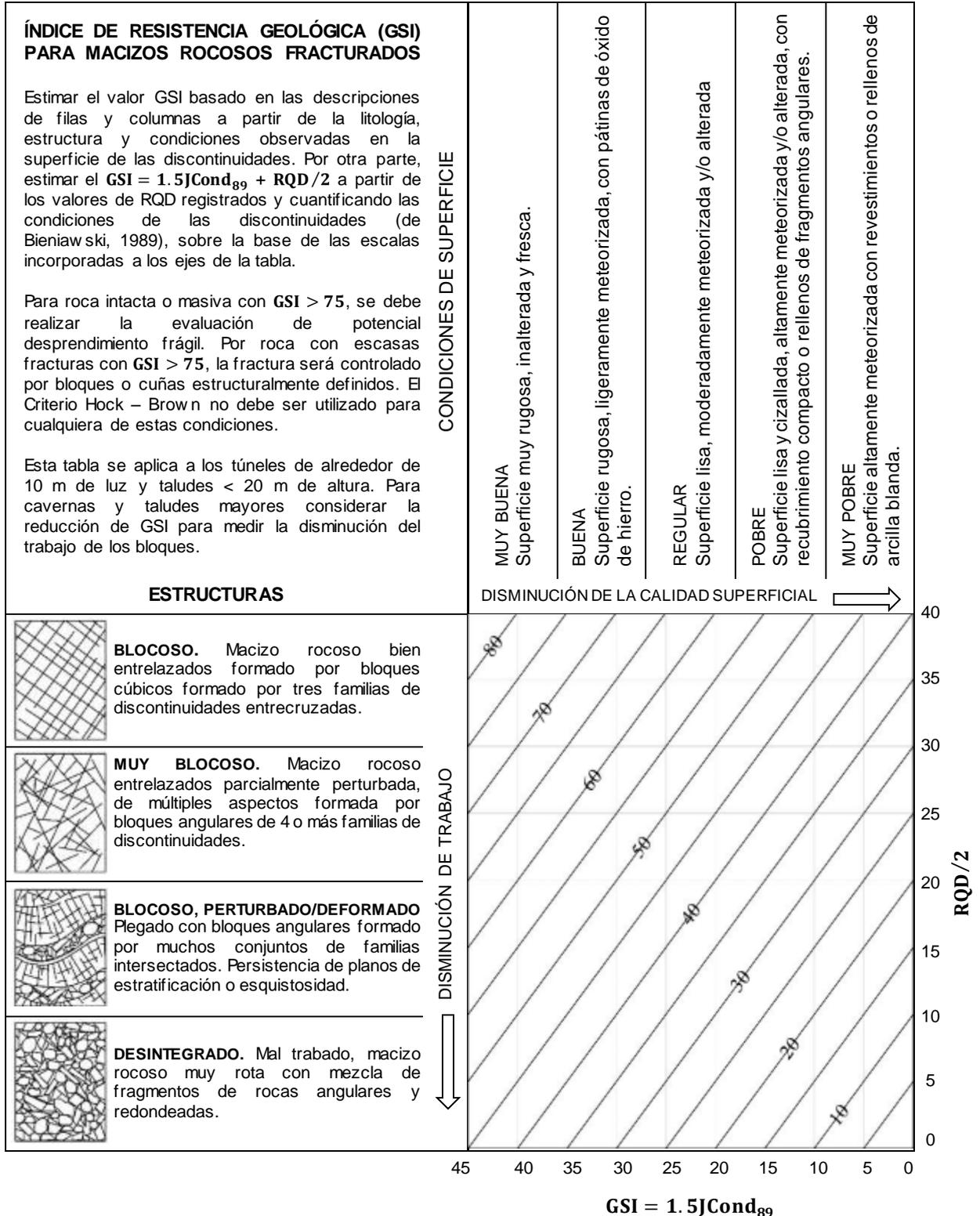
Tabla 4: Cuantificación GSI mediante las condiciones de las discontinuidades y el RQD.

<p><b>INDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA PARA ROCAS FRACTURADAS (HOEK &amp; 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><b>ESTRUCTURAS</b></p>		<p><b>CONDICIONES DE LAS DISCONTINUIDADES</b></p> <p>MUY BUENA Superficies muy rugosas, inalteradas y frescas.</p> <p>BUENA Superficies rugosas, ligeramente meteorizadas, con pátinas de óxido de hierro.</p> <p>REGULAR Superficies lisas, moderadamente meteorizadas y/o alteradas.</p> <p>MALA Superficies lisas y cizalladas, altamente meteorizadas y/o alteradas, con recubrimientos compactos o rellenos de fragmentos angulares.</p> <p>MUY MALA Superficies lisas y cizalladas, altamente meteorizadas con revestimientos o rellenos de arcilla blanda.</p> <p>DISMINUCIÓN DE LA CONDICIÓN SUPERFICIAL →</p>				
 <p><b>INTACTA O MASIVA.</b> Espécimen de roca intacta o roca in-situ masiva con pocas discontinuidades ampliamente espaciadas.</p>	90	80	70	60	N/A	
 <p><b>BLOCOSA.</b> Macizo rocoso inalterado bien trabado, definido por bloques cúbicos formados por 3 familias de discontinuidades.</p>	80	70	60	50	40	
 <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>	70	60	50	40	30	
 <p><b>BLOCOSA/PERTURBADA/DEFORMADA</b> Plegada, bloques angulares de muchas familias de discontinuidades, persistencia de los planos de estratificación o esquistosidad.</p>	60	50	40	30	20	
 <p><b>DESINTEGRADA.</b> Pobremente trabada, macizo rocoso muy fracturado con mezcla de fragmentos de roca angulares y redondeados.</p>	50	40	30	20	10	
 <p><b>LAMINADA/CIZALLADA.</b> Ausencia de blocosidad debido a espaciados cercanos de débil esquistosidad o planos de cizalla.</p>	N/A	N/A	10	0	0	

Fuente: Marinos & Hoek (2000).

La Tabla 5 muestra la escala A definida por  $1.5JCond_{89}$  mientras que la escala B está definida como  $RQD/2$ . El valor de GSI viene dado por la suma de estas escalas.

Tabla 5: Cuantificación GSI mediante las condiciones de las discontinuidades y el RQD.



Fuente: Hoek et al. (2013).

## 2.2.2 Criterios de Rotura

El criterio original de Hoek - Brown se publicó en 1980 y basándose en la experiencia en el uso del criterio en varios proyectos, se publicó una versión actualizada en 1988 (Hoek & Brown, 1988) y se publicó un criterio modificado en 1992 (Hoek et al., 1992), citado por Hoek (1994). El criterio original es un criterio no lineal y empírico, utilizado para el estudio de macizos rocosos duros. Como se muestra en la expresión.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( m \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5}$$

Donde  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  son los esfuerzos principales efectivos mayor y menor en el momento de la rotura,  $\sigma_{ci}$  es la resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta,  $m$  y  $s$ , son las constantes del material, donde  $s = 1$  para roca intacta.

### 2.2.2.1 Criterio de Hoek - Brown Generalizado

Hoek (1994) introdujo el concepto del criterio de Hoek - Brown generalizado, en el que la forma de la curva de la tensión principal o la envolvente de Mohr podría ajustarse por medio de un coeficiente variable  $a$ , en lugar del término de la raíz cuadrada del criterio original (Hoek et al., 2002). El criterio no solo se utilizó para rocas duras, sino también en 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  $m_b$  es un valor reducido de la constante del material  $m_i$  y está dado por:

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

$s$  y  $a$  son constantes del macizo rocoso dadas por las siguientes relaciones:

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

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

D es un factor que depende sobre todo del factor de alteración al que ha sido sometido el macizo rocoso por efectos de voladura o por la relajación de los esfuerzos. Varía desde 0 para macizos rocosos in situ inalterados hasta 1 para macizos rocosos muy alterados. Las pautas de la selección se muestran en la Tabla 6.

La resistencia a la compresión uniaxial se obtiene haciendo  $\sigma'_3 = 0$  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 de Hoek - Brown generalizado. Esto representa una condición de tensión biaxial. Dada por la expresión.

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

Hoek & Diederichs (2006) utilizaron una base de datos de mediciones del módulo de deformación del macizo rocoso de proyectos de China y Taiwán, mediante los cuales plantearon la siguiente ecuación, citado por Hoek & Brown (2018).

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

Donde  $E_i$  es el módulo de deformación de la roca intacta.

Cuando no hay información disponible sobre el módulo de deformación de la roca intacta ( $E_i$ ), Hoek & Diederichs (2006) plantearon la siguiente ecuación alternativa.

$$E_m [\text{GPa}] = 10^5 \frac{1 - D/2}{1 + e^{[(75+25D-GSI)/11]}}$$

### 2.2.2.2 Criterio de Mohr - Coulomb

Para el uso del criterio de Mohr - Coulomb, es necesario determinar los ángulos de fricción y las resistencias cohesivas para cada macizo rocoso e intervalo de esfuerzos (Hoek et al., 2002). Esto se hace ajustando una relación lineal media a la curva generada a partir del criterio de Hoek - Brown generalizado para un intervalo de esfuerzo principal menor definido por  $\sigma_t < \sigma_3 < \sigma'_{3max}$ .

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

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

Siendo  $\sigma'_{3n} = \sigma'_{3max}/\sigma_{ci}$

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.

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

La gráfica equivalente, en términos de esfuerzos principales menor y mayor (Figura 1), está dada por la expresión.

$$\sigma'_1 = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} + \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \sigma'_3$$

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  $\sigma'_{3max}$  en estudios de taludes, Hoek et al. (2002) establecieron la siguiente relación.

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

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

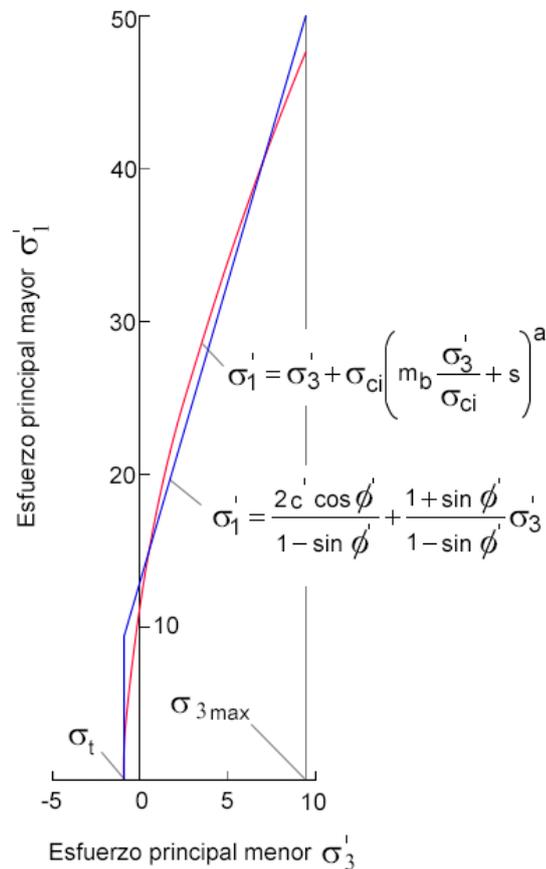


Figura 1: Relación entre el esfuerzo principal mayor y menor del criterio de Hoek - Brown y el equivalente de Mohr - Coulomb. (Hoek et al., 2002).

Para el cálculo de la deformabilidad de la roca intacta ( $E_i$ ), Hoek & Diederichs (2006) establecieron una relación en la que se podía incluir la proporción de deformabilidad de la roca intacta ( $E_m = E_i$ ), haciendo uso de la relación modular ( $MR$ ) propuesta por Deere (1968).

$$E_i = MR\sigma_{ci}$$

Esta relación es útil cuando no se dispone de valores directos de la deformabilidad de la roca intacta ( $E_i$ ) o cuando es difícil realizar un muestreo completamente intacto para la medición de  $E_i$ .

Tabla 6: Guías para la estimación del factor de alteración del criterio de rotura de Hoek & Brown

APARIENCIA DEL MACIZO ROCOSO	DESCRIPCIÓN DEL MACIZO ROCOSO	VALOR D SUGERIDO
	<p>Excelente calidad de voladura controlada o excavación con tuneladora TBM, con resultados de alteración mínima del macizo rocoso confinado circundante al túnel.</p>	<p><b>D=0</b></p>
	<p>Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladuras) con una alteración mínima en el macizo circundante</p> <p>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.</p>	<p><b>D=0</b></p> <p><b>D=0.5</b> No invert</p>
	<p>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.</p>	<p><b>D=0.8</b></p>
	<p>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.</p>	<p><b>D=0.7</b> Good blasting</p> <p><b>D=1.0</b> Poor blasting</p>
	<p>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</p> <p>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.</p>	<p><b>D=1.0</b> Production blasting</p> <p><b>D=0.7</b> Mechanical excavation</p>

Fuente: Hoek et al. (2002).

### 2.2.3 Análisis Cinemático

La estabilidad en taludes de roca a menudo se ve influenciada significativamente por la geología estructural como planos de estratificación, juntas o fallas, denominadas discontinuidades (Hoek & Bray, 1981). En un estudio de campo típico, es útil poder identificar concentraciones de discontinuidades que representan posibles planos de rotura. Markland (1972), Hocking (1976) y Goodman y Bray (1976), desarrollaron pruebas para determinar la probabilidad de una rotura planar, rotura en cuña o rotura por vuelco. Estas pruebas se presentan en Hoek & Bray (1981).

#### 2.2.3.1 Rotura Planar

Este tipo de rotura consiste en el deslizamiento de una masa 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. Este mecanismo es analizado como un problema en dos dimensiones. Como se muestra en la Figura 2.

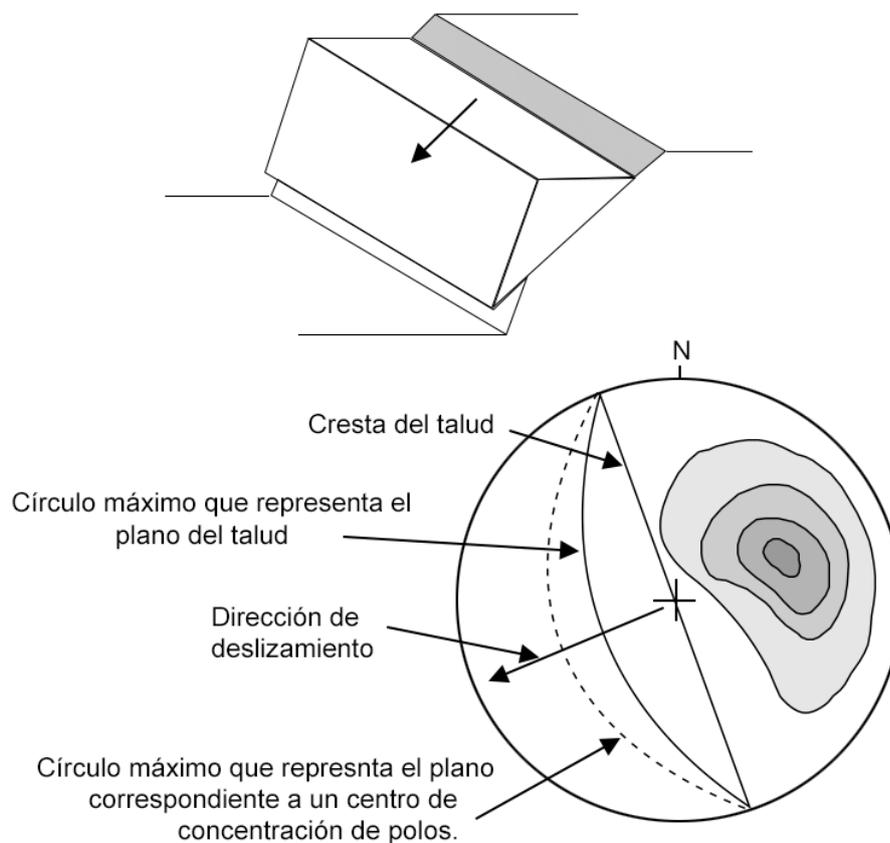


Figura 2: Disposición de las discontinuidades con respecto al talud para deslizamiento planar. (Hoek & Bray, 1981).

Las condiciones estructurales para que ocurra una rotura planar se resumen a continuación (Hoek & Bray, 1981) y se ilustran en la Figura 3.

- a) El rumbo de la discontinuidad planar debe de estar  $20^\circ$  dentro del rumbo de la cara del talud, en ambas direcciones. (Figura 4b)

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

- b) La dirección de buzamiento de la discontinuidad planar debe ser menor que la dirección de buzamiento de la cara del talud, además de inclinarse hacia dicha cara. (Figura 4a).

$$\psi_p < \psi_f$$

- c) El rumbo de la discontinuidad debe ser mayor que el ángulo de fricción de la superficie de deslizamiento. (Figura 4a).

$$\psi_p < \phi_p$$

Dónde:

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

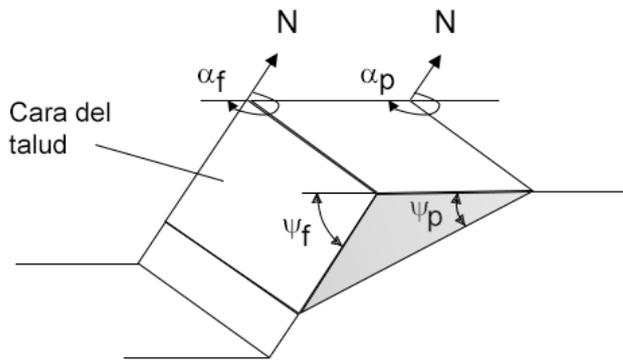
$\alpha_p$  = Dirección de buzamiento del plano.

$\psi_f$  = Buzamiento del talud.

$\psi_p$  = Buzamiento del plano.

$\phi_p$  = Ángulo de fricción.

Si se cumplen todas las condiciones anteriores, el deslizamiento tiene lugar cuando las fuerzas tangenciales que se desarrollan en la superficie de rotura son mayores que las fuerzas resistentes. La Figura 3 ilustra estas tres condiciones que pueden ser evaluadas mediante el análisis estereográfico.



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.

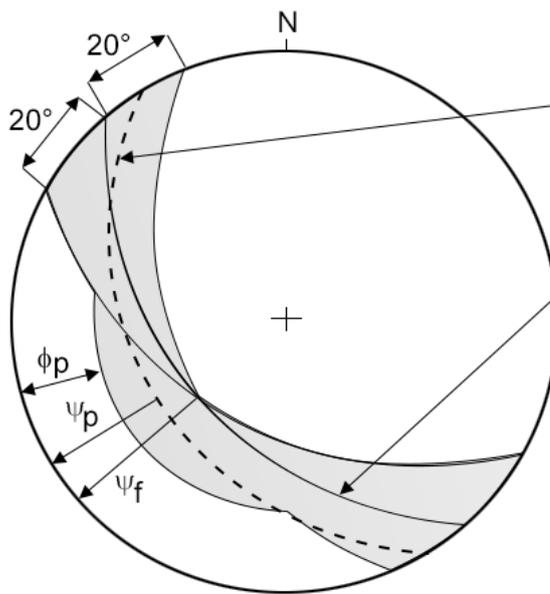
$\psi_f$  = Buzamiento del talud.

$\psi_p$  = 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 3: Análisis cinemático para mecanismo de rotura tipo planar. a) Modelo del mecanismo planar. b) Representación estereográfica. (Hoek & Bray, 1981).

### 2.2.3.2 Rotura en Cuña

La rotura en cuña ocurre a lo largo de la intersección entre dos discontinuidades, las cuales se mantienen en contacto (Figura 4). Para que se produzca la rotura en cuña, es fundamental que las discontinuidades tengan un buzamiento menor que el buzamiento de la cara del talud (Figura 5). La prueba también puede diferenciar entre el deslizamiento de una cuña en dos planos a lo largo de la línea de intersección, o solo en uno de los planos, de manera que se produzca la rotura planar (Hoek & Bray, 1981).

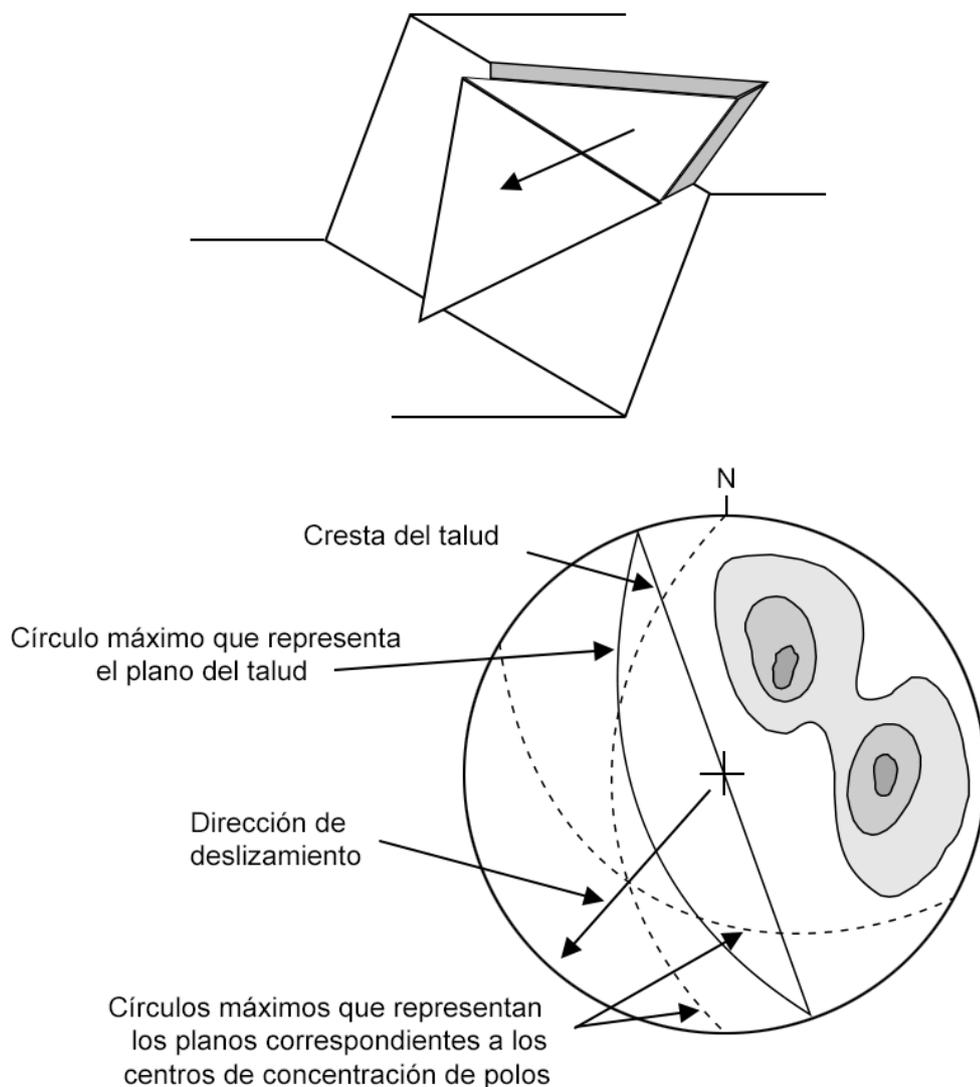


Figura 4: Orientación de las familias de discontinuidades respecto al talud para roturas en cuña. (Hoek & Bray, 1981).

Las condiciones estructurales para que ocurra una rotura en cuña se enlistan a continuación (Hoek & Bray, 1981) y se ilustran en la Figura 5.

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

$$\alpha_i = \alpha_f \pm (\text{debe aflorar hacia la cara del talud})$$

- b) 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.

$$\psi_i < \psi_f$$

- c) 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.

$$\phi < \psi_i$$

Dónde:

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

$\alpha_i$  = Dirección de buzamiento de la línea de intersección.

$\psi_f$  = Buzamiento del talud.

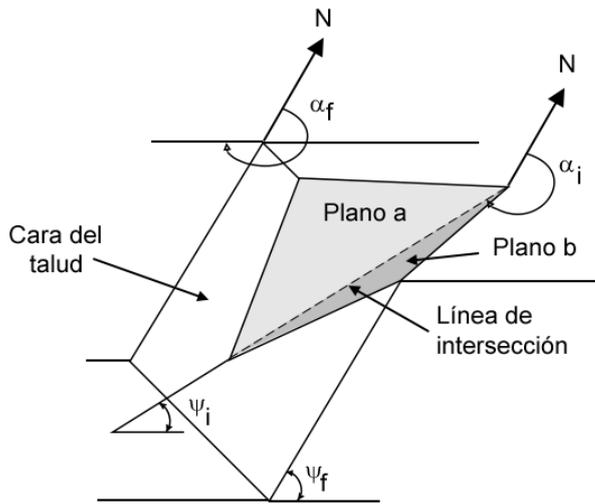
$\psi_i$  = Inmersión de la línea de intersección.

$\phi$  = Ángulo de fricción.

$\alpha_a$  = Dirección de buzamiento del plano a.

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

Como el modelo representa una forma tridimensional, no se asume la extensión lateral como un requisito. El análisis estereográfico puede también determinar si el deslizamiento ocurrirá en ambos planos formadores de la cuña o en uno solo.



a) Modelo del Mecanismo en Cuñas

Donde

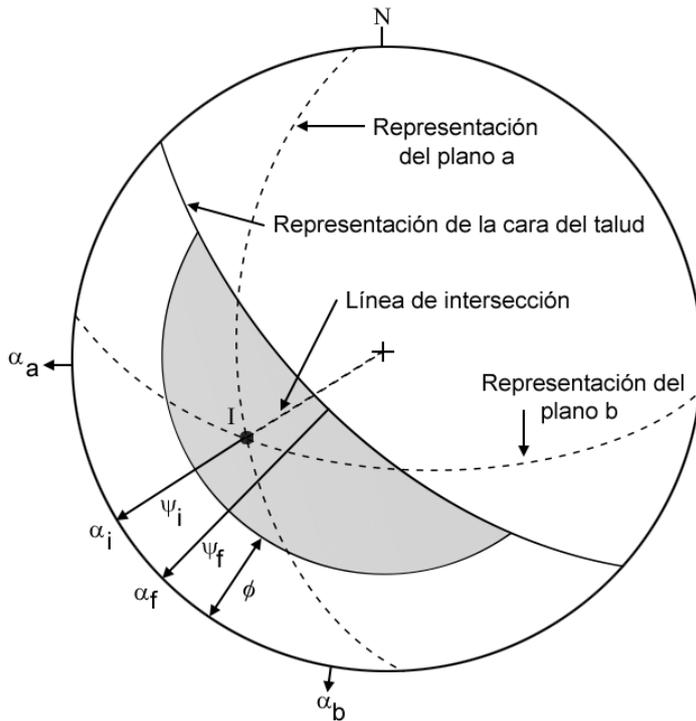
- $\alpha_f$  = Dir. del buzamiento de la cara del talud.
- $\alpha_a$  = Dirección del buzamiento del plano a.
- $\alpha_b$  = dirección del buzamiento del plano b.
- $\psi_f$  = Buzamiento del talud.
- $\psi_a$  = Buzamiento del plano a.
- $\psi_b$  = Buzamiento del plano b.
- $\phi$  = Ángulo de Fricción.
- $\psi_i$  = Inmersión de la línea de intersección.
- $\psi_f$  = Rumbo de la línea de intersección

Condiciones para Mecanismo en Cuña

1.  $\alpha_i = \alpha_f \pm$  (que aflore hacia la cara del talud).
2.  $\psi_i < \psi_f$
3.  $\phi < \psi_i$

Markland's Test:

Si  $\alpha_a$  o  $\alpha_b$  se encuentra entre  $\alpha_i$  y  $\alpha_f$  entonces ocurrirá el deslizamiento sobre el plano a y b en dirección del máximo buzamiento, de lo contrario será a través de la línea de intersección.



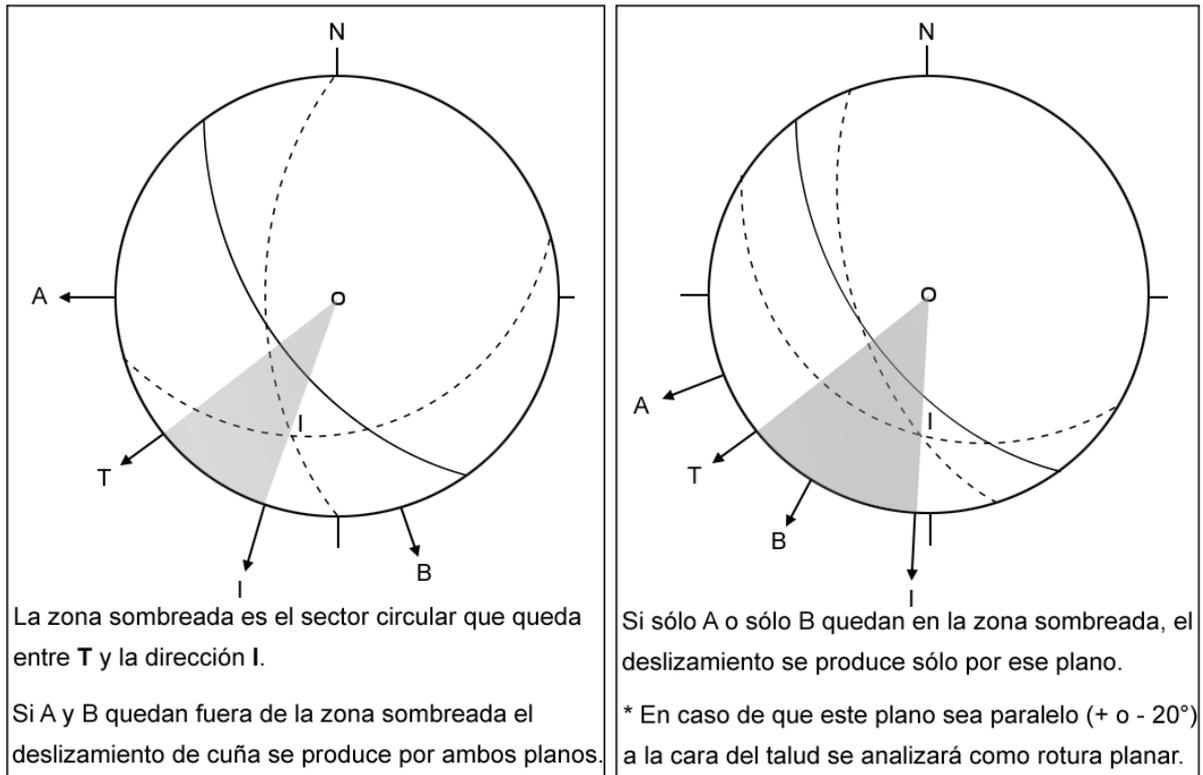
b) Representación Estereográfica

Combinaciones de planos de discontinuidad con una línea de intersección que aflore hacia la cara del talud,  $\alpha_i = \alpha_f \pm$ , y que satisfagan la inecuación  $\phi < \psi_i < \psi_f$  representan cinemáticamente fallamientos viables en cuña. Las líneas de intersección de aquellos planos deberán ubicarse dentro del área sombreada en la estereofalsilla.

Figura 5: Análisis cinemático para mecanismo de rotura en cuña. a) Modelo del mecanismo de rotura en cuña. b) Representación estereográfica. (Hoek & Bray, 1981).

De acuerdo con Laín, citado por Ramírez & Alejano (2004), para saber si una cuña desliza a través de los dos planos de discontinuidad que la forma, o sólo por uno de ellos conviene utilizar la proyección estereográfica. En primer lugar, se sombrea el sector circular comprendido entre la dirección de buzamiento del talud **T** y la línea de intersección **I** entre los planos de discontinuidad (Figura 6). Una vez hecho esto, pueden darse tres circunstancias a saber.

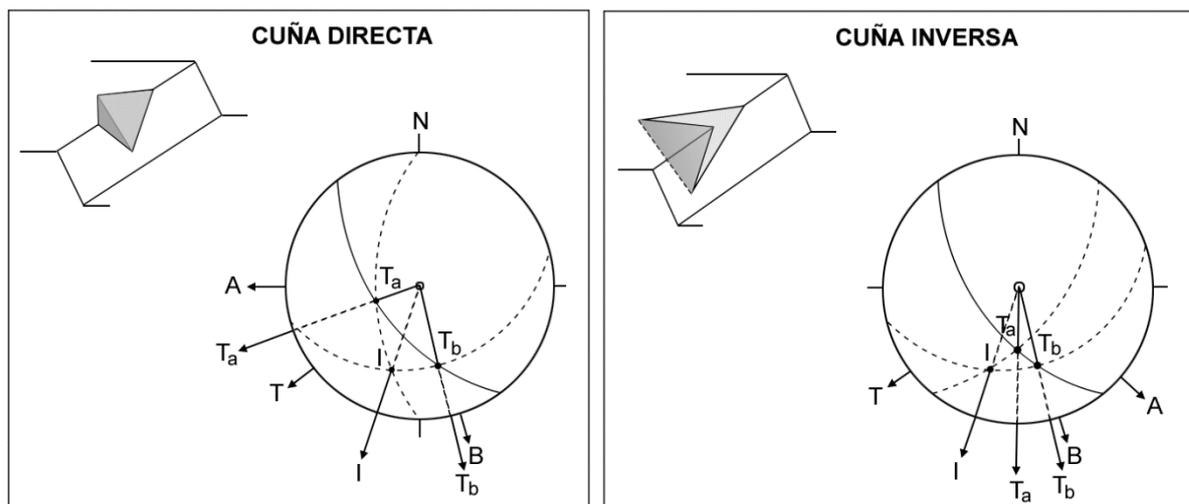
- a) Que las direcciones de buzamiento de los planos de discontinuidad tan A como B queden fuera de la zona sombreada, en cuyo caso el deslizamiento se producirá por ambos, tratándose de una rotura en cuña propiamente dicha (Figura 6).
- b) Que sólo una de las direcciones de uno de los planos de discontinuidad, bien A o bien B, quede dentro del sector circular sombreado, en cuyo caso se producirá el deslizamiento plano a través del plano de discontinuidad que quede dentro de la zona sombreada; en cuyo caso, el análisis de estabilidad se realizará como si se tratara de una rotura plana (Figura 6).
- c) Que las dos direcciones de buzamiento de los planos de discontinuidad tanto A como B queden dentro de la zona sombreada, en cuyo caso se producirá el deslizamiento plano a través del plano de discontinuidad cuya dirección de buzamiento está más próxima a la dirección de buzamiento del plano del talud; en cuyo caso, el análisis de estabilidad también se realizará como si se tratará de una rotura plana.



Si A y B quedan en la zona sombreada, el deslizamiento de cuña se produce por aquel plano cuya dirección de buzamiento esté más próxima a T.

Figura 6: Criterio para saber si la cuña desliza a través de ambos planos de discontinuidad o a través de uno solo. (Ramírez & Alejano, 2004).

Para saber si una cuña es directa o inversa, sólo se analiza si los planos que la forman buzaban hacia el mismo o distinto lado de la línea de intersección. (Figura 7).



NOTA: Si la dirección de la línea de intersección de los planos de rotura I está entre  $T_a$  y  $T_b$ , entonces la cuña será directa, en caso contrario la cuña será inversa.

Figura 7: Criterio de análisis de cuña directa e inversa. (Ramírez & Alejano, 2004).

### 2.2.3.3 Rotura por Vuelco (Toppling).

La rotura por Vuelco, es un modo de rotura que implica columnas interactivas regularmente espaciadas. Ocurre solo bajo la gravedad cuando las capas están inclinadas hacia la cara del talud (Figura 8), pero pueden ocurrir incluso cuando las capas están inclinadas hacia la excavación si la carga se transfiere desde bloques superiores potencialmente deslizantes, éste último es un caso de “caída secundaria” (Goodman & Bray, 1976).

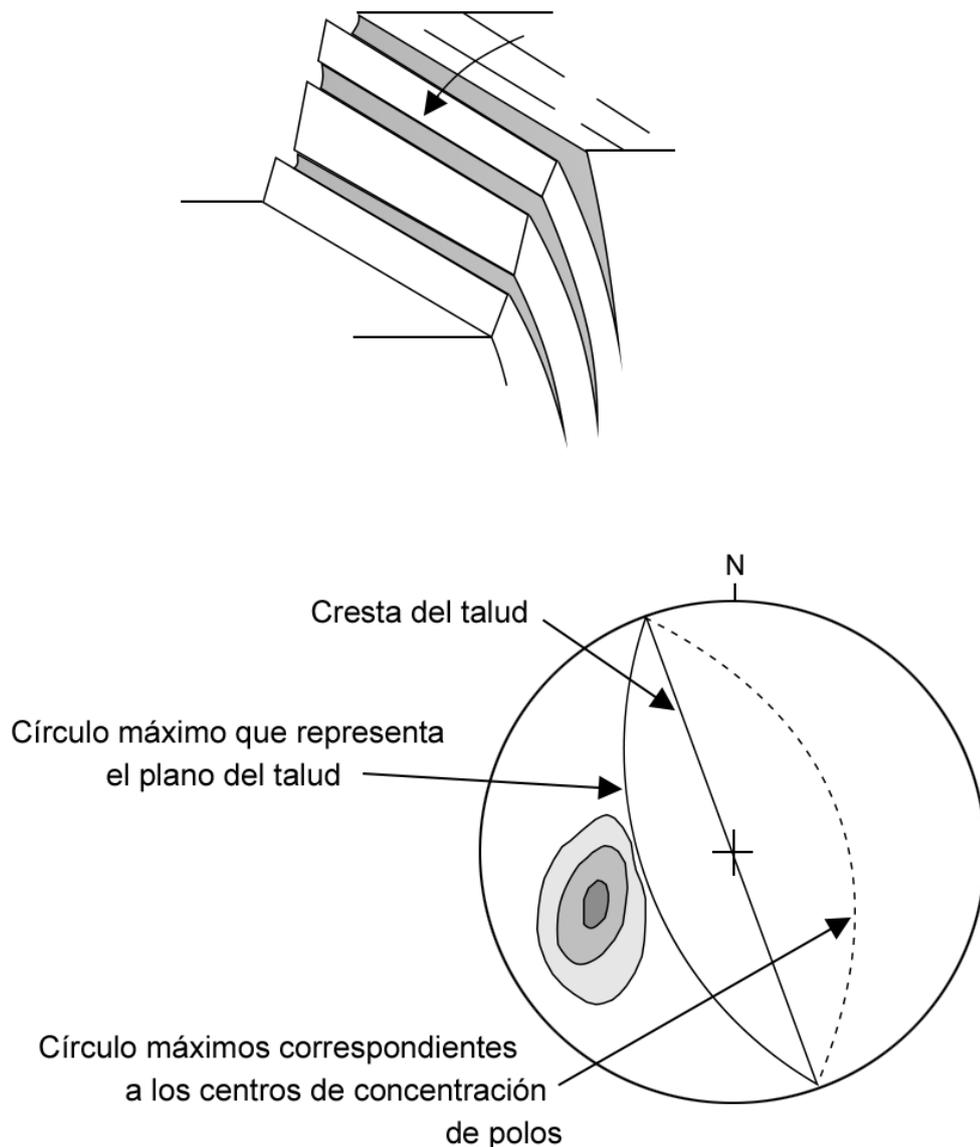
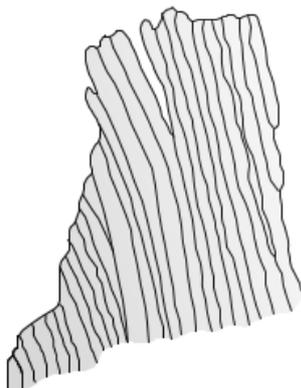
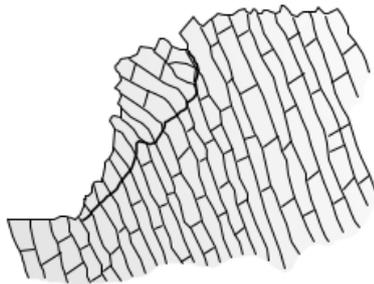


Figura 8: Orientación de las familias de discontinuidades respecto al talud para roturas por vuelco. (Hoek & Bray, 1981).

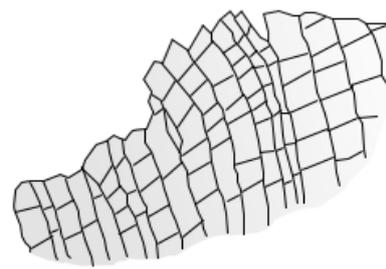
- **Vuelco por flexión o pandeo.** Se desarrolla bajo un mecanismo compuesto por flexiones pseudocontinuas del material, individualizado en columnas, debido a una serie de movimientos acumulados a lo largo de las discontinuidades. Cuando se desencadena el movimiento, por transmisión de la carga en el pie del talud, el mecanismo progresa hacia el interior del macizo rocoso, originando grietas de tracción. (Figura 9a).
  
- **Vuelco de bloques.** Es característico de aquellos macizos rocosos que tienen sistemas de discontinuidades ortogonales, dando lugar a una geometría de columnas divididas en bloques. El empuje sobre los bloques inferiores origina su desplazamiento y una vez producido, el movimiento progresa hacia la parte superior del talud. (Figura 9b).
  
- **Vuelco de bloques por flexión.** Es un caso que participa de las características de los dos anteriormente descritos. Se produce cuando los bloques son alargados, debido a flexiones en el pie del talud e intermovimientos relativos de las distintas unidades. (Figura 9c).



a) Vuelco por flexión



b) Vuelco de bloques



c) Vuelco de bloques por flexión

Figura 9: Tipos de rotura por vuelco. (Goodman & Bray, 1976).

Las condiciones estructurales necesarias para este mecanismo se enlistan a continuación (Hoek & Bray, 1981) y se ilustran en la Figura 10.

- a) El rumbo de las capas debe ser aproximadamente paralelo al del talud. Diferencias en estas orientaciones de entre 15°-30° han sido citadas entre varios autores, pero por consistencia entre otros modelos de mecanismo de rotura, un valor de 20° es apropiado. (Figura 10a).
- b) El buzamiento de las capas debe tender hacia el interior del talud. Usando el convenio de dirección del buzamiento, las condiciones 1 y 2 se pueden fijar como sigue: la dirección del buzamiento de las capas, entre la dirección de la cara del talud debe de ser entre 160° y 200°. (Figura 10b).

$$\alpha_p = (\alpha_f \pm 180^\circ) \pm 20^\circ$$

- c) En orden para que el deslizamiento intercapas ocurra, el polo del círculo máximo de la discontinuidad a volcarse debe tener una inmersión menor que la inclinación de la cara del talud menor que el ángulo de fricción. (Figura 10b).

$$(90^\circ - \psi_p) = (\psi_f - \phi_p)$$

Dónde:

$\psi_f$  = Buzamiento de la cara del talud.

$\psi_p$  = Buzamiento de las capas (planos).

$\phi_p$  = Ángulo de fricción a través de los planos.

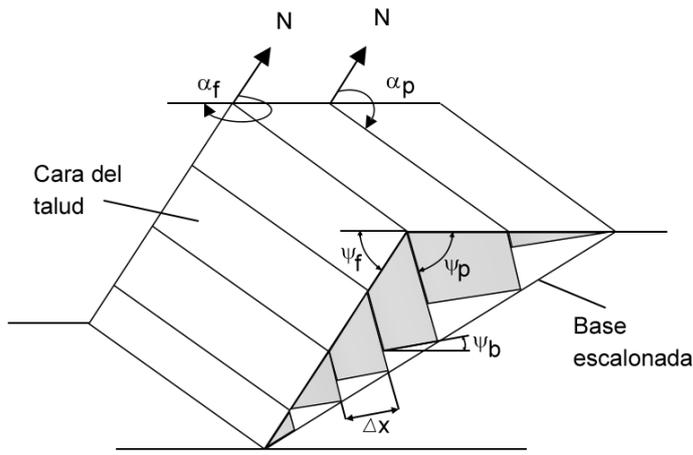
$\alpha_p$  = Dirección de buzamiento del plano.

$\alpha_f$  = Dirección de buzamiento del talud.

Esta condición ha sido modificada en función del ángulo de fricción interna (Choquet & Tanon, 1985, en Norrish & Wyllie, 1999).

$$(90^\circ - \psi_p) = (\psi_f - \phi_p + k)$$

Donde:  $k = 0$  para  $\phi_p < 20^\circ$ , y  $k = 3/5(\phi_p - 20^\circ)$  para  $\phi_p \geq 20^\circ$



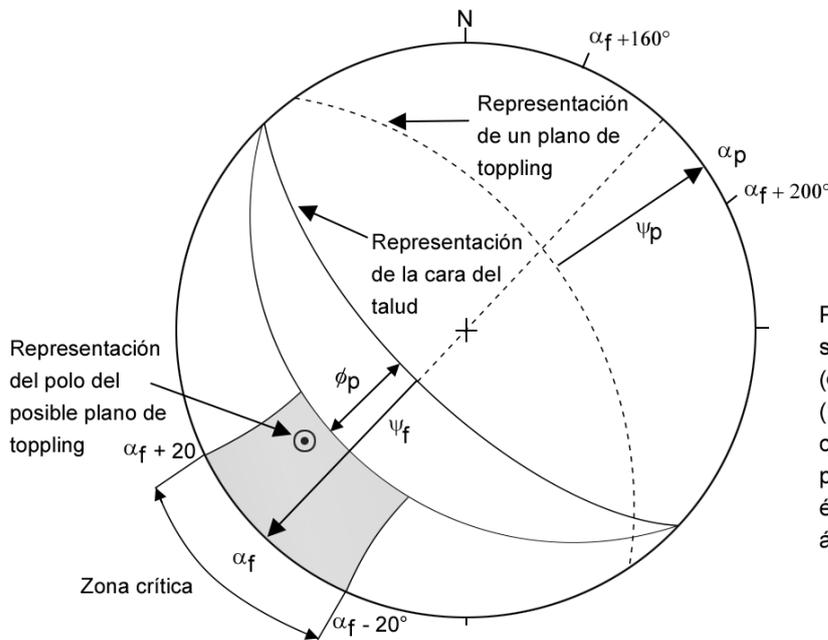
Donde:

- $\alpha_f$  = Dir. del buzamiento de la cara del talud.
- $\alpha_p$  = Dirección del buzamiento del plano.
- $\psi_f$  = Buzamiento del talud.
- $\psi_b$  = Buzamiento del plano de base.
- $\psi_p$  = Buzamiento del plano.
- $\phi_b$  = Ángulo de fricción del plano de base.
- $\phi_p$  = Ángulo de fricción del plano.
- $\Delta x$  = Ancho de la columna.

Condiciones para Mecanismo en Vuelco:

1.  $\alpha_p = (\alpha_f \pm 180) \pm 20^\circ$ .
2.  $(90 - \psi_p) \leq (\psi_f - \phi_p)$ .

a) Modelo del Mecanismo en Vuelco



Planos de discontinuidad que satisfagan las desigualdades  $(\alpha_f + 160^\circ) \leq \alpha_p \leq (\alpha_f + 200^\circ)$  y  $(90^\circ - \psi_p) \leq (\psi_f - \phi_p)$  son cinemáticamente viables como planos de vuelco. Los polos de éstos se ubicarán dentro del área sombreada.

b) Representación Estereográfica

Figura 10: Análisis cinemático para mecanismo de rotura por vuelco. a) Modelo del mecanismo de rotura por vuelco. b) Representación estereográfica. (Hoek & Bray, 1981).

## 2.2.4 Análisis de Taludes

Este proceso, implica determinar y comparar si existe suficiente resistencia a lo largo de la superficie más probable de falla para soportar los esfuerzos de cortante. La modelación matemática permite analizar las condiciones de estabilidad de los taludes naturales y la seguridad y funcionalidad del diseño en los taludes artificiales, comúnmente definido en términos de un Factor de Seguridad (F.S.). Suárez (2009), menciona diversos métodos para realizar el cálculo de estabilidad de un talud en roca (Figura 11), como los métodos numéricos; que muestran la mejor aproximación al detalle de las condiciones de estabilidad, y los métodos de equilibrio límite; que son los más sencillos de utilizar y permiten analizar los casos de rotura traslacional y rotura rotacional, así como las roturas de inclinación (vuelco) y las roturas en cuña; de igual forma, permite el análisis combinado con técnicas probabilísticas.

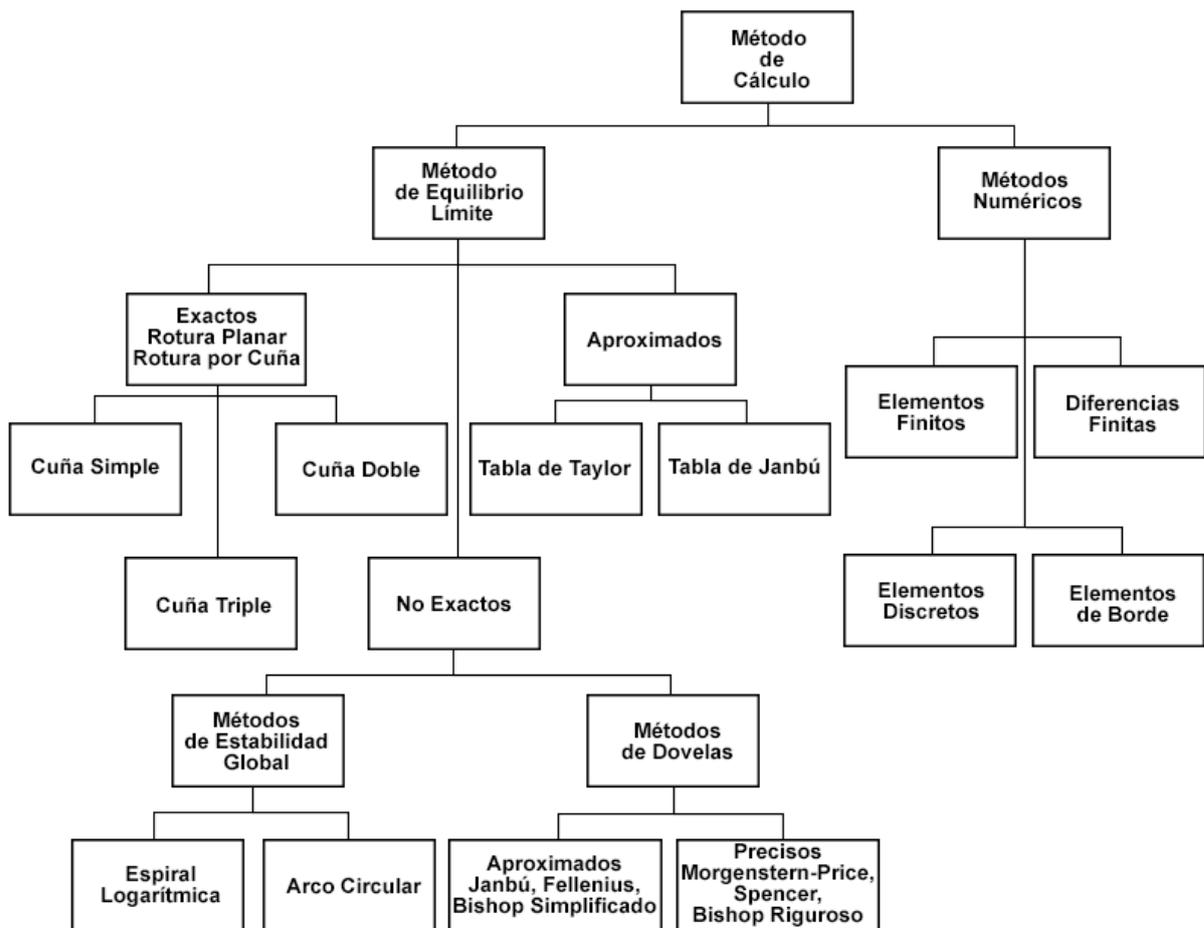


Figura 11: Métodos de análisis de estabilidad de taludes. (Suárez, 2009).

### 2.2.5 Factor de Seguridad

Fellenius (1922) presentó el Factor de Seguridad como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la rotura, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla, citado por Suárez (2009).

$$F. S. = \frac{\text{Resistencia al cortante disponible}}{\text{Esfuerzo al cortante actuante}}$$

Suarez (2009), menciona que otro criterio es dividir la masa que se va a estudiar en una serie de tajadas, dovelas o bloques y considerar el equilibrio de cada tajada por separado. Una vez realizado el análisis de cada tajada se analizan las condiciones de equilibrio de la sumatoria de fuerzas o de momentos.

### 2.2.6 Método de Equilibrio Límite

Un bloque deslizante está en condición de equilibrio límite, cuando las fuerzas actuantes son exactamente iguales a las fuerzas resistentes, siendo equivalente a un Factor de Seguridad de 1.0. De acuerdo a Hoek & Bray (1981), este análisis es aplicable a bloques que deslizan en planos (rotura planar o rotura en cuña), pero bajo ciertas condiciones geométricas, el bloque puede caerse en lugar de deslizarse (rotura por vuelco), en cuyo caso se debe usar una forma diferente de análisis. El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas (Suarez, 2009).

### Métodos Exactos

Los métodos de equilibrio límite se basan en las leyes de la estática, proporcionando soluciones exactas; sin embargo, Suarez (2009) menciona que no tiene en cuenta las deformaciones, la distribución de las presiones, asume el material como isotrópico, supone esfuerzos uniformemente distribuidos y modelos de falla sencillos, por lo que, los métodos exactos se aplican sólo en taludes de geometría sencilla, como la rotura planar y la rotura en cuña.

## Métodos no Exactos

A diferencia de los métodos exactos, la geometría de la superficie de falla no permite obtener una solución exacta mediante las leyes de la estática, debido a que el problema es hiperestático y se deben introducir consideraciones adicionales o hipótesis previas para obtener su solución.

### ➤ Métodos de Dovelas

El método de dovelas permite dividir la masa susceptible de deslizamiento en una serie de tajadas verticales (Figura 12), y estudiar el equilibrio de cada una de ellas aisladamente, teniendo en cuenta la influencia de todas las demás, siendo mayor la precisión cuanto mayor sea la cantidad de tajadas. Laín, citado por Ramírez & Alejano (2004), menciona que el problema presenta más incógnitas que ecuaciones; esto obliga a realizar unos supuestos, que son los que caracterizan y diferencian unos métodos de otros.

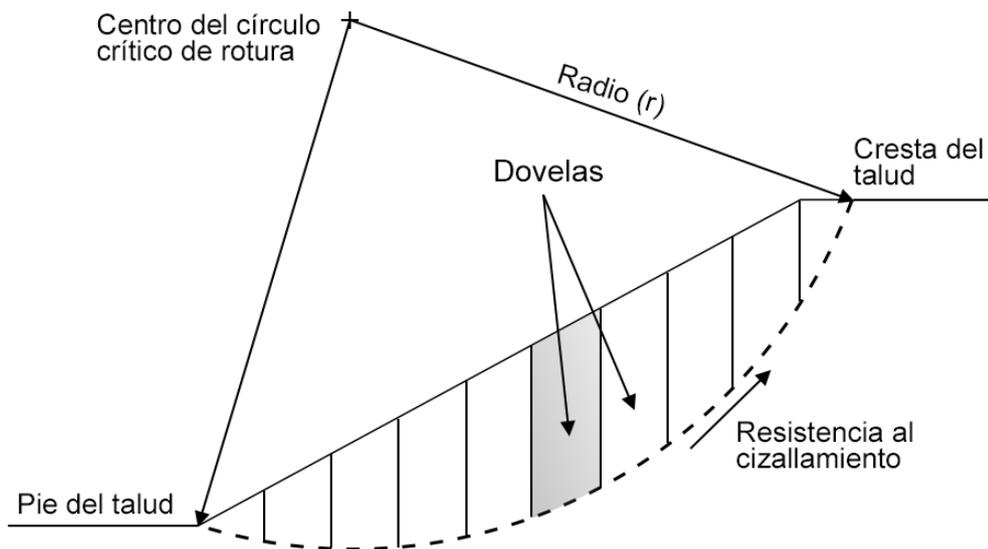


Figura 12: División de la masa deslizante de una rotura circular en una serie de fajas o rebanadas verticales. (Ramírez & Alejano, 2004).

La Figura 13 se presenta esquemáticamente una rebanada, de anchura  $\Delta x_i$ , de una masa de roca en la que puede tener lugar una rotura circular, teniendo en cuenta las fuerzas que ejercen las rebanadas superiores e inferiores y los empujes de agua.

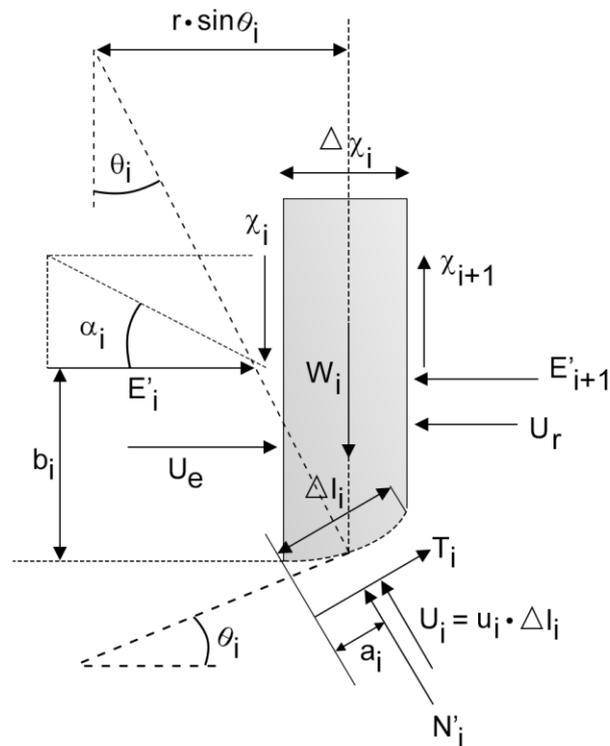


Figura 13: Esquema de fuerzas y aspectos geométricos en una rebanada. (Ramírez & Alejano, 2004).

Las fuerzas que actúan en una de estas rebanadas son en primer lugar, y sobre las caras laterales de la rebanada, las resultantes de los esfuerzos efectivos normales  $E'_i$ , y tangenciales  $X_i$  y de las presiones intersticiales  $U_e$  y  $U_r$ ; en la superficie de rotura actúan la resultante de los esfuerzos normales efectivos  $N'_i$ , de las resistencias al corte  $T'_i$  y de las presiones intersticiales  $U_i$ .

Para resolver un problema con  $n$  rebanadas, se dispone de  $3n$  ecuaciones,  $n$  para cada rebanada: equilibrio de fuerzas horizontales, equilibrio de fuerzas verticales y de momentos. Sin embargo, las incógnitas a resolver son  $4n-2$ ;  $n$  valores de  $N'_i$ ,  $n-1$  valores de  $E'_i$ ,  $n-1$  valores de  $X_i$ ,  $n-1$  valores de  $b_i$  y 1 valor del **F.S.**

Cuando se realizan más hipótesis de las necesarias y típicamente  $n-1$  hipótesis; al haber más hipótesis que ecuaciones, no se cumplirían todas las condiciones de equilibrio, se habla de métodos aproximados. Los métodos precisos son aquellos que sólo establecen  $n-2$  hipótesis, suele requerir el uso de ordenador y en general suelen utilizarse en fases avanzadas de proyectos; sin embargo, soluciones obtenidas irá en general más asociado a la verosimilitud de las hipótesis que al número de las mismas.

Los métodos de dovelas utilizados para la presente investigación, son los descritos por Laín, citado de Ramírez & Alejano (2004), los cuales presentan las condiciones estáticas de equilibrio satisfechas en cada uno de ellos. Suárez (2009) presenta algunos de los métodos más utilizados, los cuales se resumen en la Tabla 7.

- **Método de Bishop simplificado (1955).** Asume que las fuerzas tangenciales en las caras de las rebanadas son nulas ( $X_i = 0$ ), reduciendo en n-1 el número de incógnitas, lo que lleva a un sistema aproximado, ya que el equilibrio de las fuerzas horizontales no se satisface en una de las rebanadas.
- **Método de Spencer (1967).** Supone que la fuerza lateral sobre cada rebanada forma un ángulo  $\alpha$  con la horizontal. Este método es exacto, ya que tiene el mismo número de ecuaciones que de incógnitas.

$$\frac{X_i}{E'_i} = \tan \alpha$$

Estas n-1 hipótesis reducen el número de incógnitas a 3n-1, pero la inclinación constante es una nueva incógnita, por lo que el sistema queda completamente determinado con 3n incógnitas y otras tantas ecuaciones.

- **Método de Morgenstern y Price (1965).** Estos autores proponen un método similar al de Spencer, sólo que la inclinación de las fuerzas resultantes aplicadas en las caras de las rebanadas se asume que varía de acuerdo con un tramo de una función arbitraria, introduciendo la incógnita  $\lambda$ , de acuerdo con la siguiente relación:

$$\alpha_i = \frac{X_i}{E'_i} = \lambda \cdot f(x)$$

Donde  $f(x)$  es una función que se elige arbitrariamente (por ejemplo la función seno o la función mitad del seno), siendo necesario un ordenador para realizar los tanteos precisos para que la función  $f(x)$  sea la más idónea. Este tramo de la función seleccionada introduce la incógnita adicional, dejando el sistema completamente determinado con 3n ecuaciones y otras tantas incógnitas.

Tabla 7: Métodos de análisis de estabilidad de taludes

Método	Superficie de Falla	Equilibrio	Características
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	De Fuerzas	No tienen en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisfacen equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizante como para la dovelas individuales, los factores de seguridad son bajos
Bishop Simplificado (Bishop 1955)	Circulares	De momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo en número de incógnitas
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma de superficie de falla	De fuerzas	Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. Los factores de seguridad son bajos.
Sueco Modificado U.S Army Corps of Engineers 1970	Cualquier forma de superficie de falla	De fuerzas	Asume que todas las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie del terreno. Los factores de seguridad son generalmente altos.
Lowe y Karafiath 1960	Cualquier forma de superficie de falla	De fuerzas	Se considera el más preciso de los métodos de equilibrio de fuerzas.
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.
Sarma 1973	Cualquier forma de superficie de falla	Momentos y Fuerzas	Permite desarrollar una relación entre el coeficiente sísmico y el Factor de Seguridad
Elementos Finitos	Cualquier forma de superficie de falla	Analiza esfuerzos y deformaciones	Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de elementos, pero no se obtiene un Factor de Seguridad.
Espiral Logarítmica	Espiral Logarítmica	Momentos y Fuerzas	Existen diferentes métodos con diversas condiciones de equilibrio.

Fuente: Suárez (2009).

## 2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

**Deslizamiento.** Consiste en movimientos de masas de roca, residuos o tierra hacia debajo de un talud (Cruden, 1991).

**Desprendimiento.** Es la caída de una masa de cualquier tamaño de un talud de fuerte pendiente, a lo largo de una superficie en la que se produce poco o ningún desplazamiento de corte, y desciende principalmente por caída libre, a saltos o rodando (Varnes, 1978).

**Estructural.** Se refiere a las roturas que ocurren naturalmente en la roca, como los planos de estratificación, las juntas y las fallas que generalmente se denominan discontinuidades (Hoek & Bray, 1981).

**Geomorfología.** Brunsdén, menciona que es el estudio de las formas de la superficie de la tierra, su origen, los procesos relacionados con su desarrollo y las propiedades de los materiales, con lo cual se puede predecir el comportamiento y el futuro estado (Suárez, 2009).

**Litología.** Relacionado con el tipo de roca, minerales presentes, discontinuidades y micro-estructura (fábrica y textura) de la roca original (Suárez, 2009).

**Talud.** Talud o ladera que presenta una pendiente o cambios significativos de altura. En la literatura técnica se define como “ladera” cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y “talud” de forma artificial. (Suarez, 2009).

**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).

## **CAPÍTULO III**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1 UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

##### **3.1.1 Geográfica**

La carretera El Tayal – Santa Isolina Bajo, se encuentra ubicada al NO de la ciudad de Chota, en los cuadrángulos de Cutervo (13-f) y Chota (14-f), con una altura promedio de 2000 m.s.n.m., y con una extensión de 9.53 km. Estos datos se obtuvieron mediante el Plano N° 03 (Modelo Digital de Elevaciones – MDE). Las coordenadas que definen los puntos extremos del área de investigación están definidos por Punto Inicial: El Tayal. E: 744412, N: 9277187, en el Km 134+270 y Punto Final: Santa Isolina Bajo. E: 737835, N: 9282457, en el Km 124+740. Las coordenadas en el sistema WGS-84 se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8: Coordenadas UTM - WGS-84 del tramo de investigación

<b>Tramo</b>	<b>Kilómetro</b>	<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>	<b>Altitud (m.s.n.m.)</b>
Punto de Inicio: El Tayal	Km 134+270	744412	9277187	2001
Punto Final: Santa Isolina Bajo	Km 124+740	737835	9282457	1760

##### **3.1.2 Política**

La investigación se ubica entre los Centro Poblados de El Tayal y Santa Isolina Bajo, entre los Distritos de Cutervo y Cochabamba, en las Provincias de Cutervo y Chota, en el Departamento de Cajamarca. La ubicación política de la investigación se presenta en el Plano N° 01 (ver Plano de Ubicación).

### 3.2 ACCESIBILIDAD

El área de estudio es accesible desde la ciudad de Cajamarca, mediante la vía asfaltada Cajamarca – Chota, alternando tramos sin asfaltar, con un recorrido de 129 km en promedio y un tiempo aproximado de 3 horas en automóvil. La Tabla 9 muestra que el área de estudio se encuentra en la ruta de acceso Chota – Lajas – El Tayal – Santa Isolina Bajo, mediante una vía asfaltada, alternando tramos de trocha, con un recorrido de 27.18 km en promedio y un tiempo aproximado de 1 hora en automóvil. La accesibilidad se muestra en el Plano N° 02 (ver Plano de Accesibilidad).

Tabla 9: Acceso al área de investigación.

Ruta Terrestre	Distancia Km	Estado	Tiempo
Cajamarca - Chota	129	Asfaltada	3 horas
Chota - Lajas	9.4	Trocha	25 minutos
Lajas - El Tayal	8.25	Asfaltada por tramos	20 minutos
El Tayal - Santa Isolina Bajo	9.53	Asfaltada por tramos	25 minutos

### 3.3 METODOLOGÍA

La investigación se centró en describir y explicar los diversos factores que causan la inestabilidad de forma natural, sin manipulación intencional de ninguna variable y en un tiempo determinado; por lo cual, la investigación es de tipo analítico, descriptivo y explicativo y la metodología empleada es no experimental de tipo transversal en el tiempo.

#### 3.3.1 Población de estudio

Taludes críticos de la carretera El Tayal – Santa Isolina Bajo, ubicados entre el tramo de la carretera Km 134+270 - Km 124+740.

#### 3.3.2 Muestra

Factores litomorfoestructurales y las variables desencadenantes de la infiltración de agua y sismicidad.

### **3.3.3 Unidad de Análisis**

Las clasificaciones geomecánicas: RQD, RMR y GSI; el nivel freático, los coeficientes de sismicidad y el Factor de Seguridad.

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

### **3.4.1 Técnicas**

- Recopilación de información: involucró la búsqueda, obtención y revisión de informes anteriores, así como teorías relacionadas con el problema de la investigación.
- Interpretación de imágenes satelitales: realizado mediante la evaluación de la topografía, estructuras geológicas, drenaje y contactos geomorfológicos.
- Ensayos geomecánicos in situ: realizado mediante el golpe de la picota de geólogo en la superficie de la roca intacta en los macizos rocosos para la determinación de la resistencia a la compresión uniaxial.
- Recolección de información mediante tablas geomecánicas: mediante la utilización de las Tabla 01, 02 y 05 para las clasificaciones geomecánicas RQD, RMR y GSI respectivamente.
- Proceso de información de propiedades geomecánicas en el software de la compañía Rocscience Inc. Rock Data v.4.0: mediante el cual se determinaron los parámetros físicos - mecánicos de la roca a partir de los datos de entrada obtenidos en las clasificaciones geomecánicas.
- Análisis mediante el Software de la compañía Rocscience Inc., Dips v.6.0: mediante la determinación de los tipos de rotura planar, cuña y vuelco.
- Análisis mediante el Software de la compañía Rocscience Inc., Slide v.6.0: mediante el cálculo del Factor de Seguridad, a partir del uso de tres métodos del Equilibrio Límite (Bishop Simplificado, LE/Morgenstern-Price y Spencer) y bajo seis condiciones (natural, saturación parcial, saturación total, sismicidad máxima, sismicidad máxima con saturación parcial y sismicidad máxima con saturación total) que representan el estado actual y pronóstico del talud.

### 3.4.2 Instrumentos y Equipos

- GPS Garmin Navigator: sirvió para la ubicación en los planos base (Plano Satelital, Topográfico y Geológico) a través de coordenadas UTM (Universal Transversal Mercator).
- Libreta de Geólogo: sirvió para la recolección de datos.
- Lápices y lapiceros: utilizado para anotaciones y cartografiado.
- Brújula Geotécnica tipo Brunton: sirvió para la medición de las pendientes de los taludes, rumbos y buzamientos de las familias de discontinuidades y estructuras.
- Picota de Geólogo: herramienta necesaria para la recolección de muestras y ensayos in situ sobre la superficie de la roca intacta para la determinación de la resistencia a la compresión uniaxial.
- Flexómetro de 5m: sirvió para la medición de la geometría del talud, así como para la medición del espaciado y el estado de las familias de discontinuidades, mediante la Tabla 02 de la clasificación RMR.
- Protactor 1/1000: sirvió para el cartografiado de la geología del área de investigación.
- Lápiz de dureza: herramienta utilizada para identificar minerales por medio de su dureza relativa.
- Ácido Clorhídrico (HCl): sirvió para el reconocimiento de rocas calcáreas.
- Lupas (10X, 20X): sirvió para el reconocimiento de los minerales y rocas de los afloramientos.
- Tablas geomecánicas: sirvió para la recolección de información de las propiedades geomecánicas de los macizos rocosos.
- Cámara digital: instrumento utilizado para el registro fotográfico.
- Laptop: sirvió para la recepción y procesamiento de datos, redacción de la tesis y la elaboración de los planos.
- Planos: Satelital 1/25000, MDE 1/25000, Geológico 1/25000: planos base que sirvieron para la delimitación de las formaciones geológicas, topografía, estructuras, drenaje y contactos geomorfológicos.

### **3.5 PROCEDIMIENTO**

#### **➤ Etapa de gabinete I**

Está conformada por la búsqueda, obtención revisión de informes anteriores, teorías relacionadas con el problema de investigación y la evaluación de imágenes satelitales para un mejor estudio de estructuras y geomorfomas. Con la Data de las cartas geológicas 13-f (Cutervo) y 14-f (Chota) elaborado por el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), se relazaron los planos básicos, Satelital, Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y Geológico. La segunda fase lo conforma campañas de campo constituyendo un análisis e interpretación de los datos obtenidos en campo.

#### **➤ Etapa de campo**

Se orientó a la ejecución de investigaciones básicas de campo con el fin de obtener la información necesaria que permita encontrar los principales parámetros geomecánicos - geotécnicos; por lo cual, se realizó el cartografiado geológico y la caracterización geomecánica de la carretera El Tayal – Santa Isolina Bajo, a escala 1: 25 000; logrando un análisis comparativo y descriptivo, permitiendo definir las condiciones geotécnicas, evidenciando inestabilidad.

#### **➤ Etapa de gabinete II**

Con la información obtenida en las etapas anteriores, se procesó e interpretó utilizando los siguientes software: SAS Planet, ArcGIS 10.3.0, AutoCAD 2016, y los software de la Compañía Rocscience.Inc, Rock Data v.4.0, Dips v.6.0, Slide v.6.0. En base al modelo digital de elevaciones (MED) y el procesamiento de la información obtenida durante la investigación, se diseñó el plano geomorfológico de pendientes y el plano altitudinal de pendientes. Por último se elaboraron los planos de zonificación geomecánica - geotécnica.

### 3.6 GEOMORFOLOGÍA

Para la zonificación de las unidades geomorfológicas, mediante el software ArcGIS 10.3.0, se realizó el Plano N° 03 (ver Plano Modelo Digital de Elevación), con el cual se determinó la altimetría y la pendiente de la zona de estudio, a partir de la elaboración del TIN (Red Irregular de Triángulos), seguida del MDT (Modelo Digital del Terreno). Finalmente, para determinar las unidades geomorfométricas se tuvo en cuenta la altura y la pendiente considerada en la clasificación de Rodríguez (2016). Los datos obtenidos se muestran en la Tabla N° 10, dicha información se procesó empleando el software ArcGis 10.3.0 para la elaboración del Plano N° 04 (ver Plano Unidades Geomorfométricas).

Tabla 10: Unidades Geomorfométricas

UNIDADES GEOMORFOMÉTRICAS			
Pendientes	Descripción	Área (km)	Área (%)
0° - 8°	Planicies	1.84	19.98
8° - 20°	Lomadas	2.83	30.58
20° - 50°	Laderas	3.34	36.09
50° - 90°	Escarpas	1.23	13.34
		9.24	100.00

Fuente: Rodríguez (2016).

#### 3.6.1 Planicie

Son superficies ligeramente onduladas, caracterizadas por presentar rangos de pendientes de 0° a 8°, en la cual su morfología es bastante homogénea producto de procesos principalmente denudacionales. Como se muestra en la Foto 1, por lo general estas zonas presentan buena cobertura vegetal; por lo que, son de fácil manejo para actividades agrícolas y ganaderas, aunque muchas de estas geoformas están cubiertas por capas de material aluvial y fluvio-aluvial. Se cartografiaron, en su mayoría, en los cauces del Río Chotano relacionadas con depósitos fluviales y fluvio-aluviales, y en un pequeño porcentaje en zonas altas relacionadas con depósitos aluviales, constituyendo la segunda geoforma con menor distribución de área.



Foto 1: Planicie con pendiente aproximada de 5°, ubicada al margen izquierdo del Río Chotano en depósitos fluviales a 200 m del Centro Poblado El Tayal. Coordenadas: E 774280, N 9277347, Cota 1997 m.s.n.m.

### 3.6.2 Lomada

Son superficies con pequeñas elevaciones, caracterizadas por presentar rangos de pendientes de 8° a 20° y una morfología heterogénea. Al igual que las planicies, presentan buena cobertura vegetal; sin embargo, su uso agrícola y ganadero es relativamente menor que las planicies, como se muestra en la Foto 2. Se cartografiaron en ambos flancos del Río Chotano, principalmente en partes medio-altas del área de estudio, relacionadas con depósitos aluviales y litológicamente presentes en las Formaciones Chúlec y Pariatambo del Cretácico Inferior y la Formación Pullucana del Cretácico Superior. Constituyen la segunda geoforma con mayor distribución de área.



Foto 2: Lomadas con pendiente aproximada de 20°, de uso agrícola y ganadero, ubicada al margen derecho del Río Chotano en depósitos aluviales y fluvio-aluviales. Coordenadas: E 742764, N 9280084, Cota 1955 m.s.n.m.

### 3.6.3 Ladera

Son superficies con inclinaciones moderadas, caracterizadas por presentar rangos de pendientes de 20° a 50° debido principalmente a procesos denudacionales. Presentan una morfología heterogénea con escasa cobertura vegetal (Foto 3). Se cartografiaron en las partes medio-altas y ocupa un gran porcentaje del área de estudio, constituyendo la geoforma con mayor distribución de área. Está relacionada con depósitos aluviales con delgadas capas de depósitos coluviales y litológicamente presente en las Formaciones Chúlec, Pariatambo y la Formación Pullucana.



Foto 3: Laderas con pendiente aproximada de 40° a 45°, ubicada al margen derecho del Río Chotano en depósitos aluviales. Coordenadas: E 743227, N 9278979, Cota 1967 m.s.n.m.

### 3.6.4 Escarpa

Son superficies con fuertes pendientes, caracterizadas por presentar rangos de pendientes mayores a  $50^\circ$  debido tanto a procesos denudacionales como a deformaciones estructurales. Como se puede apreciar en la Foto 4, presentan una morfología heterogénea con abundante cobertura vegetal. Este tipo de unidad geomorfológica es siempre la generadora de zonas críticas ya que por su gran pendiente y al ser sometidas a procesos de excavación mecánica entran en estado de desequilibrio continuo y son muy difíciles de estabilizar. Se cartografiaron en varios tramos de la carretera; así como también, en las Formaciones Chúlec, Pariatambo y la Formación Pulluicana. Constituyen la geoforma con menor distribución de área y la más crítica.

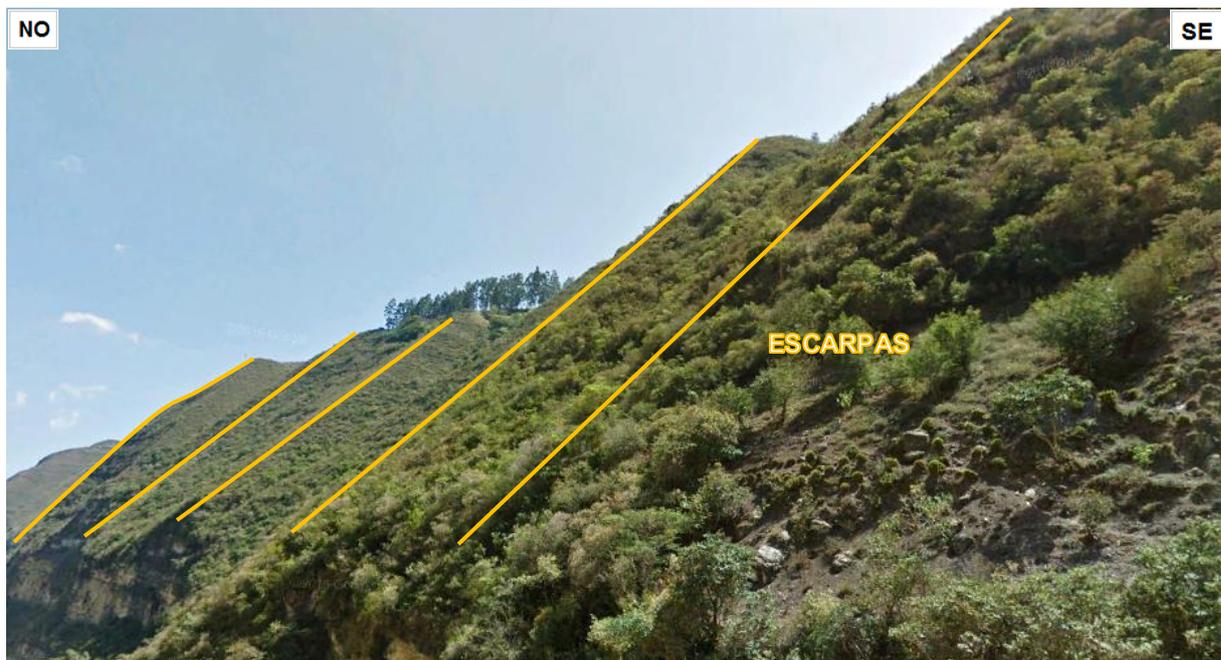


Foto 4: Escarpas con pendiente aproximada de  $70^\circ$  a  $75^\circ$ , ubicada al margen derecho del Río Chotano en la Formación Pariatambo. Las geoformas de la fotografía no constituyen zonas críticas por lo que su dirección de buzamiento se encuentra opuesto a la dirección del buzamiento del talud. Coordenadas: E 743227, N 9278979, Cota 1967 m.s.n.m.

## 3.7 GEOLOGÍA LOCAL

### 3.7.1 Grupo Crisnejas

#### 3.7.1.1 Formación Chúlec (Ki-ch)

Aflora en el Km. 129+200 hasta el Km. 134+150 de la carretera Chota – Cochabamba. Su litología consiste de lutitas, margas y calizas nodulares. Se caracteriza por presentar un color de superficie de meteorización crema o gris amarillento. Consiste en capas delgadas bien estratificadas de lutitas gris, margas amarillentas y calizas gris amarillentas (Foto 5). Las calizas son lutáceas y margosas.



Foto 5: Calizas nodulares de estratificación delgada de la Formación Chúlec, con color de meteorización gris amarillento. Coordenadas: E 743172, N 9279246, Cota 1947.

#### 3.7.1.2 Formación Pariatambo (Ki-pa)

Aflora en el Km. 127+400 hasta el Km. 129+900 de la carretera Chota – Cochabamba. Su litología consiste de calizas y lutitas. A pesar de las variaciones en su litología, siempre se presenta en capas delgadas. La caliza es fina de color negro, bituminosa y generalmente tiene olor fétido. Su estratificación es delgada y uniforme de tal manera que forma lajas bastante características. Las lutitas son negras y bituminosas, y ocurren como intercalaciones delgadas entre las capas calcáreas (Foto 6).

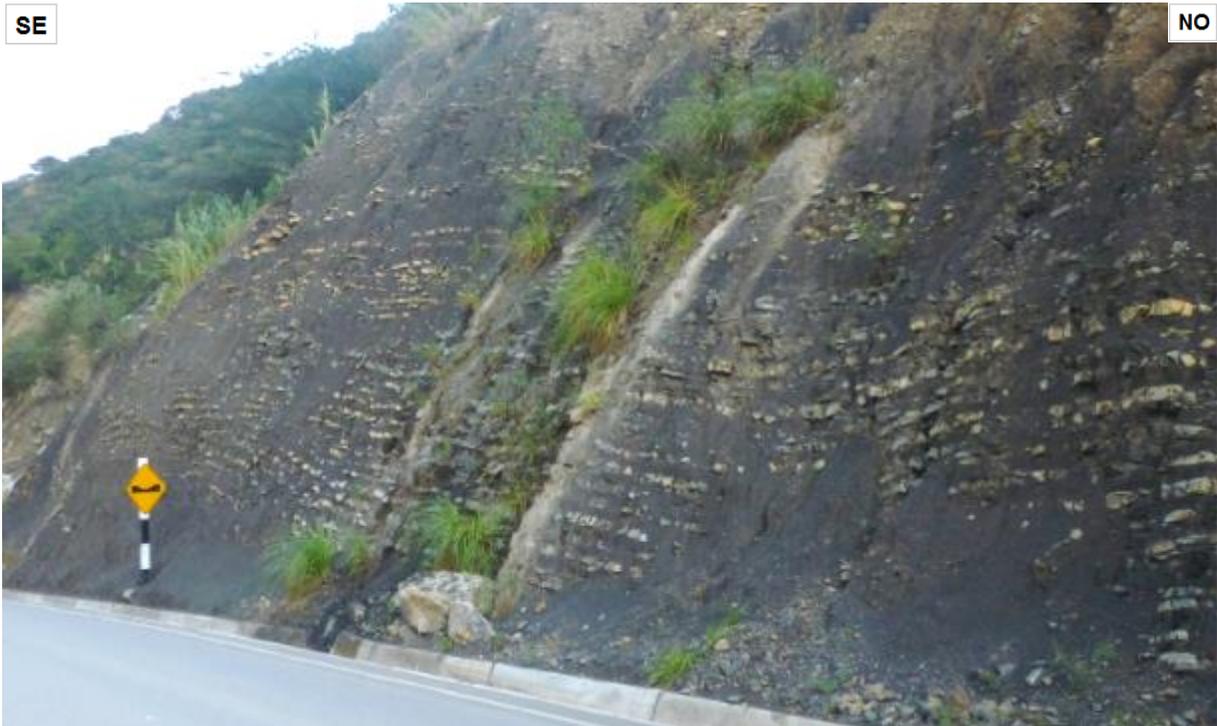


Foto 6: Calizas con intercalación de lutitas bituminosas en estratificación delgada formando lajas características de la Formación Pariatambo. Coordenadas: E 740371, N 9281362, Cota 1862.

### 3.7.2 Grupo Pulluicana (Ks-p)

Este Grupo está conformado por las Formaciones Yumagual y Mujarrún; sin embargo, en muchas partes del Norte del Perú, ésta separación no es muy evidente (Benavides 1956, y Robert 2002), por lo que, en el área bajo estudio se considera a las Formaciones Yumagual y Mujarrún como una sola unidad. Aflora en el Km. 125+060 hasta el Km. 126+730, y litológicamente consiste de calizas, margas, lutitas y areniscas. El color de superficie de meteorización varía entre crema y marrón claro. La litología predominante es una caliza arenosa, grisácea, que meteoriza a crema o marrón claro y que se presenta en capas medianas, nodulares o irregularmente estratificadas. Más al norte está representado por areniscas, limolitas y lutitas intercaladas con calizas nodulares, por lo que se evidencia un aumento en la proporción de sedimentos clásticos como se aprecia en la (Foto 7).



Foto 7: Calizas arenosas del Grupo Pulluicana con color de meteorización gris-amarillento. Coordenadas: E 738257, N 9282239, Cota 1785.

### 3.7.3 Depósitos Cuaternarios

El área de estudio está constituido por depósitos cuaternarios aluviales, fluvio-aluviales y fluviales. Los depósitos aluviales se ubican en las partes altas del área de estudio y presentan acumulación de fragmentos rocosos de formas angulosas y sub-angulosas, de diferentes tamaños (gravas, cantos y bloques), en matriz limo arenoso producto de erosión de materiales rocosos. Los depósitos fluvio-aluviales y fluviales se ubican en los márgenes del Río Chotano y presentan material de fragmentos redondeados a sub-redondeados como bloques, gravas, arenas, limos y arcillas producto de la erosión del Río Chotano y sus afluentes. Estos depósitos presentan problemas geodinámicos en épocas de lluvia por las fuertes y continuas precipitaciones pluviales.

La información recolectada en campo ha sido procesada en gabinete empleando el software ArcGIS 10.3, la cual se puede visualizar en el Plano N° 05 (ver Plano Geológico).

## 3.8 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El área de estudio comprende eventos tectónicos de compresión (tectogénesis) que ocupa el sector oriental de la región. Las estructuras principales son pliegues largos de rumbo SO-NE que corresponde una fase tectónica principal que pliega con dirección predominante NO-SE la secuencia Mesozoica. Según Steinmann, citado por INGEMMET (1995), es probable que las estructuras edificadas por este episodio de plegamiento fueron de la Fase Incaica, probablemente del Eoceno Medio al Superior.

### 3.8.1 Deformación dúctil

#### 3.8.1.1 Plegamientos:

##### a. Anticlinal

Se encuentra ubicada al NO y SE de la carretera materia de estudio, constituyen pliegues de gran extensión longitudinal cuyos ejes tienen rumbo SO-NE y sus emplazamientos se encuentran en las estructuras estratigráficas de la Formación Pariatambo (Foto 8) y la Formación Chúlec.

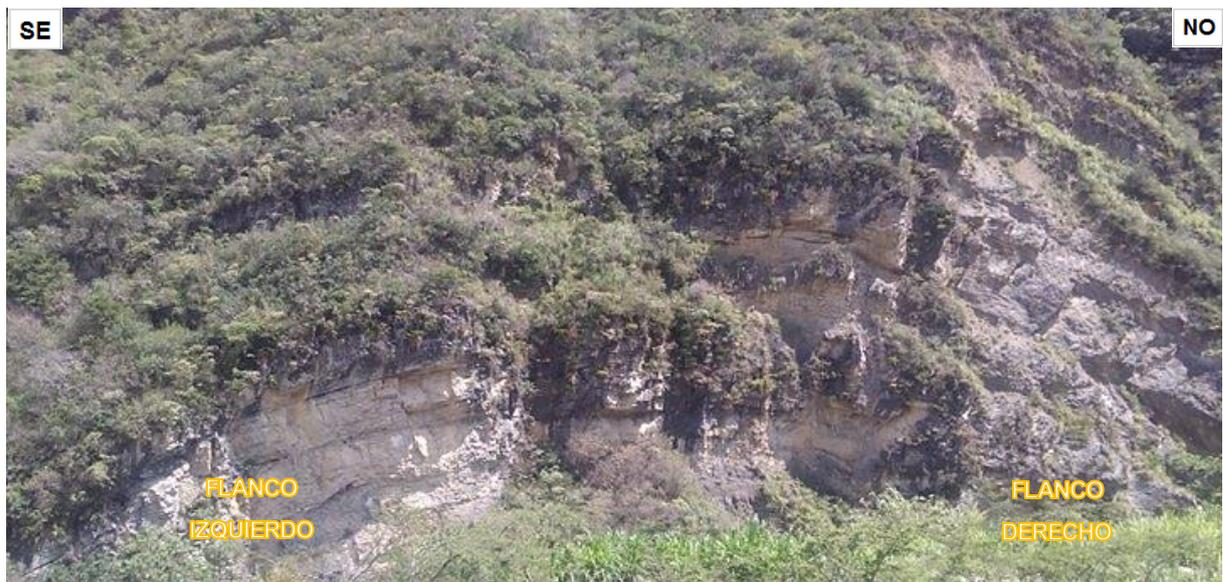


Foto 8: Anticlinal en la Formación Pariatambo, cuyo eje intersecta en la progresiva del km 128+200 con dirección SO-NE. Flanco derecho: DIP/42°, DD/126°. Flanco izquierdo: DIP/32°, DD/286°. Coordenadas: E 740345, N 9281356, Cota 1856.

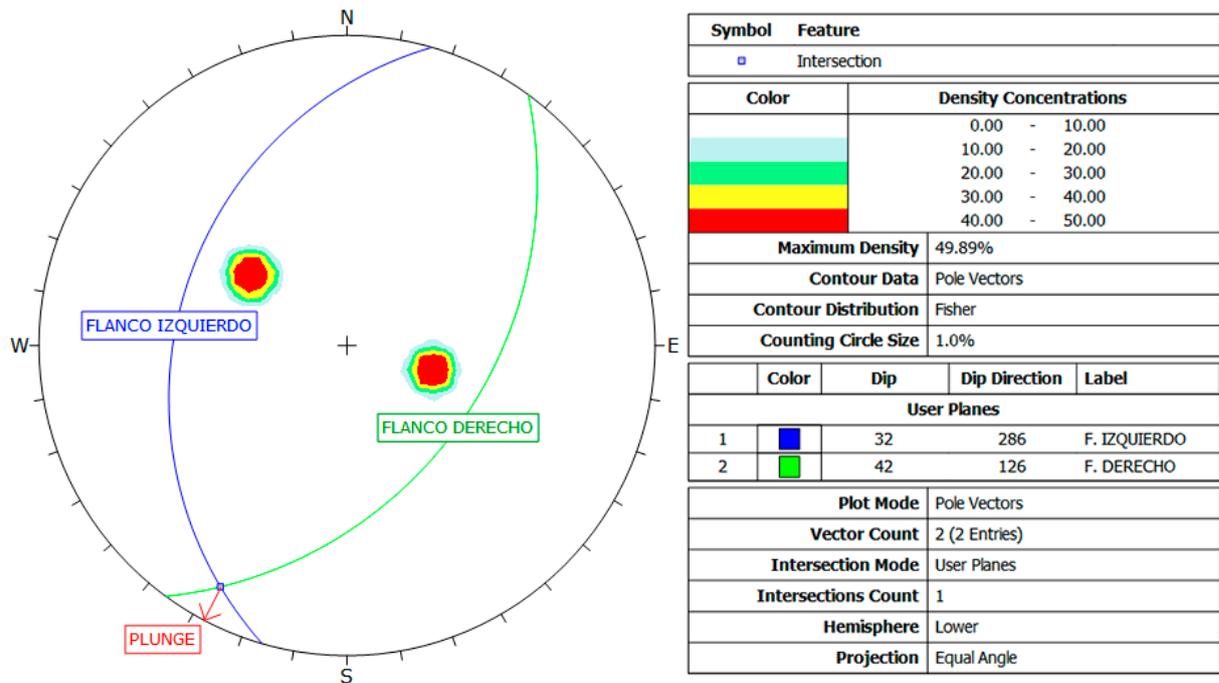


Figura 14: Representación estereográfica del anticlinal en la que se puede apreciar la dirección del eje NO-SE y con plunge de 8°.

### b. Sinclinal

Se encuentra ubicada al NW y SE de la carretera materia de estudio, constituyen pliegues de poca extensión longitudinal. Al igual que los anticlinales, sus ejes tienen rumbo SO-NE y sus emplazamientos se encuentran en las estructuras estratigráficas de la Formación Pariatambo (Foto 9) y la Formación Chúlec.



Foto 9: Sinclinal cortado por una falla inversa en la Formación Pariatambo, cuyo eje intersecta en la progresiva del km 128+180 con dirección SO-NE. Flanco derecho: DIP/68°, DD/118°. Flanco izquierdo: DIP/48°, DD/292°. Coordenadas: E 740180, N 9281343, Cota 1847.

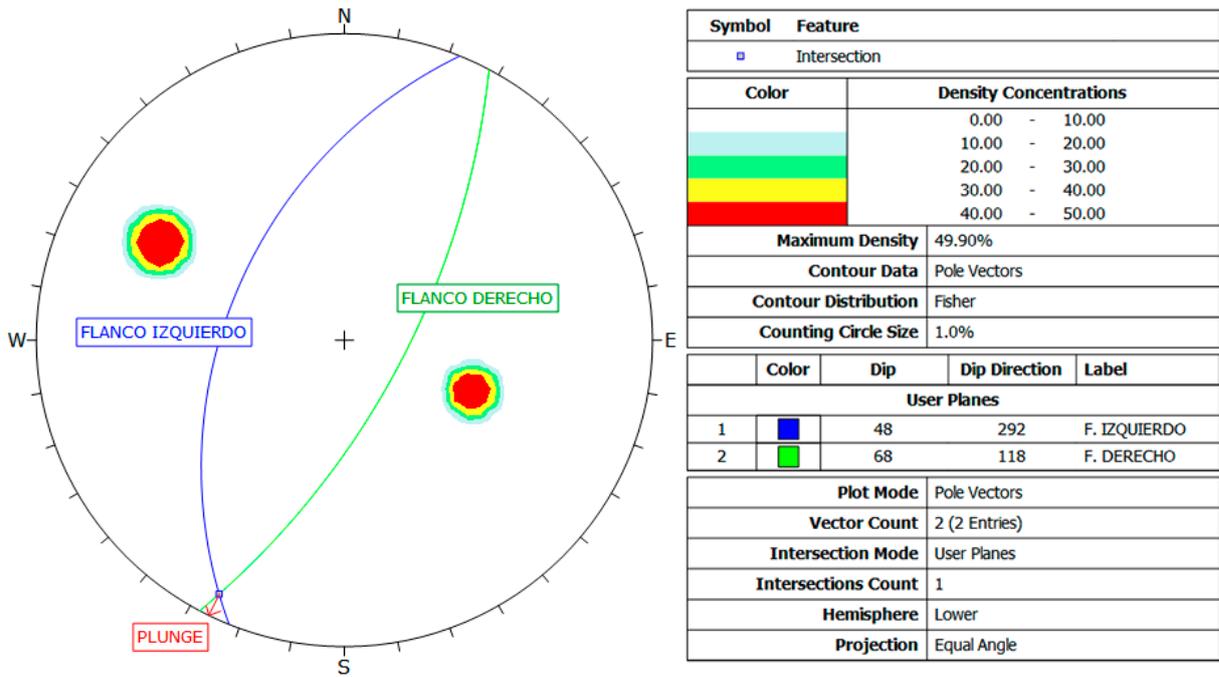


Figura 15: Representación estereográfica del sinclinal en la que se puede apreciar la dirección del eje NO-SE y con plunge de 5°.

### 3.8.2 Deformación frágil

#### 3.8.2.1 Falla inversa

Existe una relación estrecha entre las fallas inversas y los pliegues; por lo que, como se puede apreciar; tanto en la Foto 9, como en la Foto 10, las fallas asociadas al área de estudio son inversas en su mayoría y de alto ángulo con dirección de buzamiento SO. Aún donde no se observa fallamiento en la superficie, la rigidez con que las capas voltean el eje del pliegue sugiere la existencia de fallas inversas a profundidad.



Foto 10: Falla inversa de rumbo sinistral ubicado en la Formación Pariatambo. Orientación: DIP/64°, DD/82°. Coordenadas: E 740728, N 9281315, Cota 1871.

### 3.8.2.2 Diaclasas

Las masas rocosas se encuentran meteorizados, rugosos y presencia de diaclasas con relleno de calcita y arcilla de color gris a beige. Como se aprecia en la Foto 11, la carretera materia de estudio presenta tres familias principales de diaclasas.

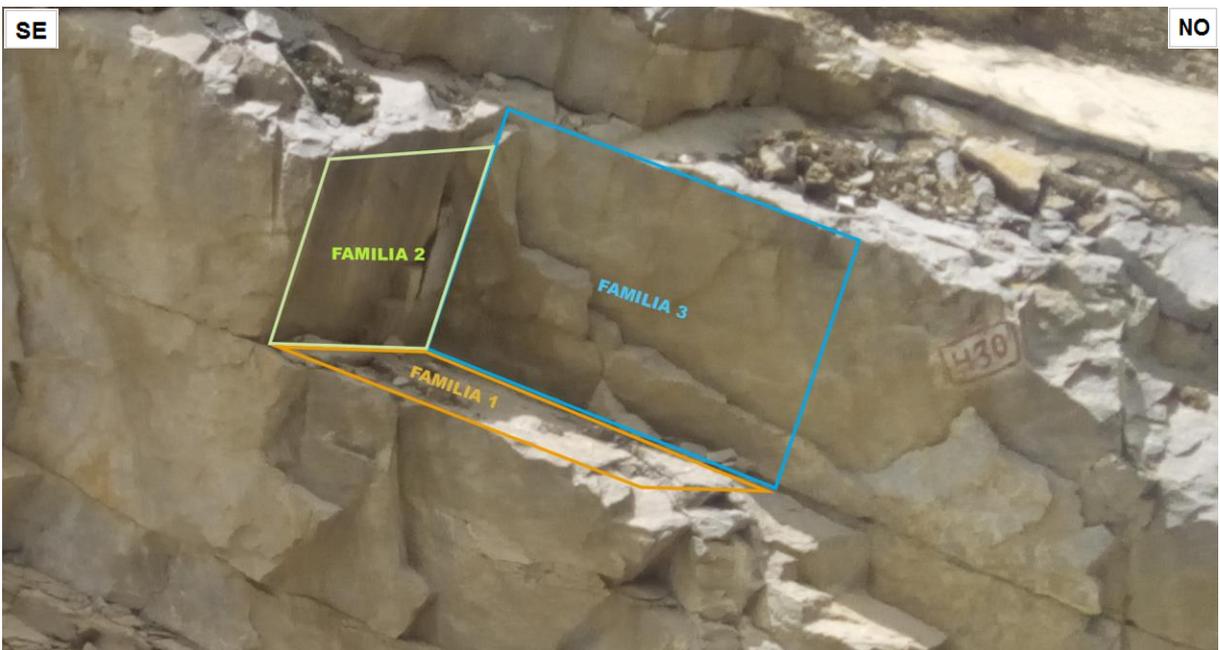


Foto 11: Familias principales de diaclasas ubicadas en la Formación Pulluicana. Familia 1: DIP/34°, DD/346°. Familia 2: DIP/74°, DD/234°. Familia 3: DIP/42°, DD/144°. Coordenadas: E 743138, N 9279599, Cota 1946.

### 3.9 ESTUDIO GEOTÉCNICO

El Estudio Geotécnico - Geomecánico de la carretera El TayaI – Santa Isolina Bajo se realizó en ocho taludes críticos, en los cuales se definieron aspectos geológicos como la litología, las estructuras, la geomorfología; geomecánicos mediante la aplicación de las clasificaciones geomecánicas (RQD, RMR, GSI); y los parámetros físico - mecánicos de las rocas, los cuales han sido calculados con el Criterio de Hoek - Brown mediante el uso del software RocData v.4.0, obteniendo el Ángulo de Fricción Interna ( $\phi$ ) y su respectiva Cohesión (c) para cada material.

La evaluación geotécnica - geomecánica en los taludes de la carretera consta de dos partes. La primera es la evaluación de los taludes por medio de metodologías empíricas, haciendo uso de la Valoración del Macizo Rocoso (RMR) propuesto por Bieniawski (1989), el Índice de Calidad de la Roca (RQD) propuesto por Priest & Hudson (1976) y el Índice de Resistencia Geológica (GSI) propuesto por Hoek et al. (2013). La segunda parte implica el uso de métodos analíticos, a través de las proyecciones estereográficas, que se obtienen mediante el software Dips v.6.0, identificándose las familias de discontinuidades propensas a producir las fallas del tipo planar, cuña o vuelco. Una vez identificadas estas familias, mediante el software Slide v.6.0, se realizó un análisis del talud en seis (6) condiciones que representan el estado actual y pronóstico del talud, determinando un Factor de Seguridad que de acuerdo a Hoek (2007) debe ser superior a 1.5 para considerarse como estable.

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 (Figura 16). La zonificación propuesta se basa en la distribución espacial de la sismicidad observada, las características generales de los movimientos sísmicos y la atenuación de éstos con la distancia epicentral; así como, la información neotectónica.

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. (Tabla 11).



Figura 16: Representación de zonas sísmicas definidas en la Norma Técnica E.030, Diseño Sismo-Resistente del Reglamento Nacional de Edificaciones, con su modificatoria con Decreto Supremo N° 003-2016-Vivienda. (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2016).

Tabla 11: 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 ( $k_v$ ) necesarios para el análisis sísmico, se hará mediante el Software Loadcap 2018 de la Empresa GeoStru y los parámetros de entrada se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12: Parámetros de entrada para el cálculo de los coeficientes sísmicos.

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

La Norma Técnica E.030 con su modificatoria con Decreto Supremo N° 003-2016-Vivienda, establece que el área de investigación está incluida en la Zona N° 3, por lo que la aceleración sísmica máxima considerado es de 0.35. Los valores recomendados del coeficiente de amplificación topográfica se presentan en el Anexo A del Eurocódigo EN 1998-5:2004 (Eurocódigo 8, Parte 5) (ver Anexo A). Se ha asignado el coeficiente de amplificación topográfica de  $S_T = 1$  al considerar que los taludes tienen alturas menores a 30 m y no presentan topografías irregulares con crestas largas. Los tipos de perfiles estratigráficos y su descripción se presentan en la Tabla 3.1 del Eurocódigo EN 1998-1:2004 (Eurocódigo 8, Parte 1) (ver Anexo A), los valores recomendados para cada tipo de perfil estratigráfico (Factor Suelo) se han tomado del Software Loadcap 2018. Los Taludes Críticos analizados son de tipo A, por lo que el Factor de Suelo considerado es de  $S = 1$ .

The screenshot shows the 'Software Loadcap 2018' interface. At the top, it indicates the normative standard is 'O.P.C.M. 3274'. A central dialog box is open, displaying the following settings and results:

- Zona Sismica: 1
- Accelerazione massima / g: 0.35
- Coefficiente amplificazione topografica: 1
- Categoria profilo stratigrafico: A
- Coefficiente di intensità sismico orizz.:  $k_h = 0.175$
- Coefficiente di intensità sismico vert.:  $k_v = 0.0875$

Buttons for 'Calcola', 'Ok', 'Annulla', and '?' are visible at the bottom of the dialog. In the background, other parameters like 'Roca' (Roca), 'Factor profundidad=1', and 'Efecto sísmico según' (Ningún efecto sísmico) are also visible.

Figura 17: Cálculo de los coeficientes sísmicos horizontal ( $k_h$ ) y vertical ( $k_v$ ) mediante el Software Loadcap 2018.

El Software Loadcap trabaja con normas europeas, por lo cual para la identificación de la Zona Sísmica se consideró la Normativa italiana O.P.C.M. 3274 (Ordenanza del Presidente del Consejo de Ministros), cuya normativa se basan en las normas europeas del Eurocódigo, redactadas por el Comité Europeo de Normalización (CEN). Dicha Normativa en el Anexo 1 - Criterios para la identificación de zonas sísmicas, divide al territorio italiano en 4 zonas sísmicas de acuerdo a la aceleración máxima del terreno (Ver Anexo A). Como se visualiza en la Figura 17, la Zona Sísmica insertada en el Software Loadcap es la Zona 1 de la Normativa italiana O.P.C.M. 3274 por presentar igual aceleración máxima que la Zona Sísmica 3 de la Norma Técnica peruana E.030 - Diseño Sismo-resistente. El cálculo realizado por el Software Loadcap muestra los valores de coeficiente sísmico horizontal  $k_h = 0.175$  y coeficiente sísmico vertical  $k_v = 0.088$ , valores utilizados en el análisis sísmico mediante el Software Slide v.6.0.

Aunque las lluvias son frecuentes, dada la compleja orografía de la región, la pluviometría varía mucho de unos valles a otros. No obstante, como se aprecia en la Figura 17, se puede afirmar que existen dos máximos de precipitaciones, uno entre los meses de febrero – abril y otro entre los meses de setiembre – noviembre. Las precipitaciones mínimas se presentan entre los meses de junio – agosto.

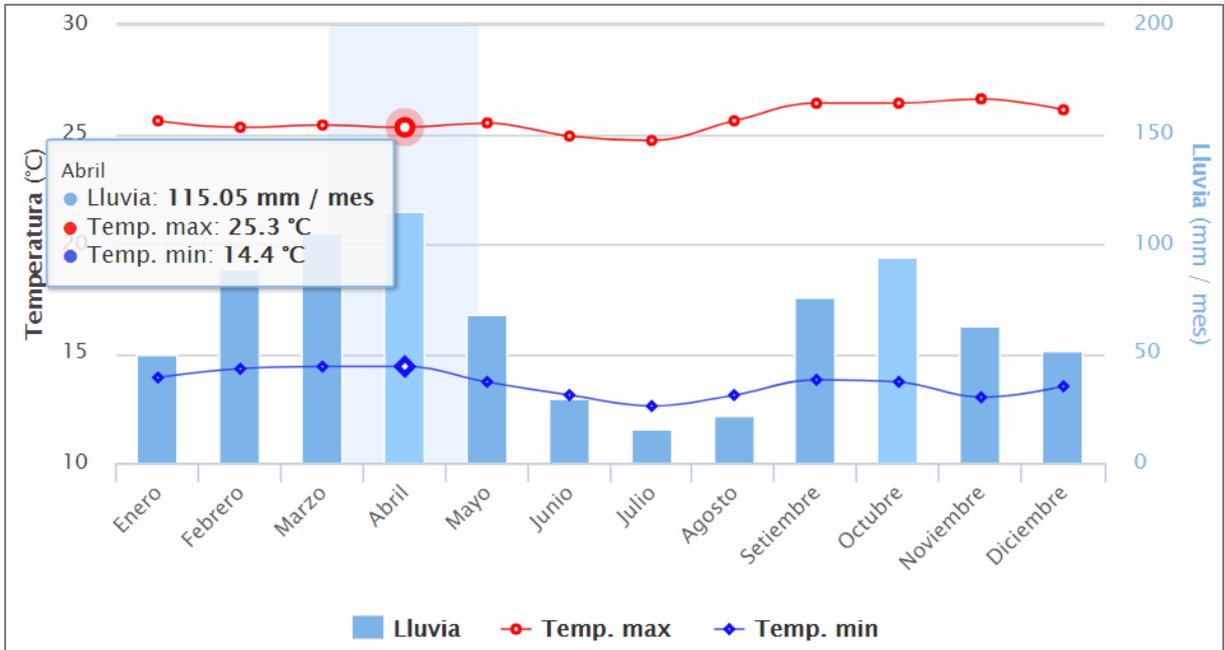


Figura 18: Promedio de precipitación y temperatura de Chota. (SENAMHI, 2018).

El criterio utilizado para el análisis con el software Dips v.6 fue el de Schmidt (Igual Área), recomendable para el análisis cinemático. Para el análisis con el software Slide v.6.0, se utilizó tres métodos de dovelas, los cuales realizan equilibrio de fuerzas y de momentos: Bishop Simplificado, LE/Morgenstern-Price y Spencer. El número de dovelas por superficie de análisis fue de 25, tolerancia de 0.005 y 50 máximas iteraciones y el método de búsqueda de la falla crítica fue de Auto Refine Search, en un tipo de superficie no circular. Para cada Talud Crítico se analizó seis (6) escenarios. En Condiciones Normales, el comportamiento drenado del talud se analiza en términos de tensiones totales siendo la variable desencadenante la gravedad. El comportamiento saturado del talud se analiza en términos de esfuerzos efectivos y la parte no saturada mediante tensiones totales siendo el nivel freático la variable desencadenante y en Condición de Sismicidad Máxima es la máxima aceleración del terreno por medio de los coeficientes de sismicidad horizontal ( $k_h$ ) y vertical ( $k_v$ ). La descripción más detallada de cada escenario se visualiza en la Tabla 13.

Tabla 13: Descripción de escenarios para análisis de taludes.

Análisis	Escenario	Gravedad ( $m/s^2$ )	Kh	Kv	Nivel Freático	Descripción
1	Natural (EN)	9.81	0	0	Ausente	Condiciones drenadas (Tensiones Totales)
2	Saturación Parcial (SP)	9.81	0	0	Altura media del material crítico	Condiciones de lluvias (Tensiones Totales y Tensiones Efectivas)
3	Saturación Total (ST)	9.81	0	0	Superficie del terreno	Condiciones de lluvias intensas (Tensiones Efectivas)
4	Sismicidad Máxima (SM)	9.81	0.175	0.088	Ausente	Máximas aceleraciones sísmicas en la zona
5	Sismicidad Máxima y Saturación Parcial (SM - SP)	9.81	0.175	0.088	Altura media del material crítico	Combinación de las condiciones 2 y 4
6	Sismicidad Máxima y Saturación Total (SM - ST)	9.81	0.175	0.088	Superficie del terreno	Combinación de las condiciones 3 y 4

El método Auto Refine Search representa un procedimiento numérico para determinar la posición de la superficie de rotura crítica. El proceso determina una superficie de rotura única con el Factor de Seguridad más bajo. En superficies no circulares, el método se aplica de manera similar a los circulares; pero en este caso, se convierten las superficies circulares en líneas rectas por partes, mediante el uso del número de vértices a lo largo de la superficie. Las opciones de entrada utilizadas para la búsqueda de la falla crítica mediante este método, se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14: Opciones de entrada para el método Auto Refine Search.

<b>Opciones no circulares de Auto Refine Search</b>	
Divisiones a lo largo de la pendiente	10
Círculos por división	10
Número de Iteraciones	10
Divisiones para usar en la siguiente iteración	50%
Número de vértices a lo largo de la superficie	12

### 3.9.1 Talud Crítico N° 01:

La información correspondiente al Talud Crítico N° 01, su respectiva fotografía, y los valores del RMR se encuentran en la Tabla 15, 16 y 17 respectivamente.

Tabla 15: Coordenadas y descripción de la Talud Crítico N° 01.

DATUM	ZONA	COORDENADAS		COTA
		ESTE	NORTE	
WGS - 84	17 S	744147	9277412	2002
		DESCRIPCIÓN		

El talud se ubica en la parte SW de la carretera entre las progresivas Km 133+883 - Km 133+923 (Punto inicial), caracterizada por estratos delgados de calizas nodulares con espesores que varían de 20 a 60 cm, que corresponde a la Formación Chúlec (Ki - Ch). La altura del talud es de aproximadamente 12 m con una inclinación de 70°, la cresta del talud sigue la morfología natural del terreno, sin ningún cambio en el rumbo con respecto a la cara del talud. Se evidencia una meteorización moderada con tonalidades gris amarillentas y un grado de fracturamiento medio con bloques irregulares, presentando tres familias de discontinuidades. La estratificación buza hacia la cara del talud que de acuerdo al análisis cinemático, forma roturas del tipo planar; además forma roturas del tipo cuña en menor proporción, al ser afectadas por la precipitación y la sismicidad, inestabilizan y erosionan el macizo rocoso, generando deslizamientos y desprendimientos constantes de bloques.



Foto 12: Afloramiento de calizas nodulares en estratificación delgada de la Formación Chúlec (Ki - Ch), en las progresivas Km 133+883 - Km 133+923.

Tabla 16: Parámetros del Macizo Rocoso, orientación de las familias y geometría del Talud Crítico N°1.

MACIZO ROCOSO				ORIENTACIÓN		
LITOLÓGIA / FORMACIÓN	METEORIZACIÓN	GRADO DE FRACTURAMIENTO	GSI	TIPO	D	DD
Caliza, Chulec	1=Fresco	1=Alto	1= Bloq. regular	ESTRATO	52°	47°
				FAMILIA 1	62°	198°
	2=Leve	2=Medio	2=Bloq. Irregular	FAMILIA 2	68°	326°
				GEOMETRÍA DEL TALUD		
	3=Moderado	3=Bajo	3=Bloq. y Capas	ALTURA	12 m	
				PIE	11 m	
	4=Alto			DIRECCIÓN	TALUD	CABEZA
				D	70°	40°
	3	2	2	DD	33°	33°

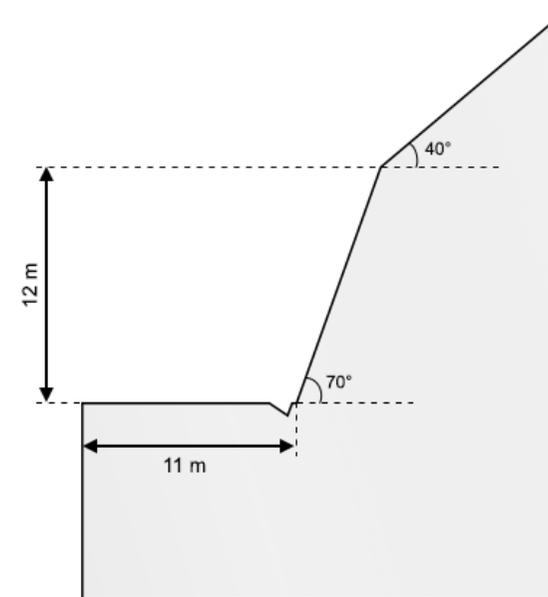


Foto 13: Punto inicial y perfil del Talud Crítico N°1 en las progresivas Km 133+883 - Km 133+923.

Tabla 17: Asignación de Valores para el Macizo Rocoso, Talud crítico N° 01.

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)	4
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.01 mm (5)	0.1 – 1.0 mm (4)	1 – 5 mm (1)	> 5mm (0)	0
	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)	0
	Alteración	Sana (6)	Lig. Alt (5)	Moder. Alt. (3)	Muy Alterada (1)	Descompuesta (0)	1
AGUA SUBTERRANEA	Seco (15)	Ligeramente Húmedo (10)	Húmedo (7)	Goteando (4)	Agua Fluyendo (0)	10	
<b>VALOR TOTAL RMR</b>						<b>48</b>	

La estimación del GSI se realizó mediante la matriz publicada por Hoek, Carter, & Diederichs (2013), como se muestra en la Tabla 5, la cual presenta algunas modificaciones menores al gráfico del GSI publicado por Hoek y Marinos (2000). Presenta dos escalas lineales simples, **JCond<sub>89</sub>** (condiciones de superficie de las discontinuidades) y **RQD**. La medición o estimación en campo es muy simple y posiblemente otorga el mayor grado de consistencia. Lo que es más importante, la relación entre los valores GSI calculados y mapeados son razonablemente cercanas a la relación ideal de 1:1 para un ajuste perfecto y obtener propiedades de entrada para modelos numéricos. La estimación del GSI para la Talud Crítico N° 1 se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18: Estimación del GSI en términos del RQD y la Condición de las Juntas

ESTIMACIÓN DEL GSI					
CÁLCULO DEL RQD					
$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$	ND	L(m)	$\lambda$	RQD	
	52	4	13	62.7	
CLASIFICACIÓN DE CONDICIONES DE DISCONTINUIDADES, BIENIAWSKI (1989)					
LONGITUD DE LA DISCONTINUIDAD	ABERTURA	RUGOSIDAD	RELLENO	ALTERACIÓN	VALORACIÓN JCOND <sub>89</sub>
< 1m (6)	Cerrada (6)	Muy Rugosa (6)	Ninguno (6)	Sana (6)	
1 -3 m (4)	< 0.01 mm (5)	Rugosa (5)	Duro < 5mm (4)	Lig. Alt (5)	
3 - 10 m (2)	0.1 - 1.0 mm (4)	Lig. Rugosa (3)	Duro > 5mm (2)	Mod. Alt (3)	
10 - 20 m (1)	1 - 5 mm (1)	Lisa (1)	Suave < 5mm (1)	Muy Alt (1)	
> 20 m (0)	> 5 mm (0)	Suave (0)	Suave > 5mm (0)	Descompuesta (0)	
4	0	3	0	1	8
$GSI = 1.5JCOND_{89} + RQD/2$				GSI = 43.34	

La determinación de las propiedades geomecánicas del Talud Crítico 01 se realizó mediante el software RocData v.4.0, y se muestra en la Figura 19. El análisis cinemático con el software Dips v.6.0, se presenta en las Figuras 20 - 23. El análisis de estabilidad de los taludes con las seis condiciones, se realizó con el software Slide v.6.0, y se muestran en las Figuras 24 - 29.

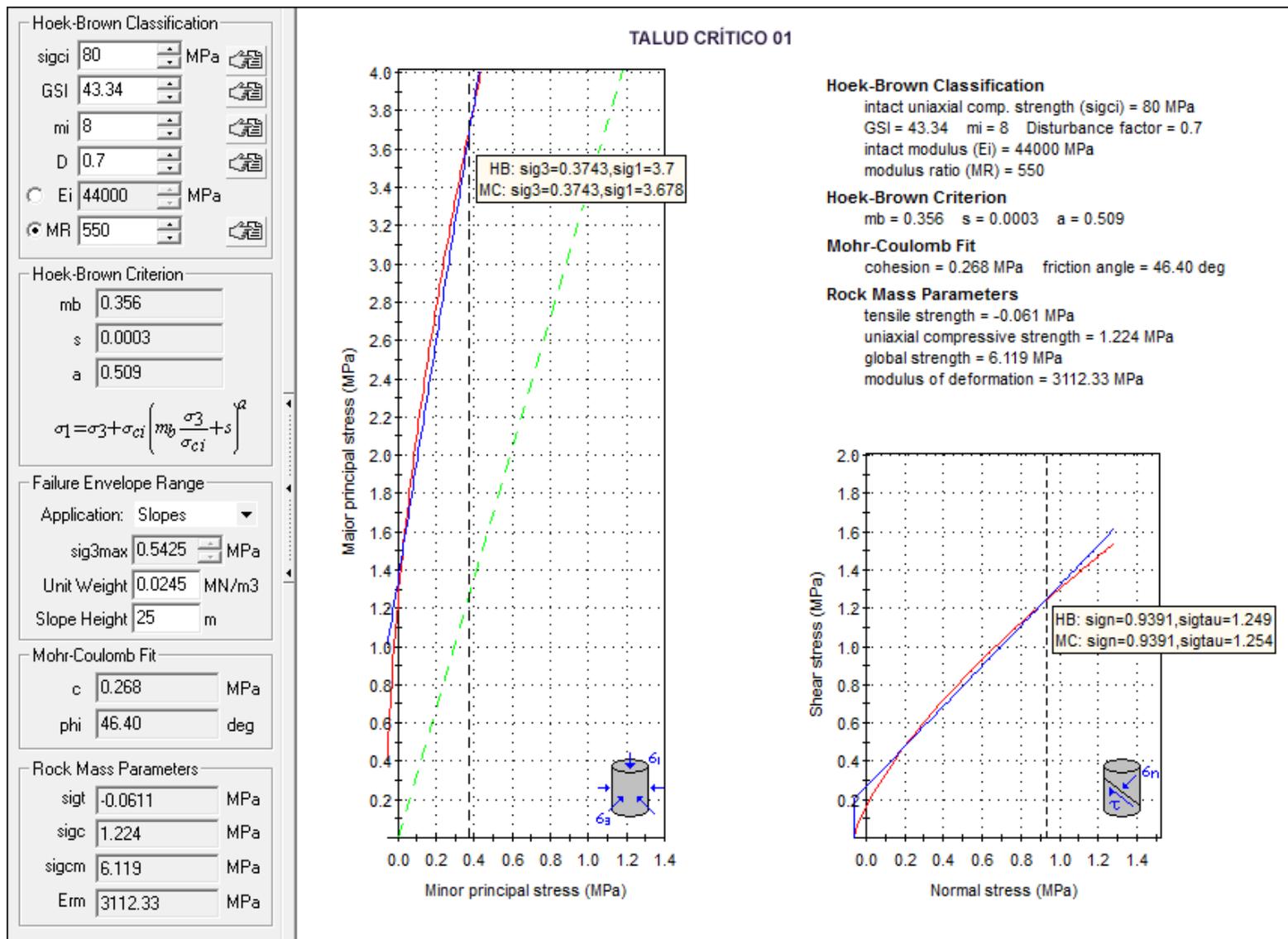


Figura 19: Análisis de las Propiedades Geomecánicas en el software RocData v.4 correspondiente al Talud Crítico 01.

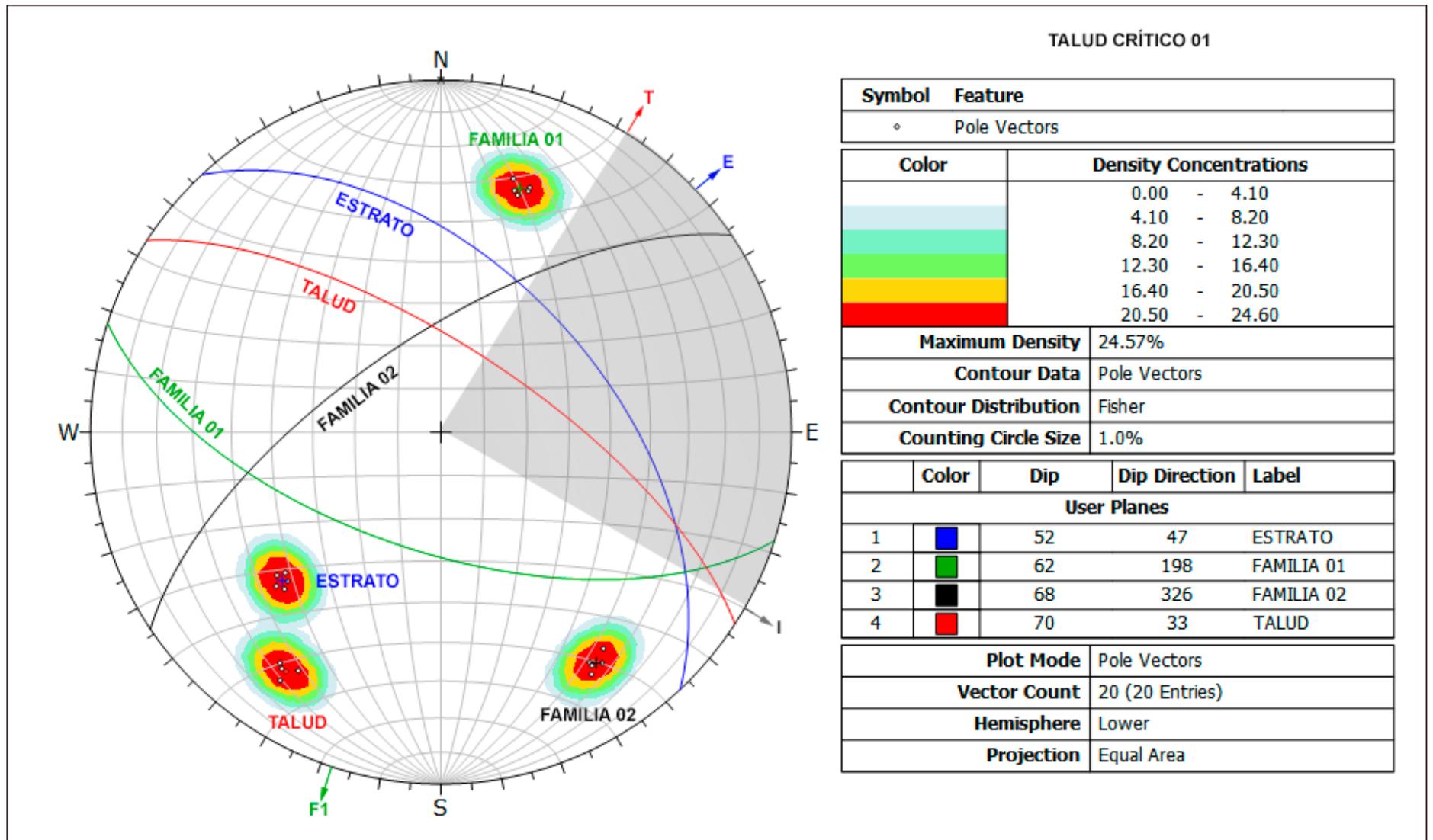


Figura 20: Análisis Cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indica rotura planar.

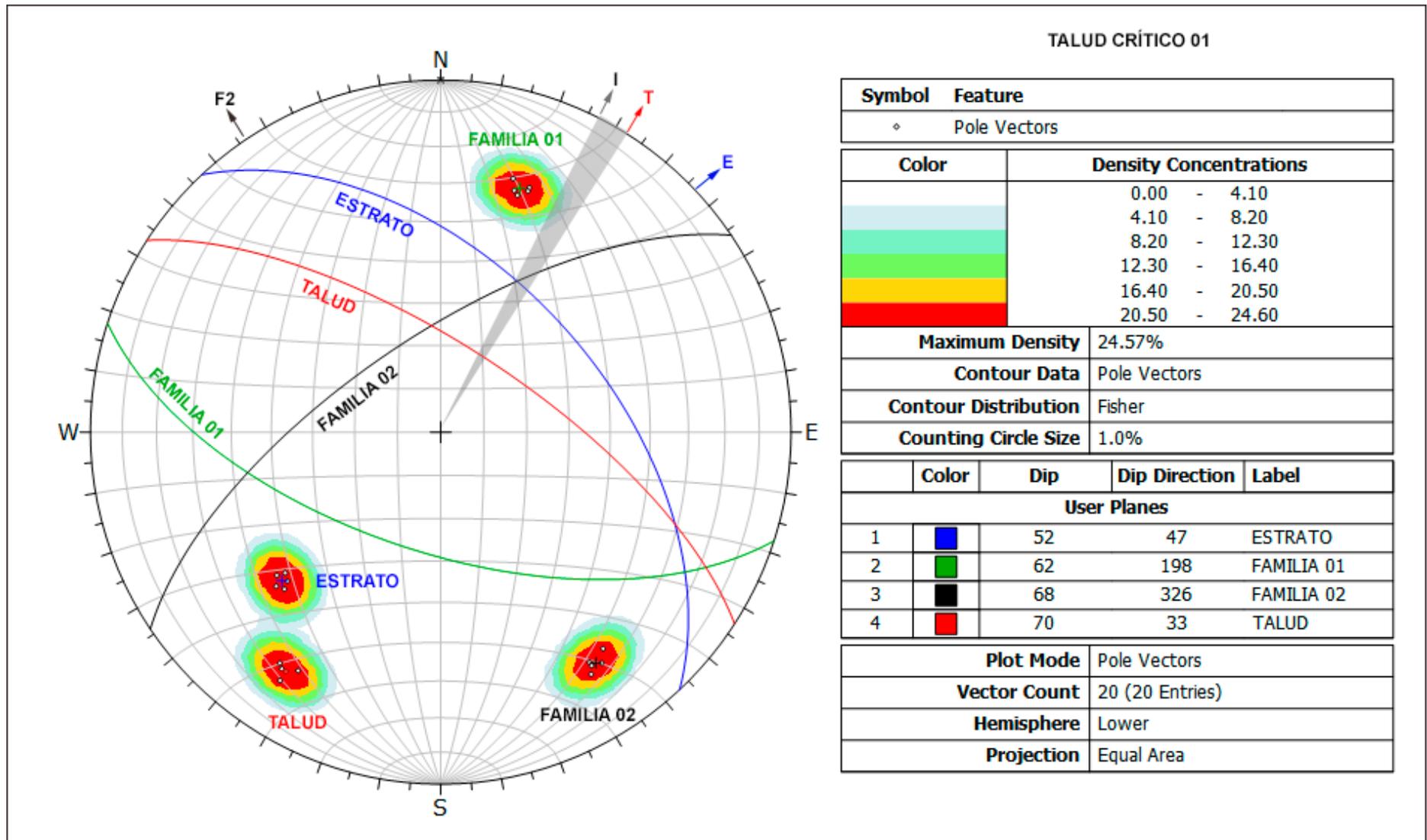


Figura 21: Análisis Cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indica rotura en cuña directa.

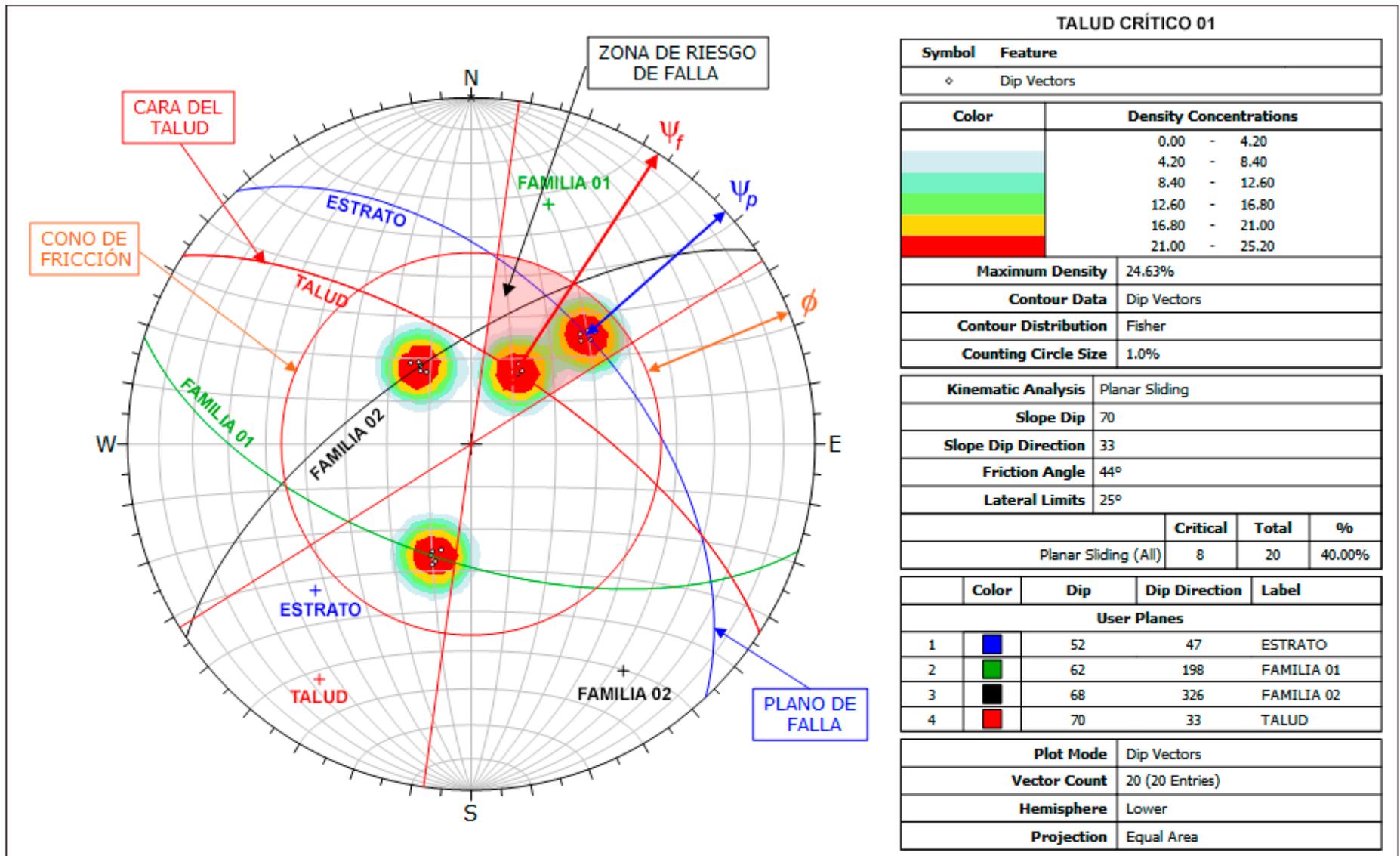


Figura 22: Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de deslizamiento planar.

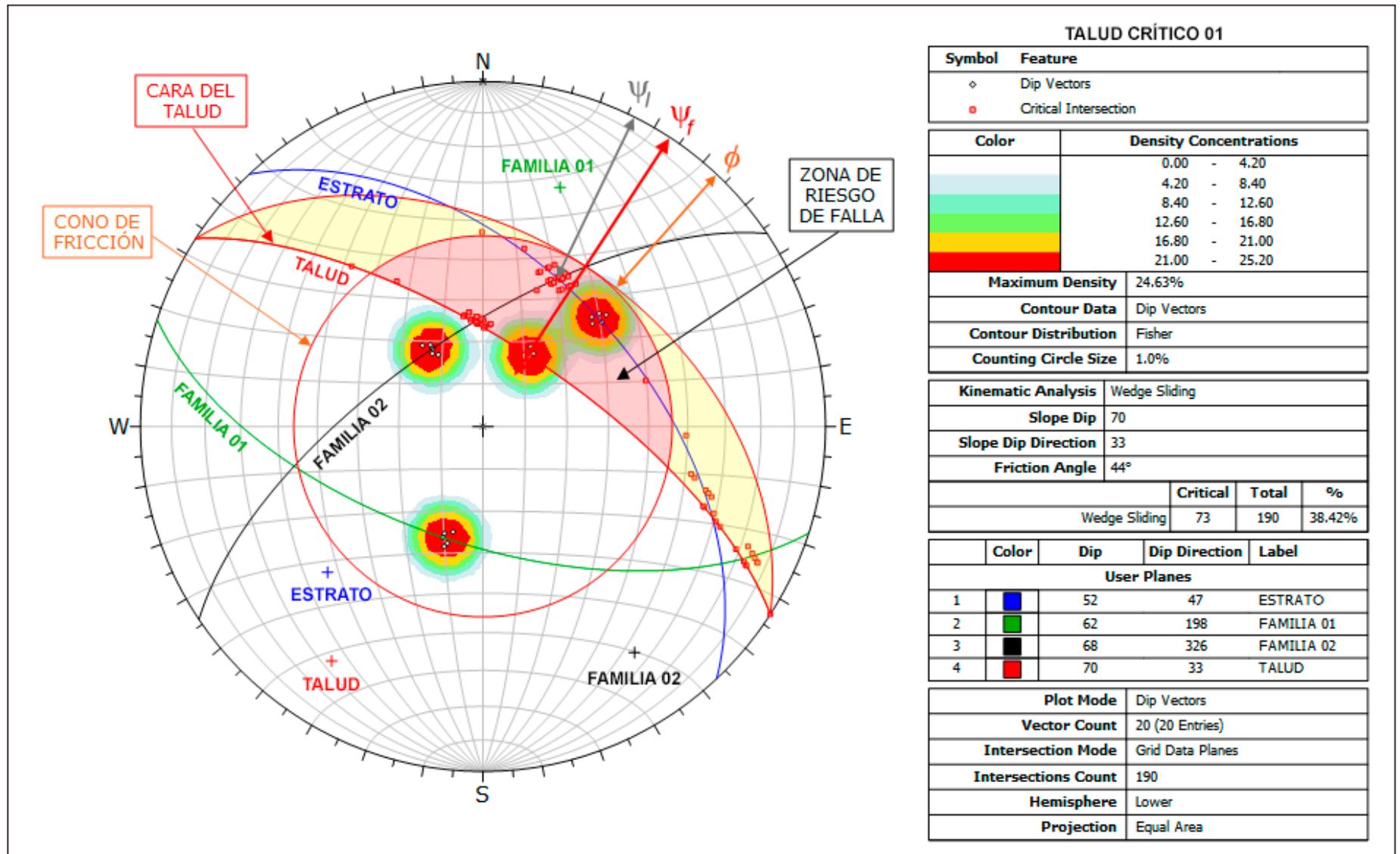


Figura 23: Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de deslizamiento en cuña.

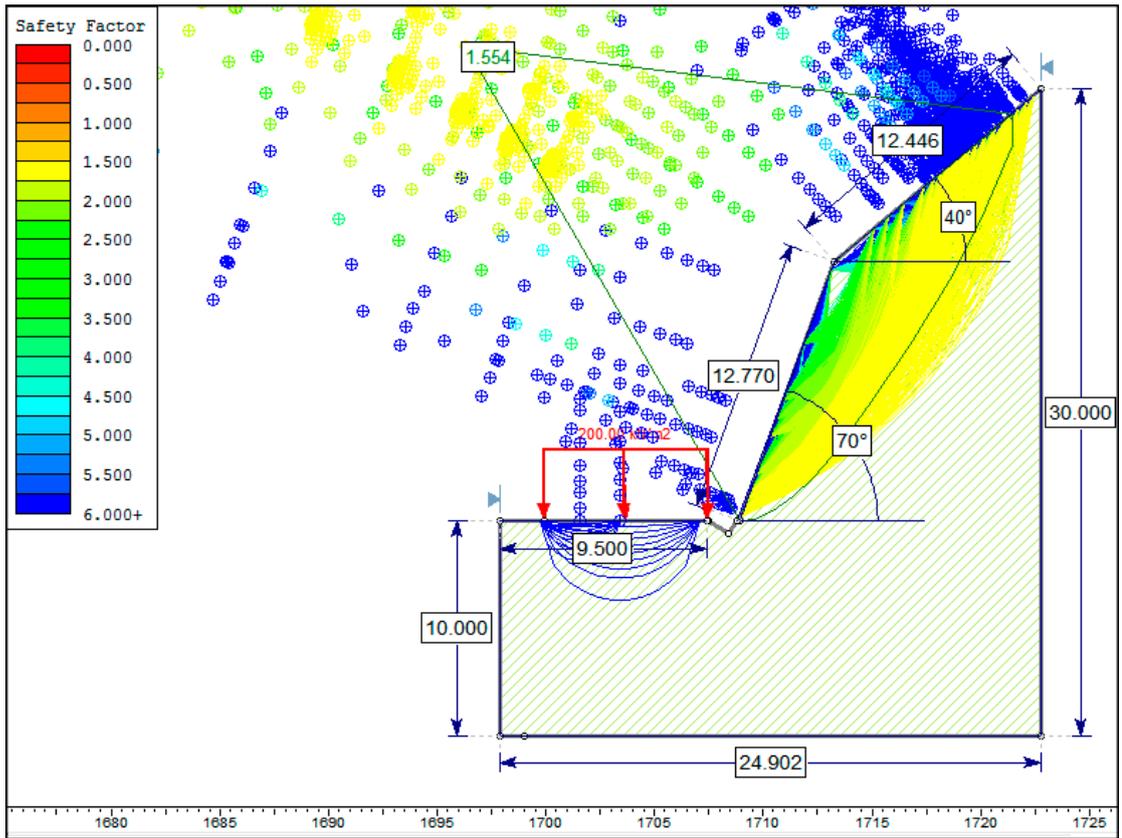


Figura 24: Análisis Slide en condiciones naturales.

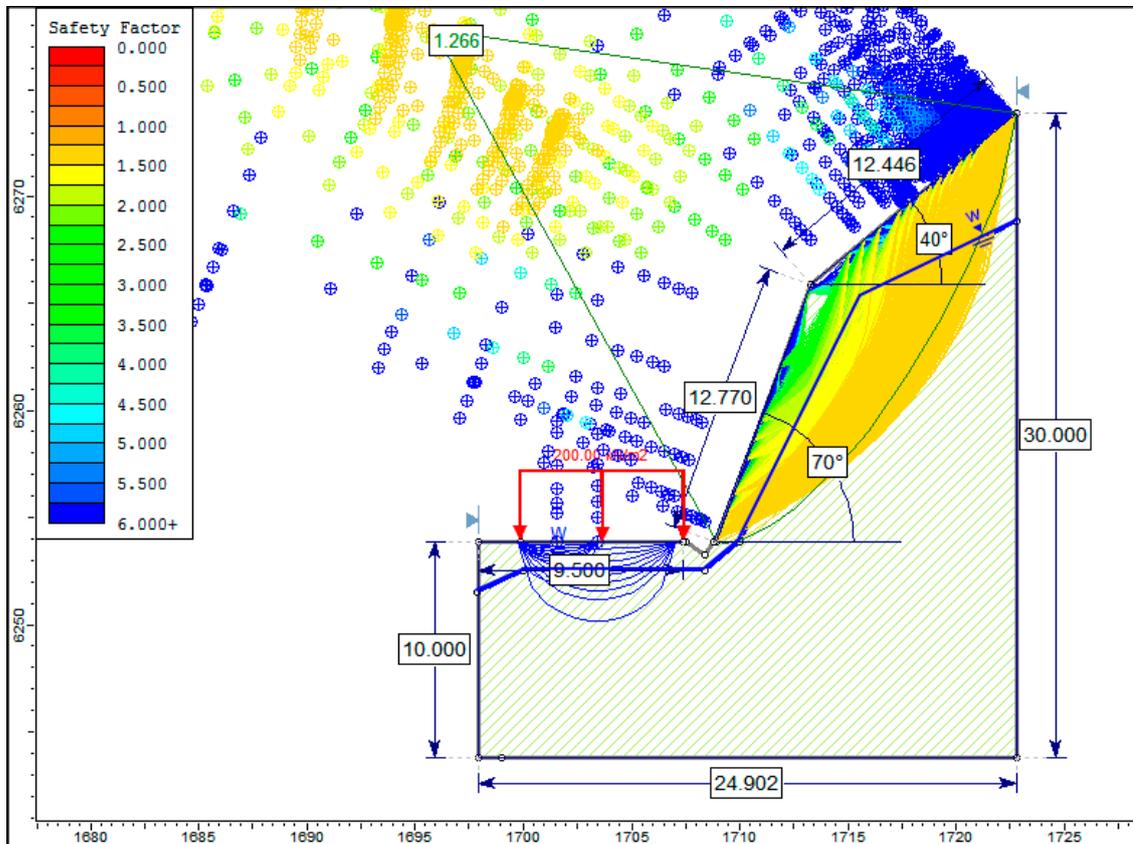


Figura 25: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial.

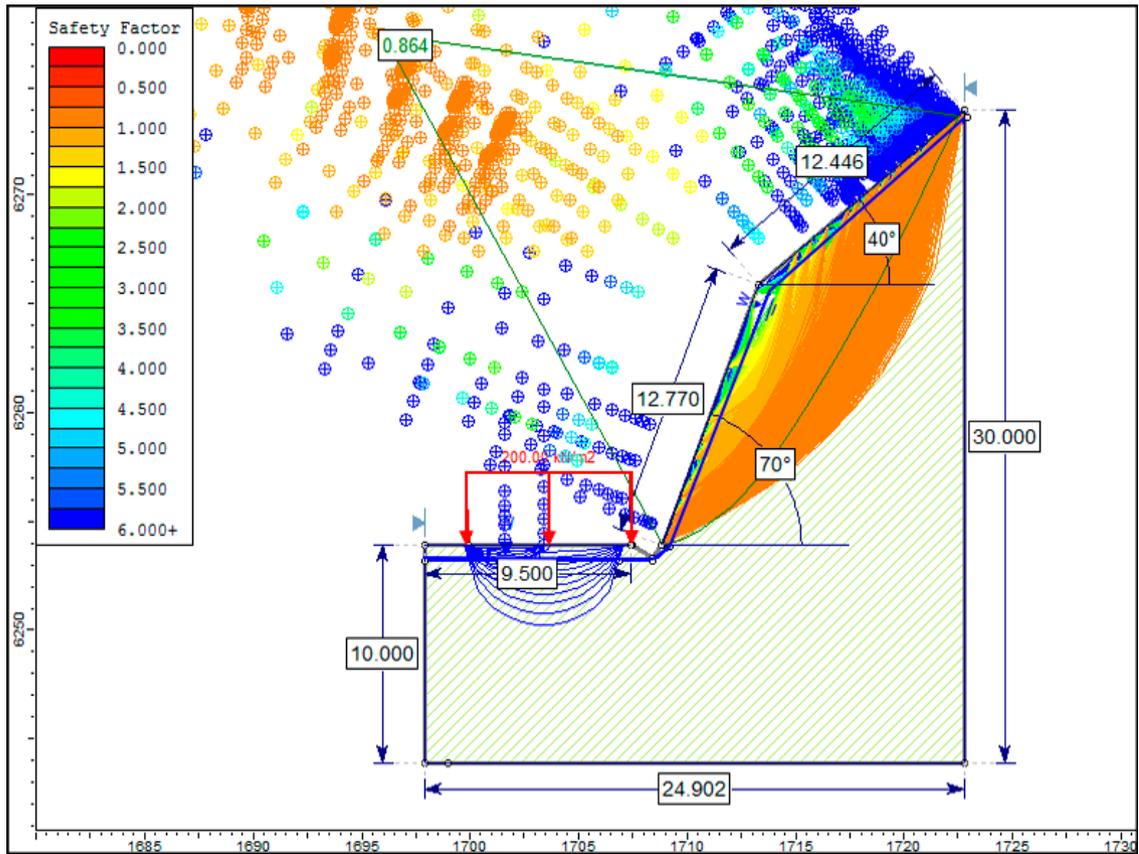


Figura 26: Análisis Slide en condiciones de saturación total.

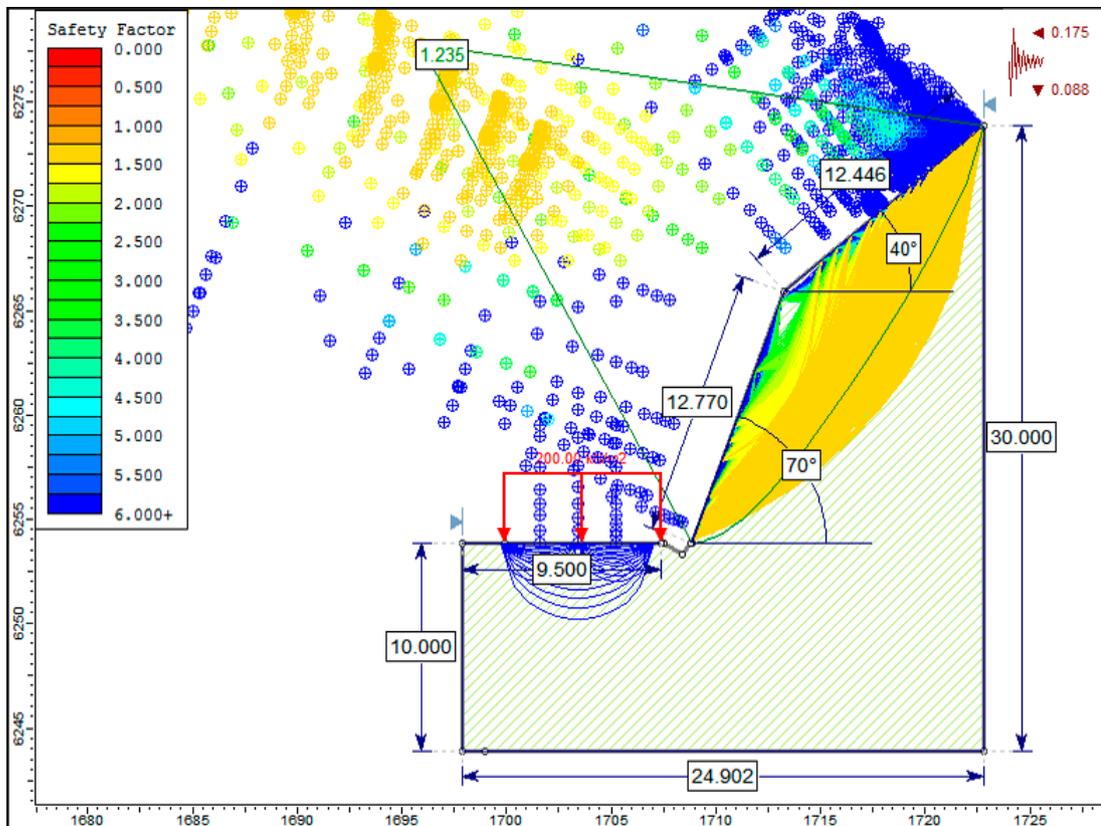


Figura 27: Análisis Slide en condiciones de sismicidad.

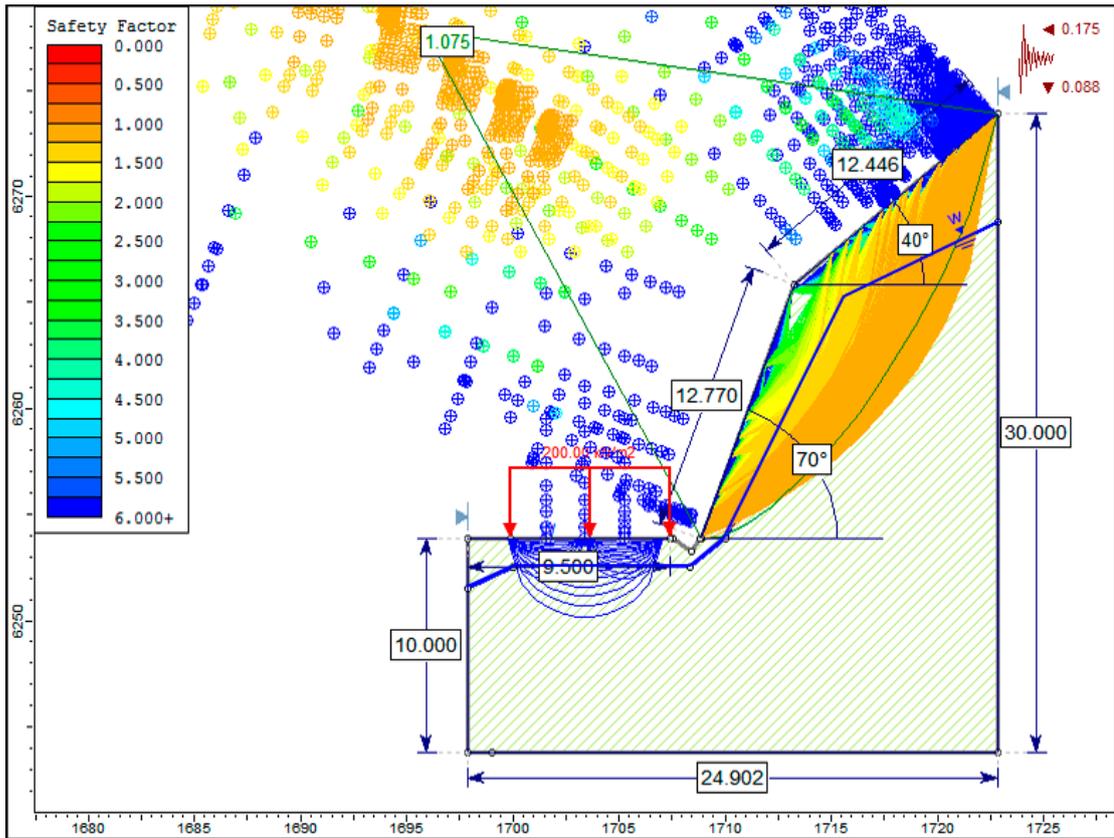


Figura 28: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad.

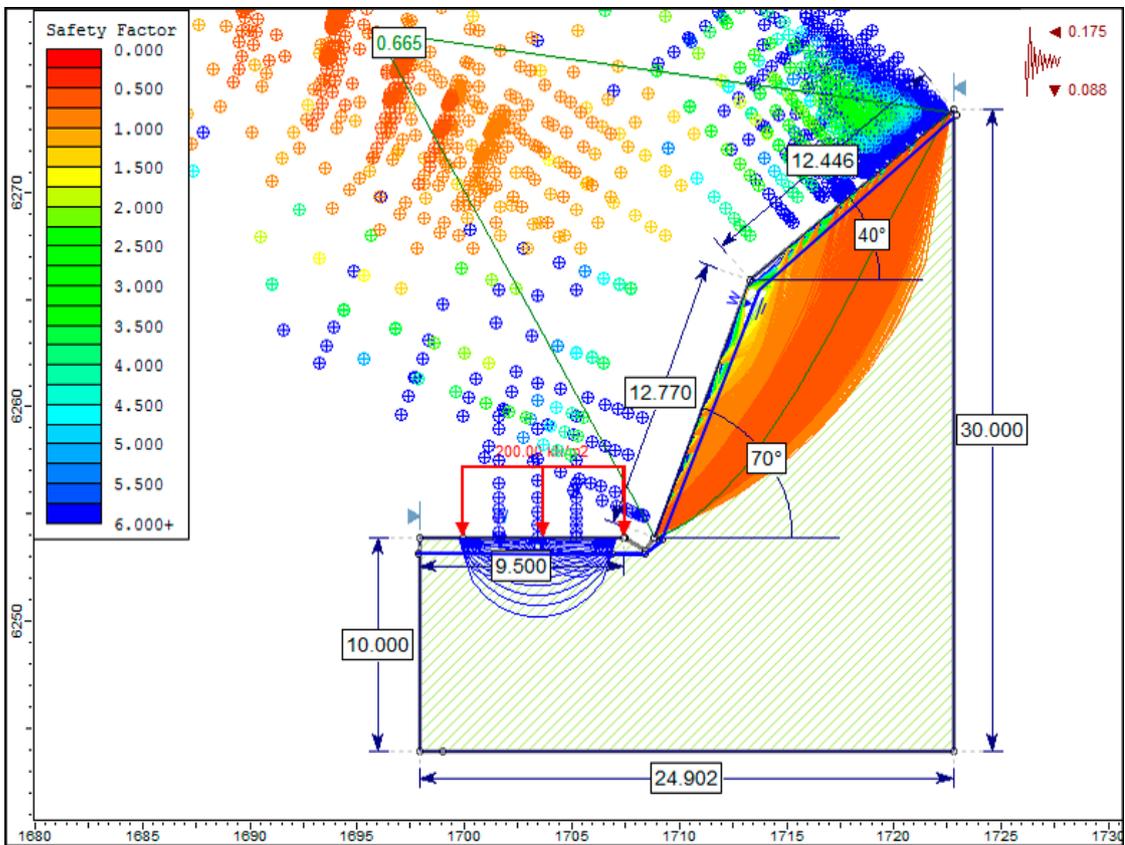


Figura 29: Análisis Slide en condiciones de saturación total y sismicidad.

### 3.9.2 Talud Crítico N° 02:

La información correspondiente al Talud Crítico N° 02, su respectiva fotografía, y los valores del RMR se encuentran en la Tabla 19, 20 y 21 respectivamente.

Tabla 19: Coordenadas y descripción de la Talud Crítico N° 02.

DATUM	ZONA	COORDENADAS		COTA
		ESTE	NORTE	
WGS - 84	17 S	743172	9279246	1947
		DESCRIPCIÓN		

El talud se ubica dentro de la Formación Chúlec (Ki - Ch), que litológicamente corresponde a una caliza arenosa, caracterizada por estratos delgados con espesores que varían de 20 hasta 50 cm. El talud presenta una altura aproximada de 15 m con un ángulo de inclinación de 74°, la cresta del talud sigue la morfología natural del terreno. Se ubica en la parte SW de la carretera, entre las progresivas Km 131+632 - Km 131+682. Se evidencia una meteorización moderada con tonalidades gris amarillentas y un alto grado de fracturamiento con bloques irregulares, presentando tres familias de discontinuidades. De acuerdo al análisis cinemático, forma roturas del tipo cuña, que al ser afectadas por la precipitación y sismicidad, inestabilizan y erosionan el macizo rocoso, generando desprendimientos constantes de bloques.



Foto 14: Afloramiento de calizas arenosas en estratificación delgada de la Formación Chúlec (Ki - Ch), en las progresivas Km 131+632 - Km 131+682.

Tabla 20: Parámetros del Macizo Rocoso, orientación de las familias y geometría del Talud Crítico N°2.

MACIZO ROCOSO				ORIENTACIÓN			
LITOLOGÍA / FORMACIÓN	METEORIZACIÓN	GRADO DE FRACTURAMIENTO	GSI	TIPO	D	DD	
Caliza, Chulec	1=Fresco	1=Alto	1= Bloq. regular	ESTRATO	48°	355°	
				FAMILIA 1	42°	181°	
	2=Leve	2=Medio	2=Bloq. Irregular	FAMILIA 2	66°	112°	
				GEOMETRÍA DEL TALUD			
	3=Moderado	3=Bajo	3=Bloq. y Capas	ALTURA	15 m		
				PIE	13 m		
	4=Alto			4= Frac-intenso	DIRECCIÓN	TALUD	CABEZA
					D	74°	35°
	3	2	2	DD	72°	72°	

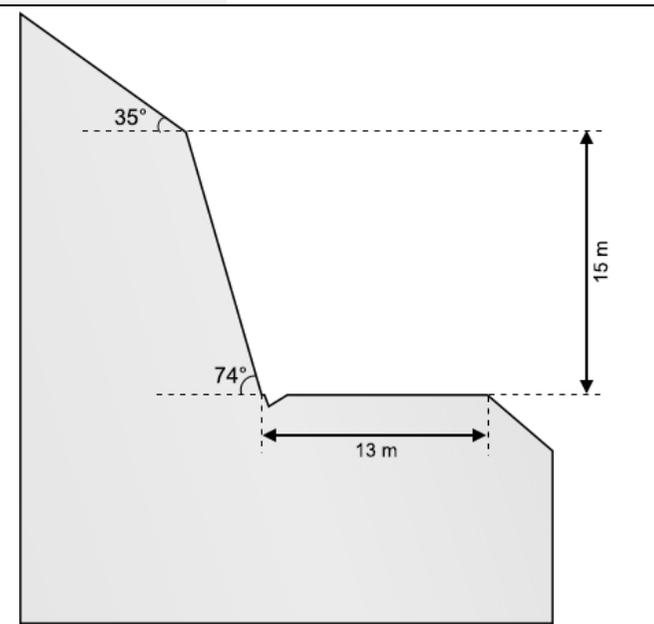


Foto 15: Perfil del Talud Crítico N°2 en las progresivas Km 131+632 - Km 131+682.

Tabla 21: Asignación de Valores para el Macizo Rocoso, Talud crítico N° 02.

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)	4
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.01 mm (5)	0.1 – 1.0 mm (4)	1 – 5 mm (1)	> 5mm (0)	0
	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)	0
	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>50</b>	

La estimación del GSI se realizó mediante la matriz publicada por Hoek, Carter, & Diederichs (2013), como se muestra en la Tabla 5, la cual presenta algunas modificaciones menores al gráfico del GSI publicado por Hoek y Marinos (2000). Presenta dos escalas lineales simples, **JCond<sub>89</sub>** (condiciones de superficie de las discontinuidades) y **RQD**. La medición o estimación en campo es muy simple y posiblemente otorga el mayor grado de consistencia. Lo que es más importante, la relación entre los valores GSI calculados y mapeados son razonablemente cercanas a la relación ideal de 1:1 para un ajuste perfecto y obtener propiedades de entrada para modelos numéricos. La estimación del GSI para la Talud Crítico N° 2 se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22: Estimación del GSI en términos del RQD y la Condición de las Juntas

ESTIMACIÓN DEL GSI					
CÁLCULO DEL RQD					
$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$	ND	L(m)	$\lambda$	RQD	
		46	4	12	68.1
CLASIFICACIÓN DE CONDICIONES DE DISCONTINUIDADES, BIENIAWSKI (1989)					
LONGITUD DE LA DISCONTINUIDAD	ABERTURA	RUGOSIDAD	RELLENO	ALTERACIÓN	VALORACIÓN JCOND <sub>89</sub>
< 1m (6)	Cerrada (6)	Muy Rugosa (6)	Ninguno (6)	Sana (6)	
1 -3 m (4)	< 0.01 mm (5)	Rugosa (5)	Duro < 5mm (4)	Lig. Alt (5)	
3 - 10 m (2)	0.1 - 1.0 mm (4)	Lig. Rugosa (3)	Duro > 5mm (2)	Mod. Alt (3)	
10 - 20 m (1)	1 - 5 mm (1)	Lisa (1)	Suave < 5mm (1)	Muy Alt (1)	
> 20 m (0)	> 5 mm (0)	Suave (0)	Suave > 5mm (0)	Descompuesta (0)	
4	0	3	0	3	10
$GSI = 1.5JCOND_{89} + RQD/2$				<b>GSI = 49.04</b>	

La determinación de las propiedades geomecánicas del Talud Crítico 02 se realizó mediante el software RocData v.4.0, y se muestra en la Figura 30. El análisis cinemático con el software Dips v.6.0, se presenta en las Figuras 31 - 32. El análisis de estabilidad de los taludes con las seis condiciones, se realizó con el software Slide v.6.0, y se muestran en las Figuras 33 - 38.

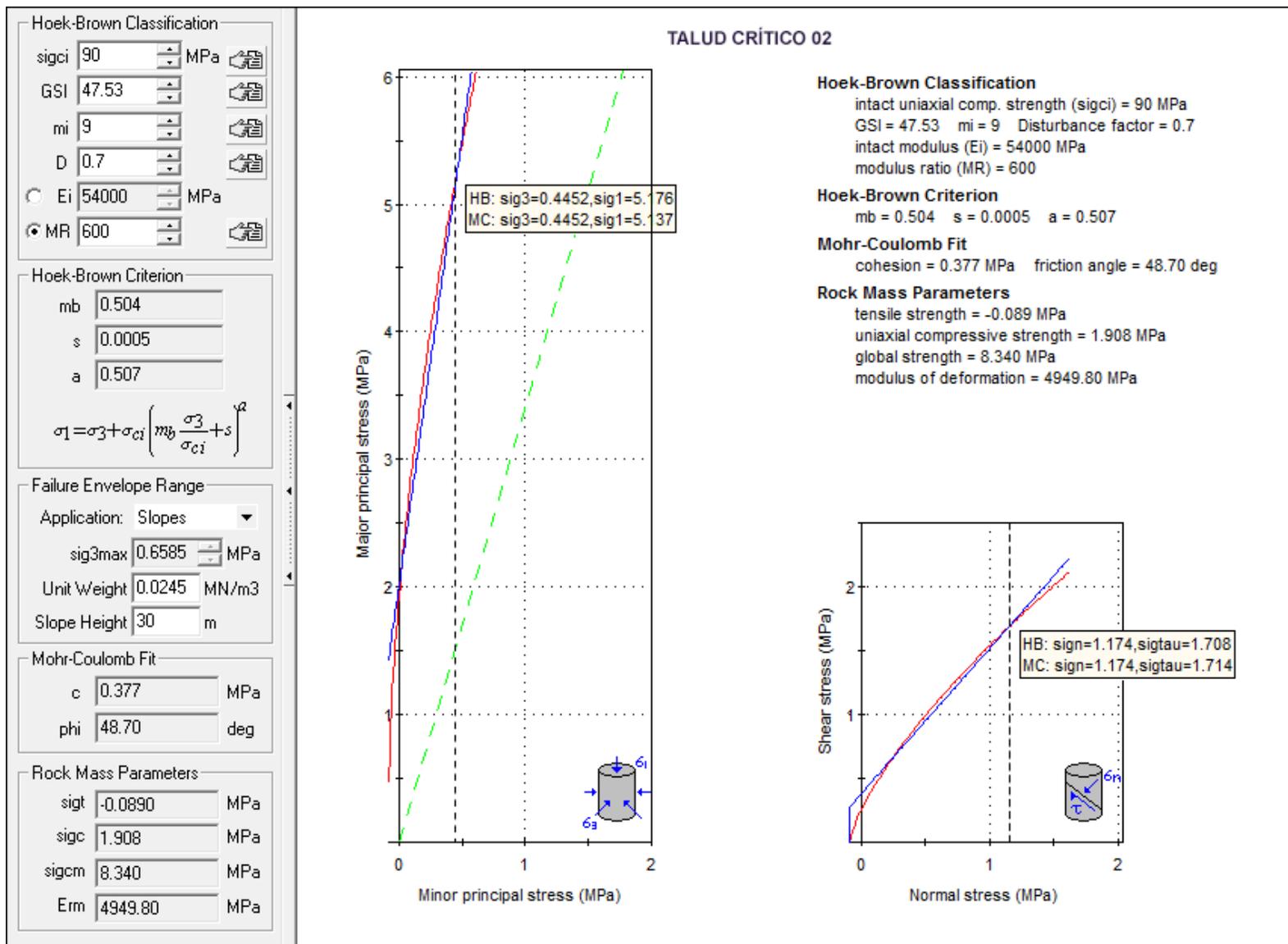


Figura 30: Análisis de las Propiedades Geomecánicas en el software RocData v.4 correspondiente al Talud Crítico 02.

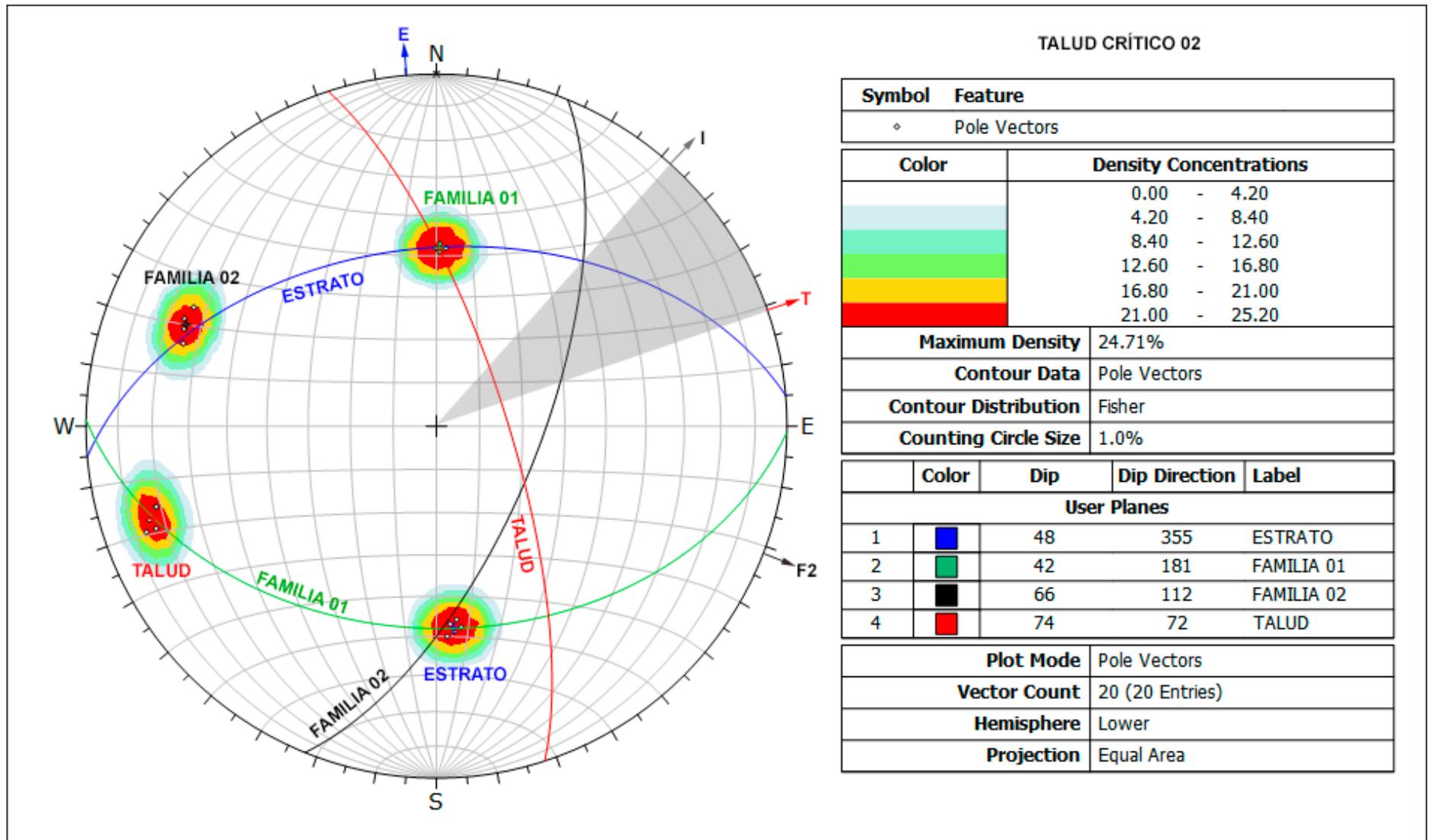


Figura 31: Análisis Cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indica rotura en cuña directa.

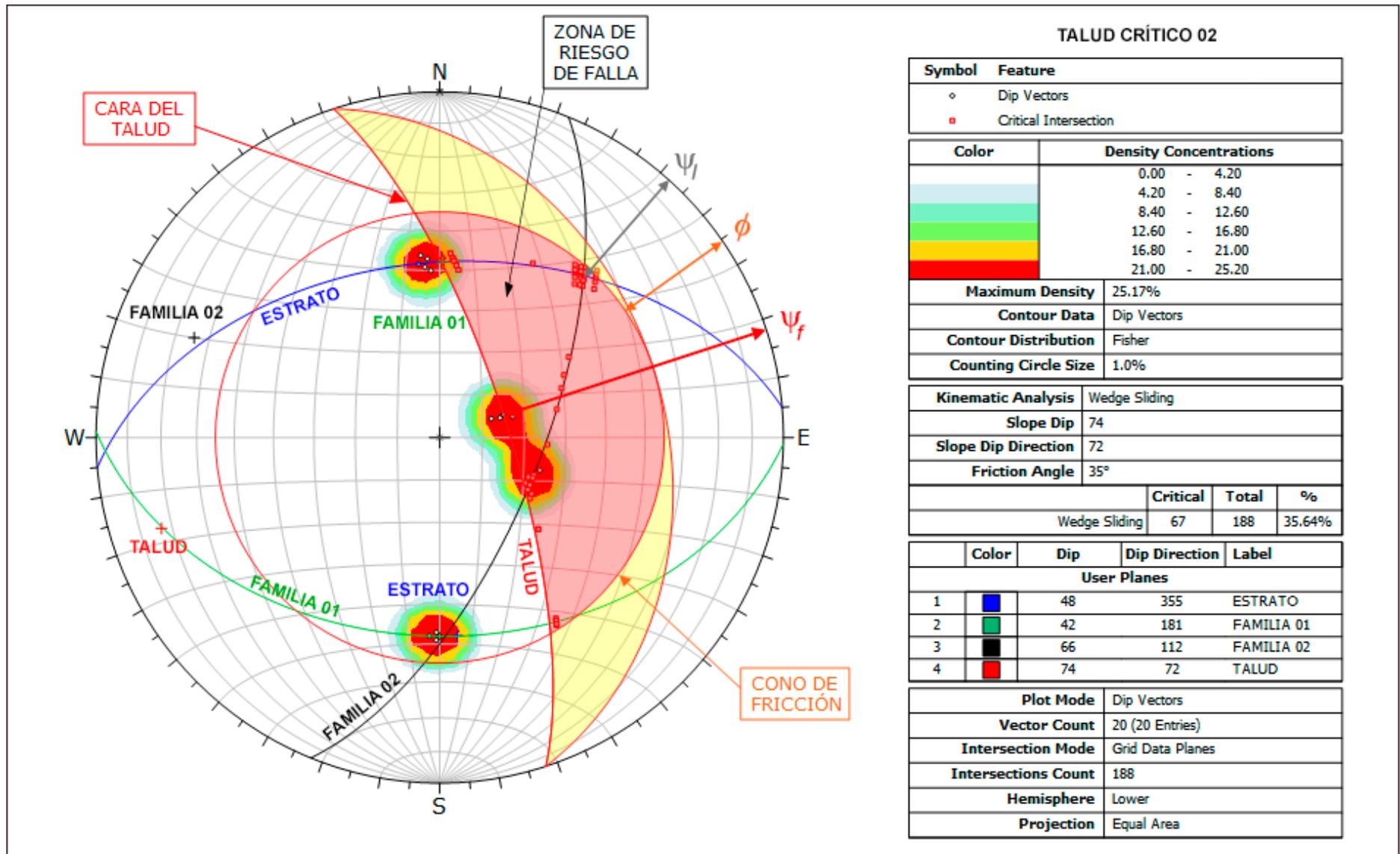


Figura 32: Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de deslizamiento en cuña.

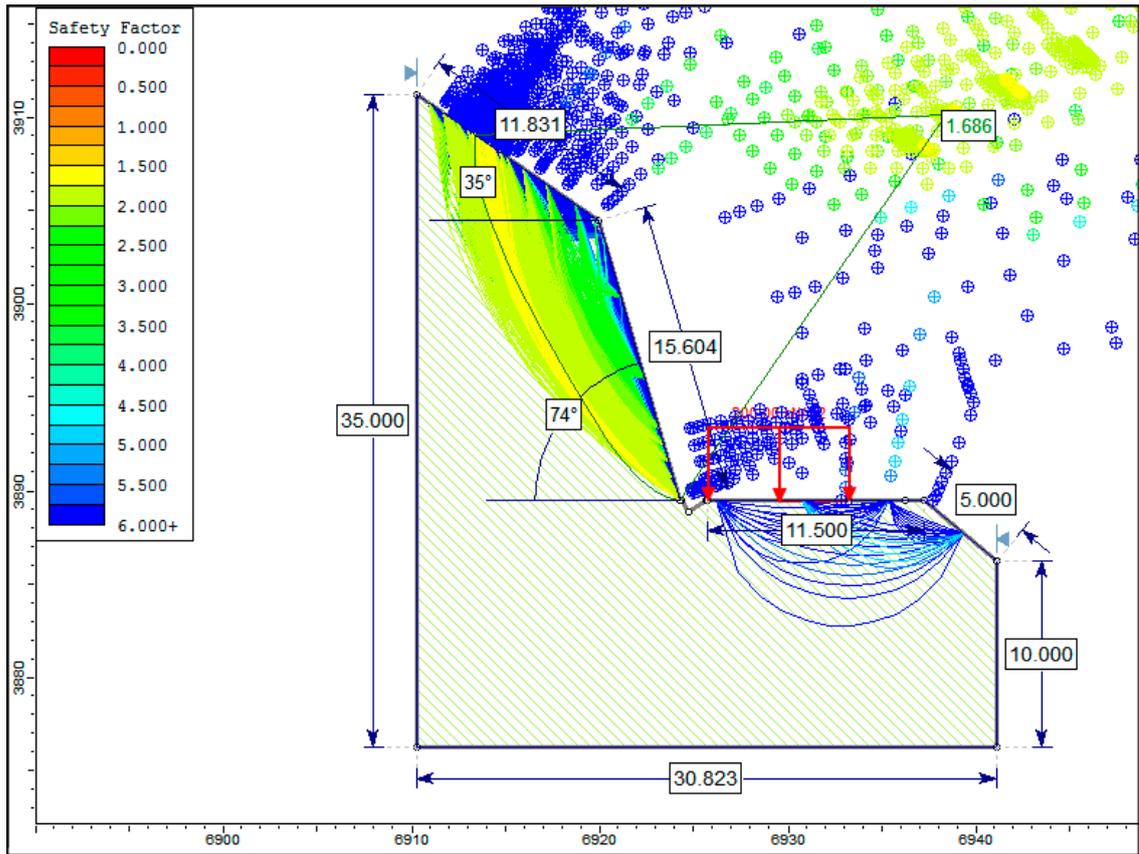


Figura 33: Análisis Slide en condiciones naturales.

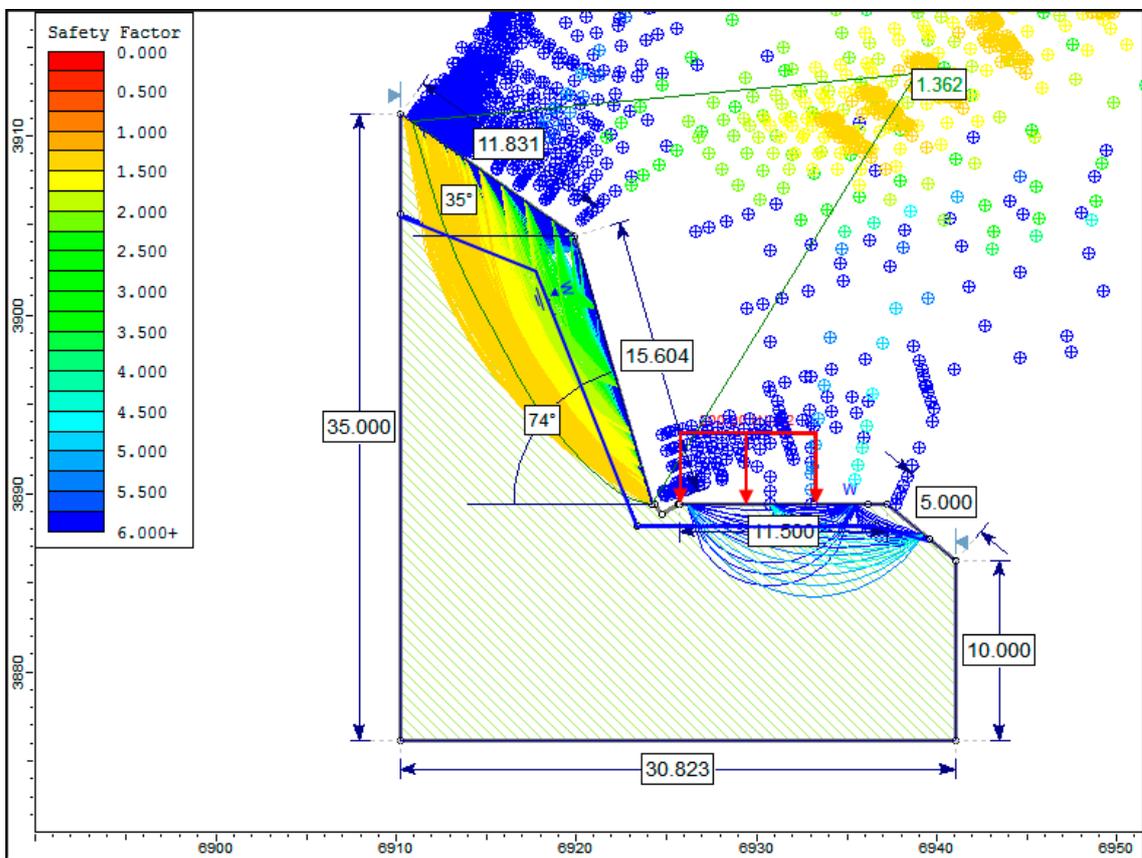


Figura 34: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial.

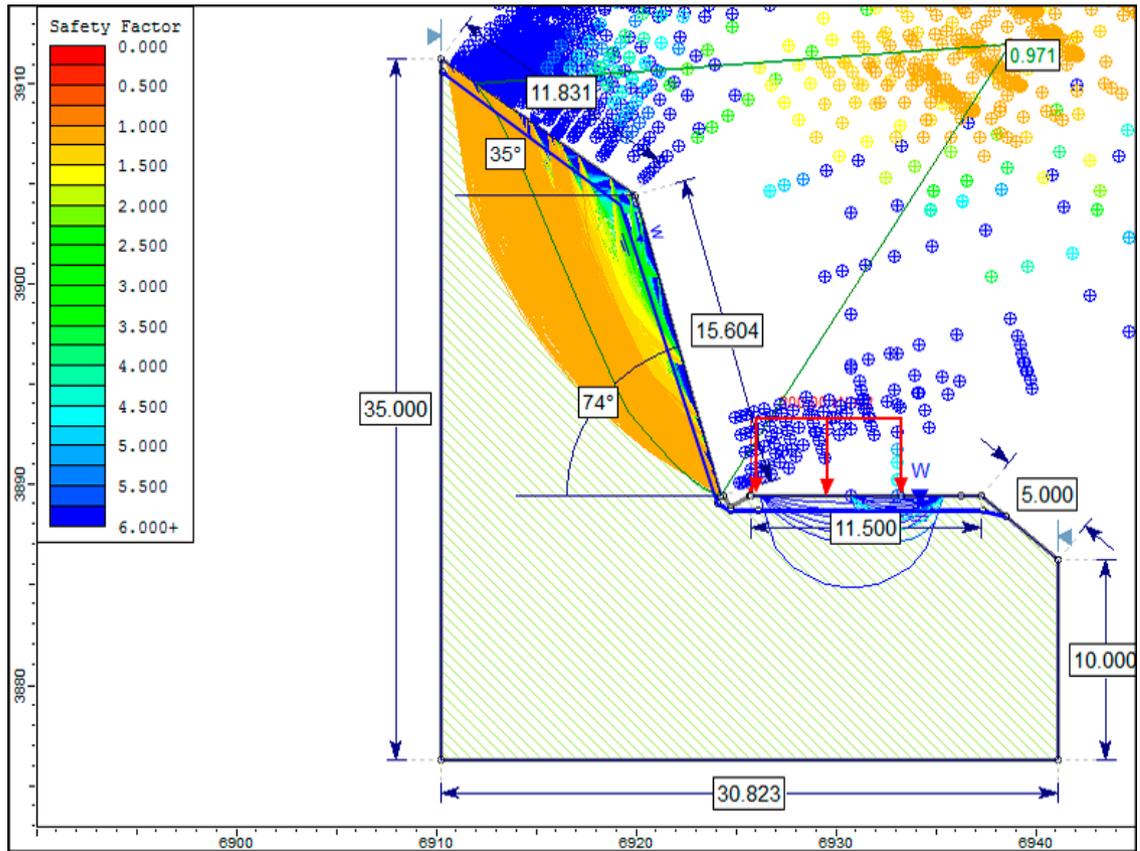


Figura 35: Análisis Slide en condiciones de saturación total.

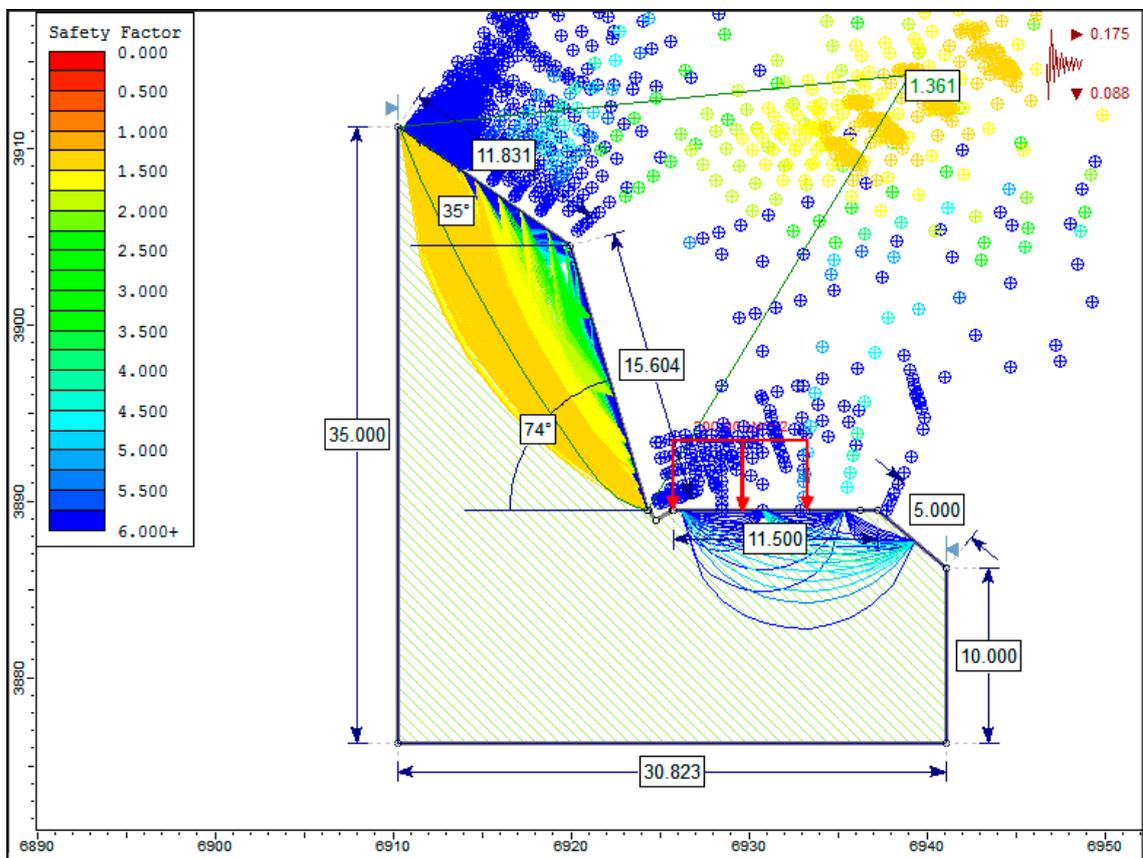


Figura 36: Análisis Slide en condiciones de sismicidad.

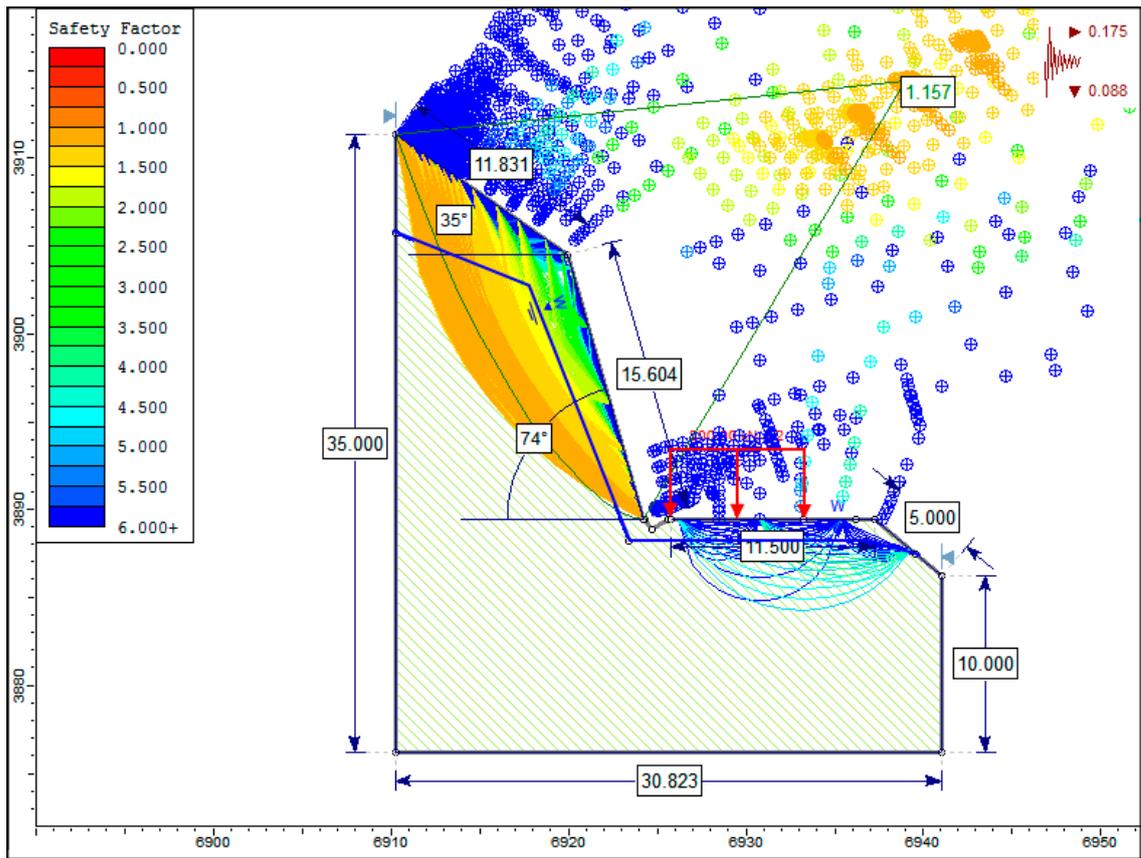


Figura 37: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad.

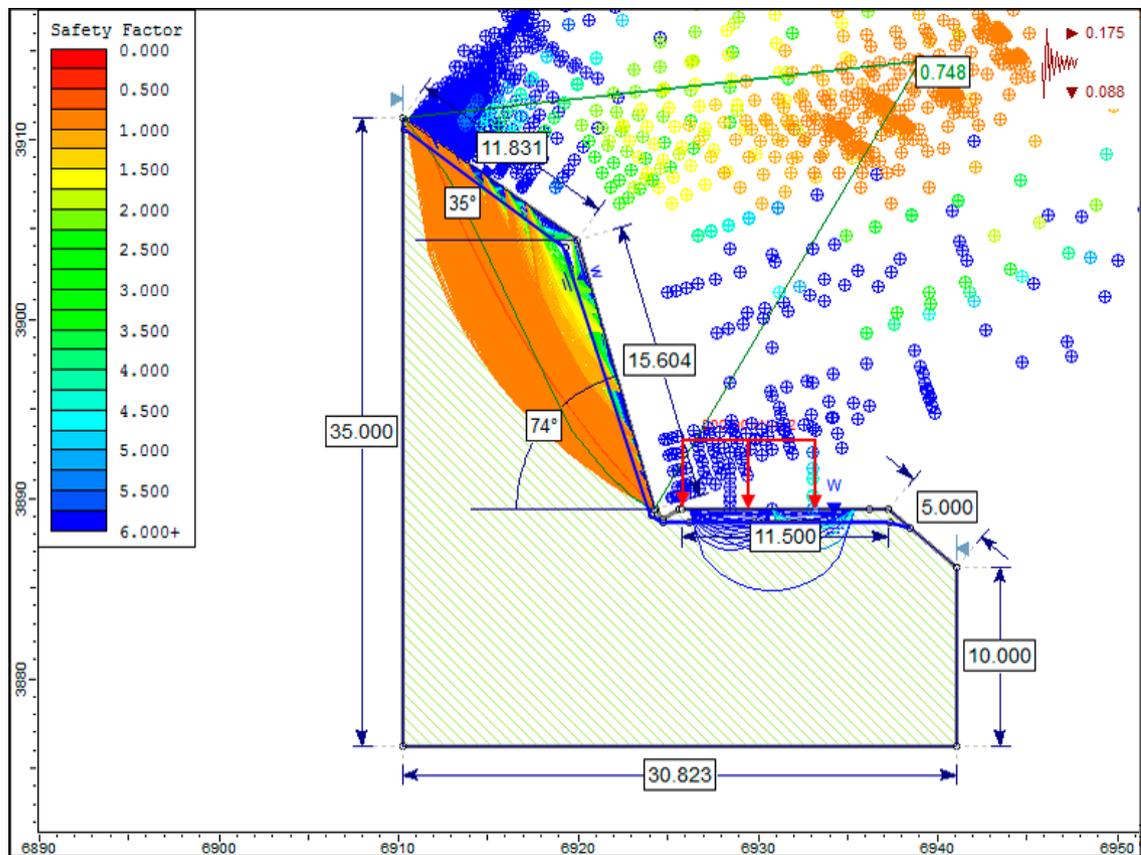


Figura 38: Análisis Slide en condiciones de saturación total y sismicidad.

### 3.9.3 Talud Crítico N° 03:

La información correspondiente al Talud Crítico N° 03, su respectiva fotografía, y los valores del RMR se encuentran en la Tabla 23, 24 y 25 respectivamente.

Tabla 23: Coordenadas y descripción de la Talud Crítico N° 03.

DATUM	ZONA	COORDENADAS		COTA
		ESTE	NORTE	
WGS - 84	17 S	743170	9279470	1943

**DESCRIPCIÓN**

El talud se ubica entre las progresivas Km 131+405 - Km 131+445 contiguo al talud crítico N°2, compuesto litológicamente de calizas arenosas dispuestas en estratos delgados con espesores que varían de 40 cm a 1 m de la Formación Chúlec (Ki - Ch). El talud se encuentra en la parte SW de la carretera y tiene una altura aproximada de 16 m con una inclinación de 68°. La cresta del talud sigue la morfología natural del terreno sin ningún cambio de rumbo con respecto al talud. Se evidencia una meteorización moderada con tonalidades gris amarillentas y un grado de fracturamiento medio con bloques irregulares, presentando tres familias de discontinuidades con rellenos arcillosos mayores a los 5 mm. El análisis cinemático revela la intersección de dos discontinuidades favorables para la formación de bloques en cuña que al ser afectadas por la precipitación y sismicidad, inestabilizan y erosionan el macizo rocoso, generando desprendimientos constantes de bloques.



Foto 16: Afloramiento de calizas arenosas en estratificación delgada de la Formación Chúlec (Ki - Ch), en las progresivas Km 131+405 - Km 131+445.

Tabla 24: Parámetros del Macizo Rocoso, orientación de las familias y geometría del Talud Crítico N°3.

MACIZO ROCOSO				ORIENTACIÓN			
LITOLÓGÍA / FORMACIÓN	METEORIZACIÓN	GRADO DE FRACTURAMIENTO	GSI	TIPO	D	DD	
Caliza, Chulec	1=Fresco	1=Alto	1= Bloq. regular	ESTRATO	68°	304°	
				FAMILIA 1	74°	42°	
	2=Leve	2=Medio	2=Bloq. Irregular	FAMILIA 2	52°	148°	
				GEOMETRÍA DEL TALUD			
	3=Moderado	3=Bajo	3=Bloq. y Capas	ALTURA	16 m		
				PIE	14 m		
	4=Alto			4= Frac-intenso	DIRECCIÓN	TALUD	CABEZA
					D	68°	40°
	3	2		2	DD	78°	78°

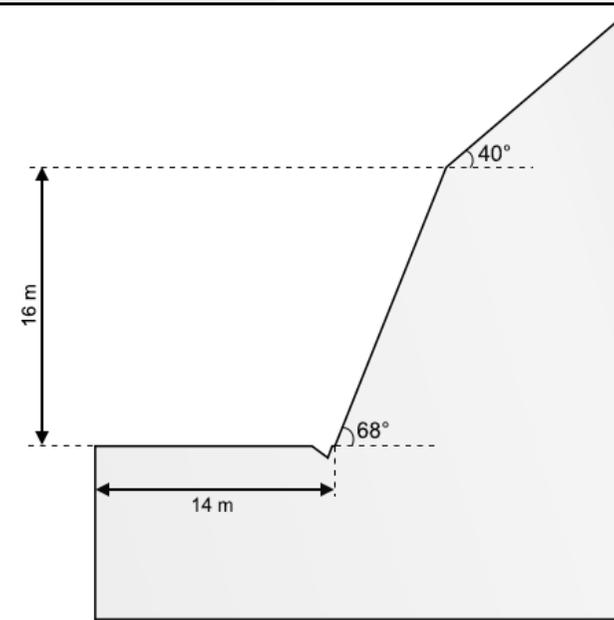
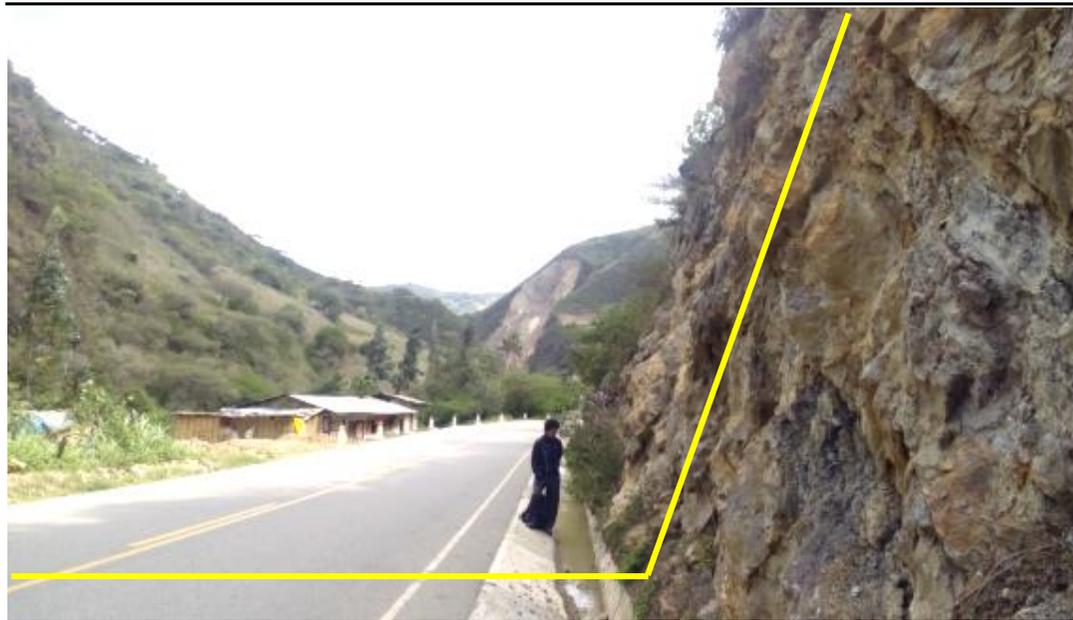


Foto 17: Perfil del Talud Crítico N°3 en las progresivas Km 131+405 - Km 131+445.

Tabla 25: Asignación de Valores para el Macizo Rocoso, Talud crítico N° 03.

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)	4
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.01 mm (5)	0.1 – 1.0 mm (4)	1 – 5 mm (1)	> 5mm (0)	0
	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)	0
	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>50</b>	

La estimación del GSI se realizó mediante la matriz publicada por Hoek, Carter, & Diederichs (2013), como se muestra en la Tabla 5, la cual presenta algunas modificaciones menores al gráfico del GSI publicado por Hoek y Marinos (2000). Presenta dos escalas lineales simples, **JCond<sub>89</sub>** (condiciones de superficie de las discontinuidades) y **RQD**. La medición o estimación en campo es muy simple y posiblemente otorga el mayor grado de consistencia. Lo que es más importante, la relación entre los valores GSI calculados y mapeados son razonablemente cercanas a la relación ideal de 1:1 para un ajuste perfecto y obtener propiedades de entrada para modelos numéricos. La estimación del GSI para la Talud Crítico N° 3 se muestra en la Tabla 26.

Tabla 26: Estimación del GSI en términos del RQD y la Condición de las Juntas

ESTIMACIÓN DEL GSI								
CÁLCULO DEL RQD								
$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$					ND	L(m)	$\lambda$	RQD
					48	4	12	66.3
CLASIFICACIÓN DE CONDICIONES DE DISCONTINUIDADES, BIENIAWSKI (1989)								
LONGITUD DE LA DISCONTINUIDAD	ABERTURA	RUGOSIDAD	RELLENO	ALTERACIÓN	VALORACIÓN JCOND <sub>89</sub>			
< 1m (6)	Cerrada (6)	Muy Rugosa (6)	Ninguno (6)	Sana (6)				
1 - 3 m (4)	< 0.01 mm (5)	Rugosa (5)	Duro < 5mm (4)	Lig. Alt (5)				
3 - 10 m (2)	0.1 - 1.0 mm (4)	Lig. Rugosa (3)	Duro > 5mm (2)	Mod. Alt (3)				
10 - 20 m (1)	1 - 5 mm (1)	Lisa (1)	Suave < 5mm (1)	Muy Alt (1)				
> 20 m (0)	> 5 mm (0)	Suave (0)	Suave > 5mm (0)	Descompuesta (0)				
4	0	3	0	3	10			
$GSI = 1.5JCOND_{89} + RQD/2$					<b>GSI = 48.13</b>			

La determinación de las propiedades geomecánicas del Talud Crítico 03 se realizó mediante el software RocData v.4.0, y se muestra en la Figura 39. El análisis cinemático con el software Dips v.6.0, se presenta en las Figuras 40 - 41. El análisis de estabilidad de los taludes con las seis condiciones, se realizó con el software Slide v.6.0, y se muestran en las Figuras 42 - 47.

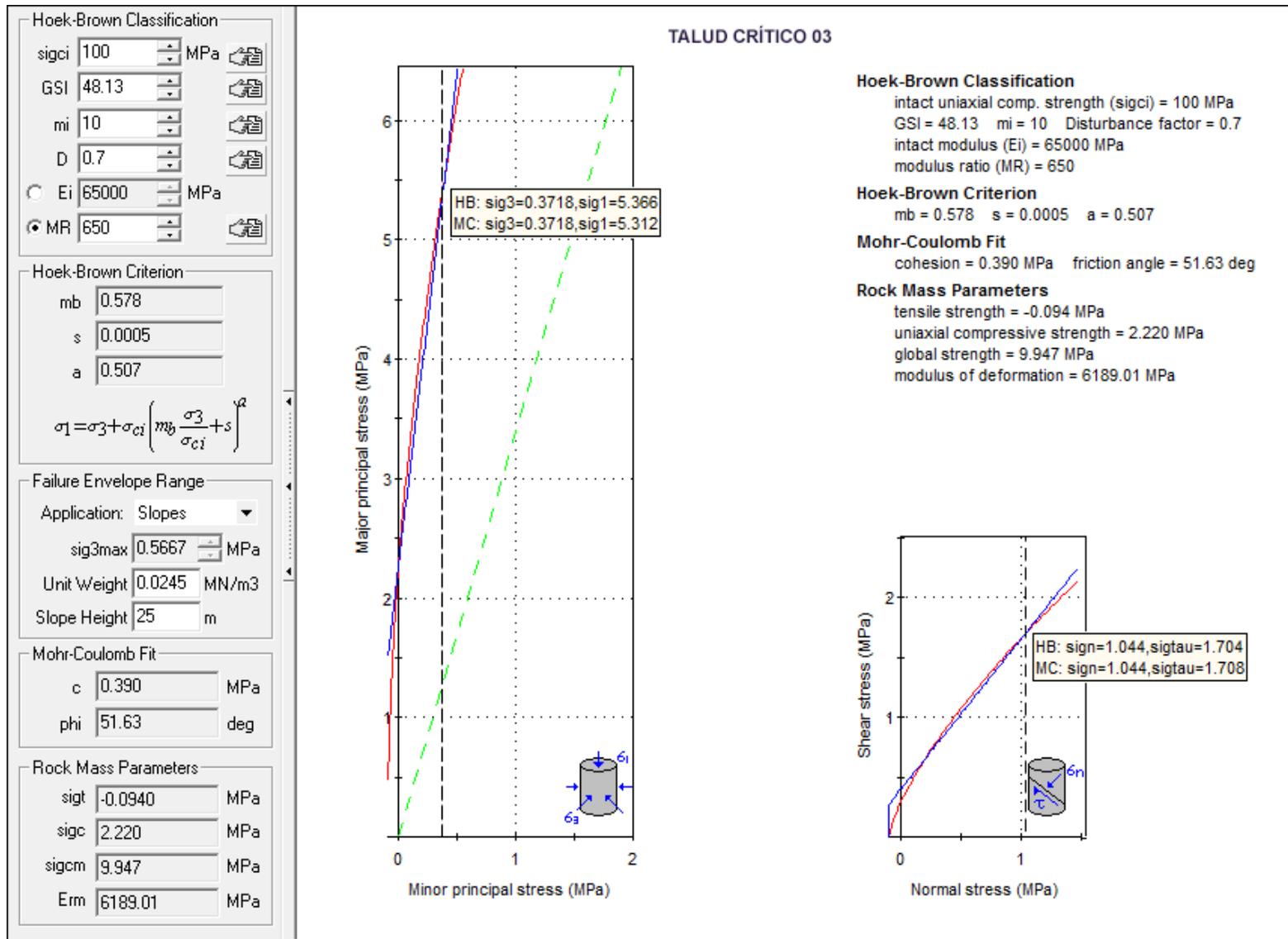


Figura 39: Análisis de las Propiedades Geomecánicas en el software RocData v.4 correspondiente al Talud Crítico 03.

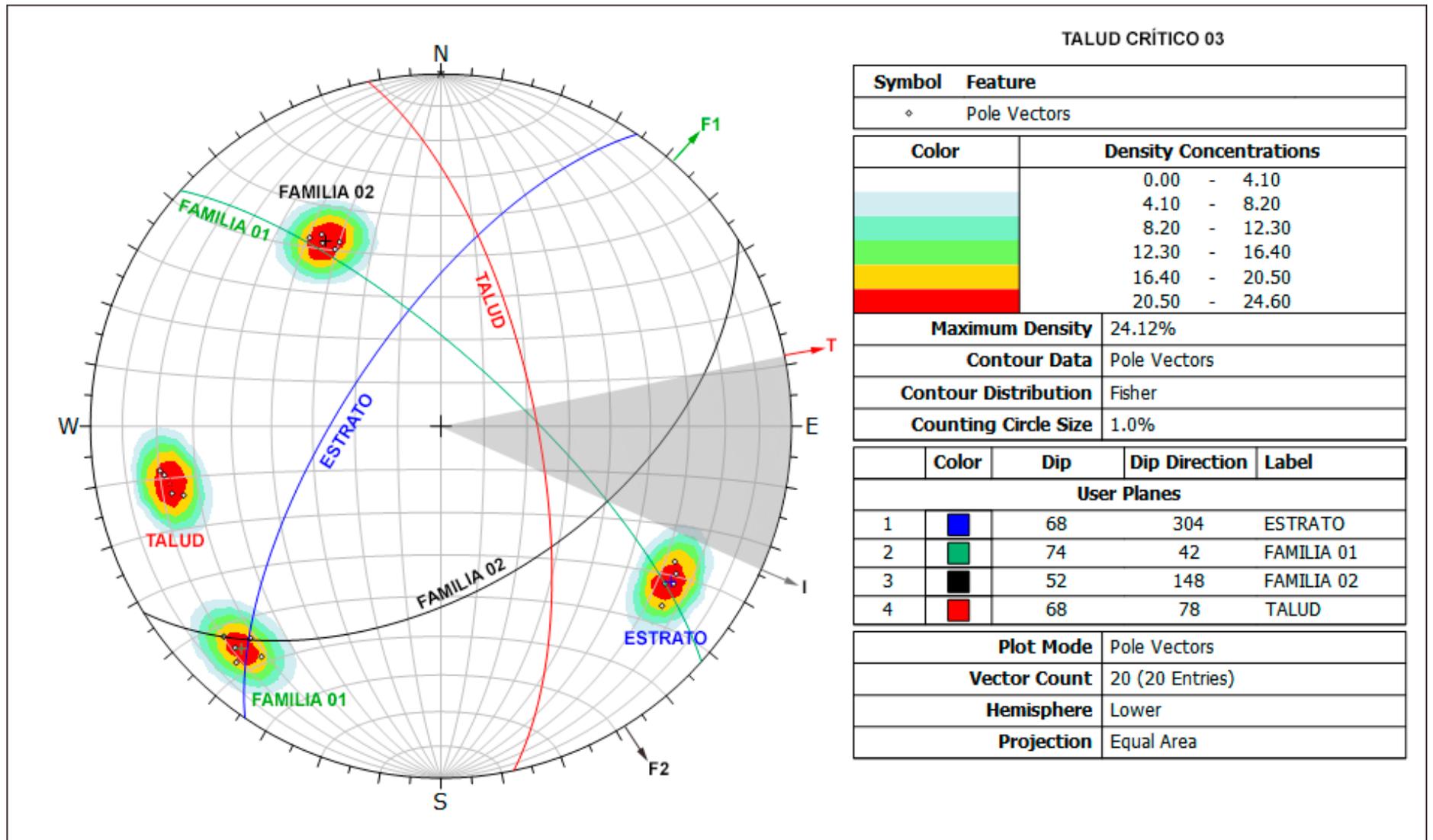


Figura 40: Análisis Cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indica rotura en cuña directa.

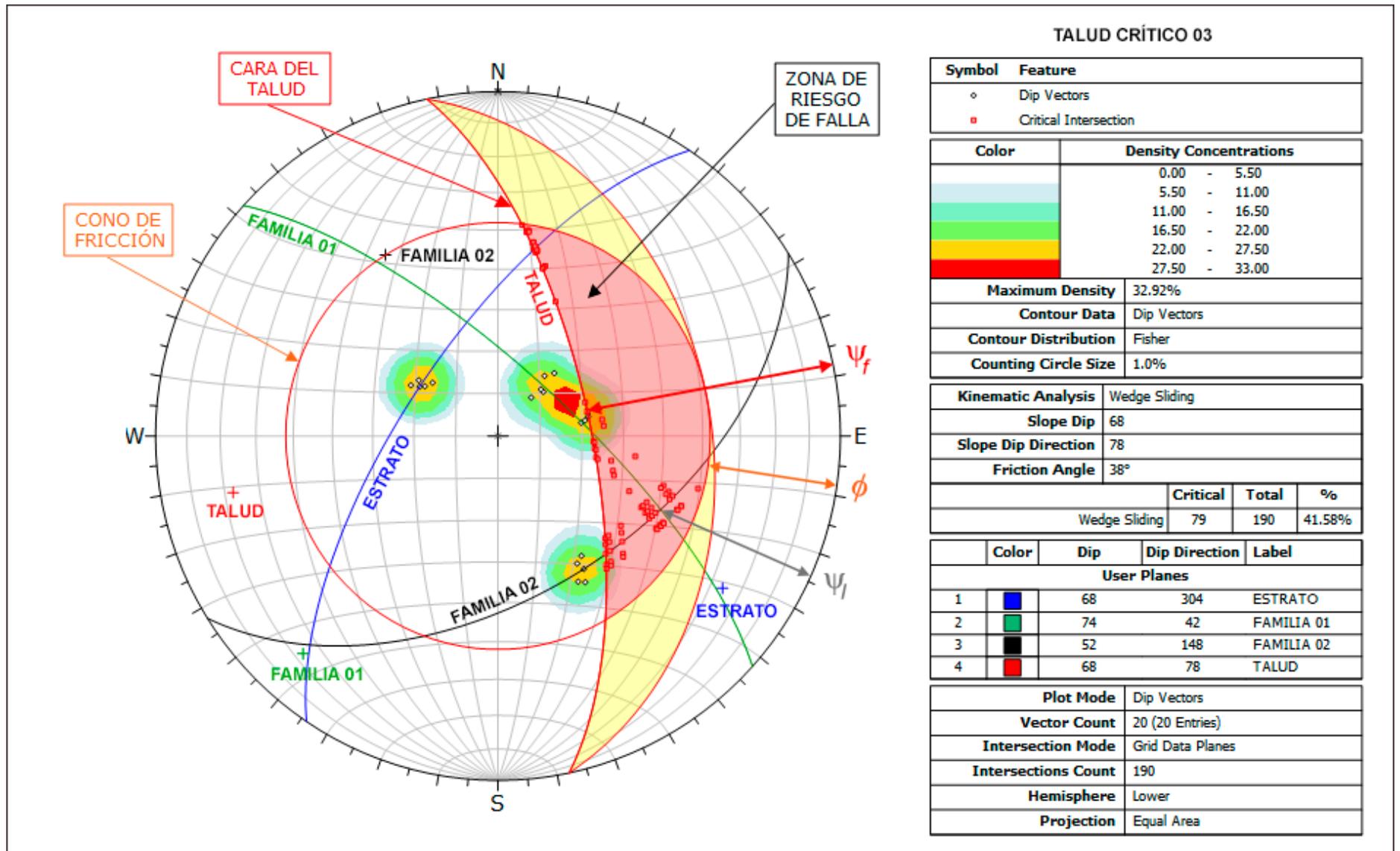


Figura 41: Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de deslizamiento en cuña.

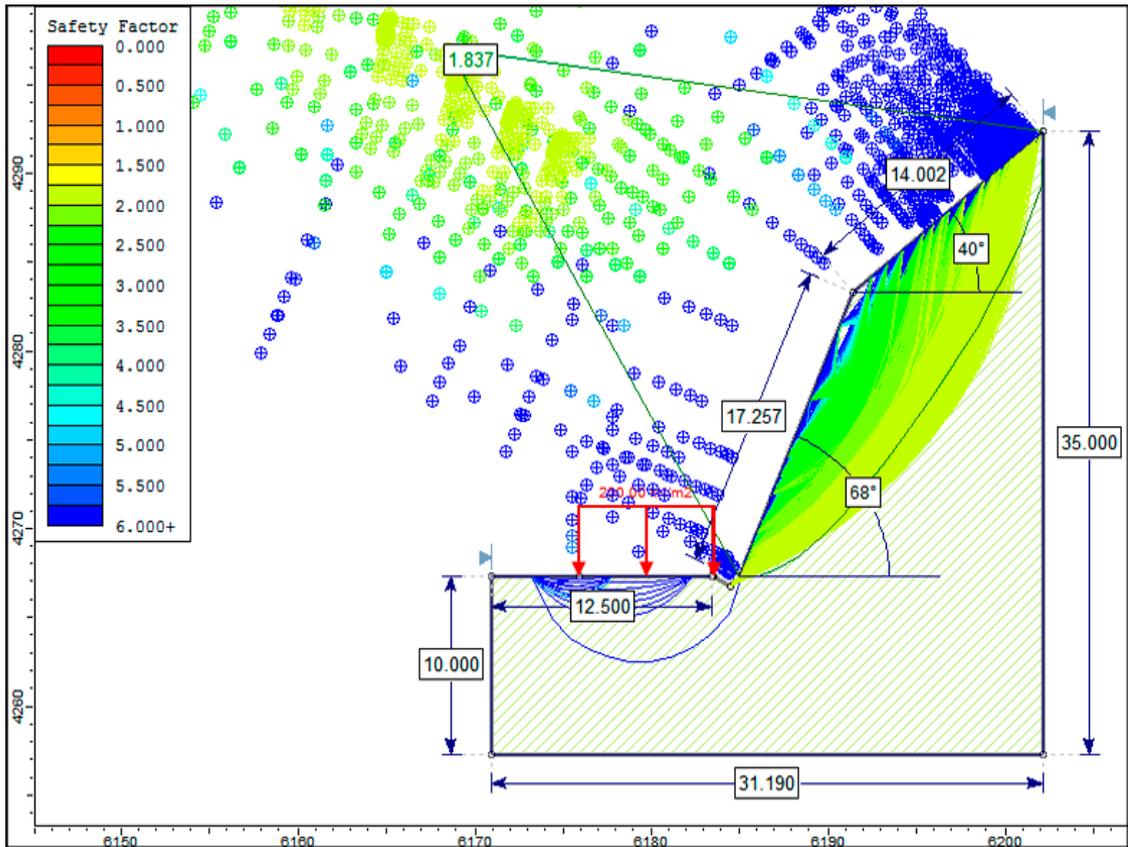


Figura 42: Análisis Slide en condiciones naturales.

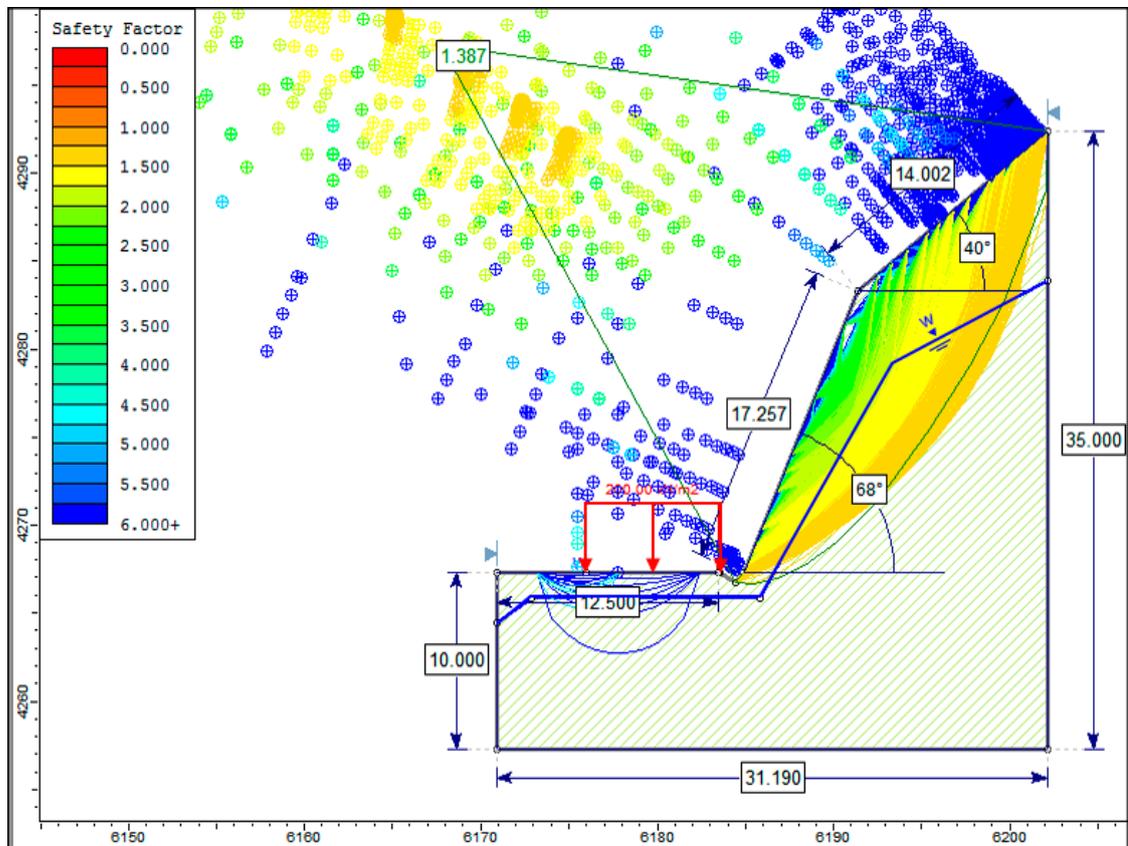


Figura 43: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial.

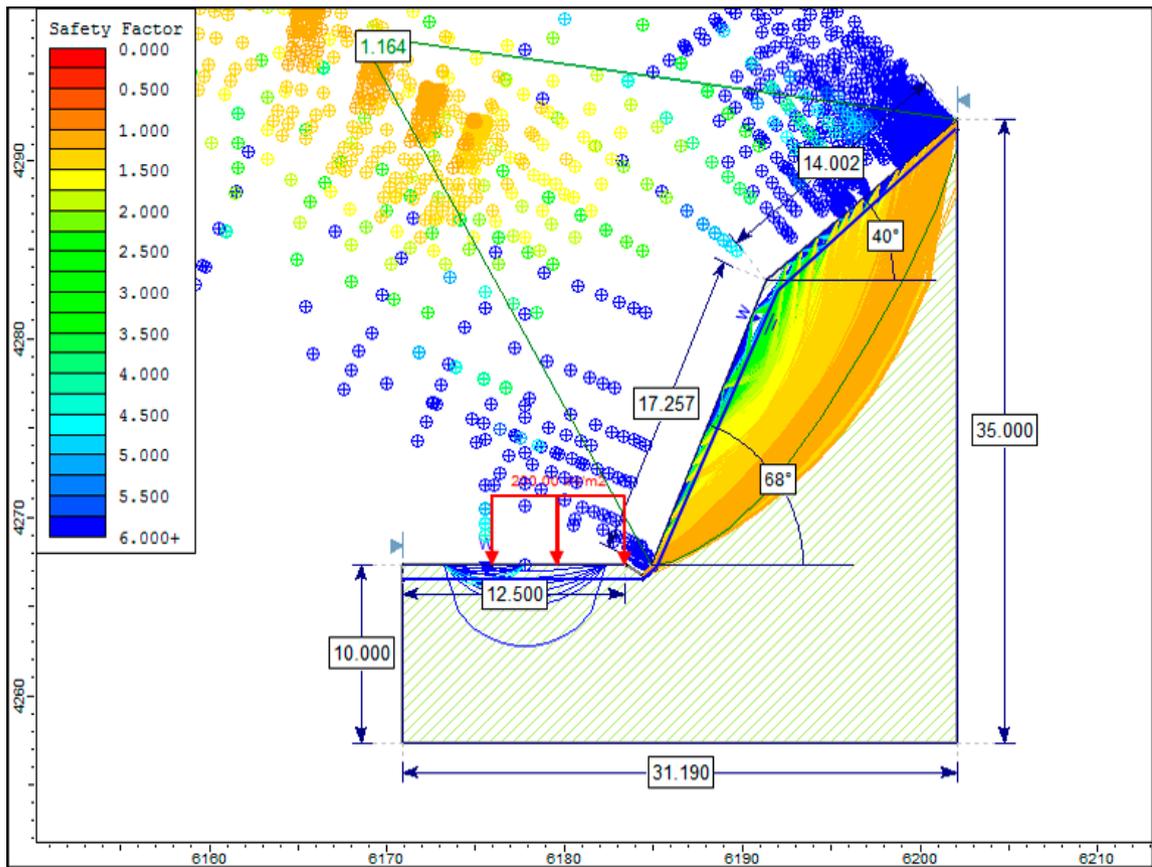


Figura 44: Análisis Slide en condiciones de saturación total.

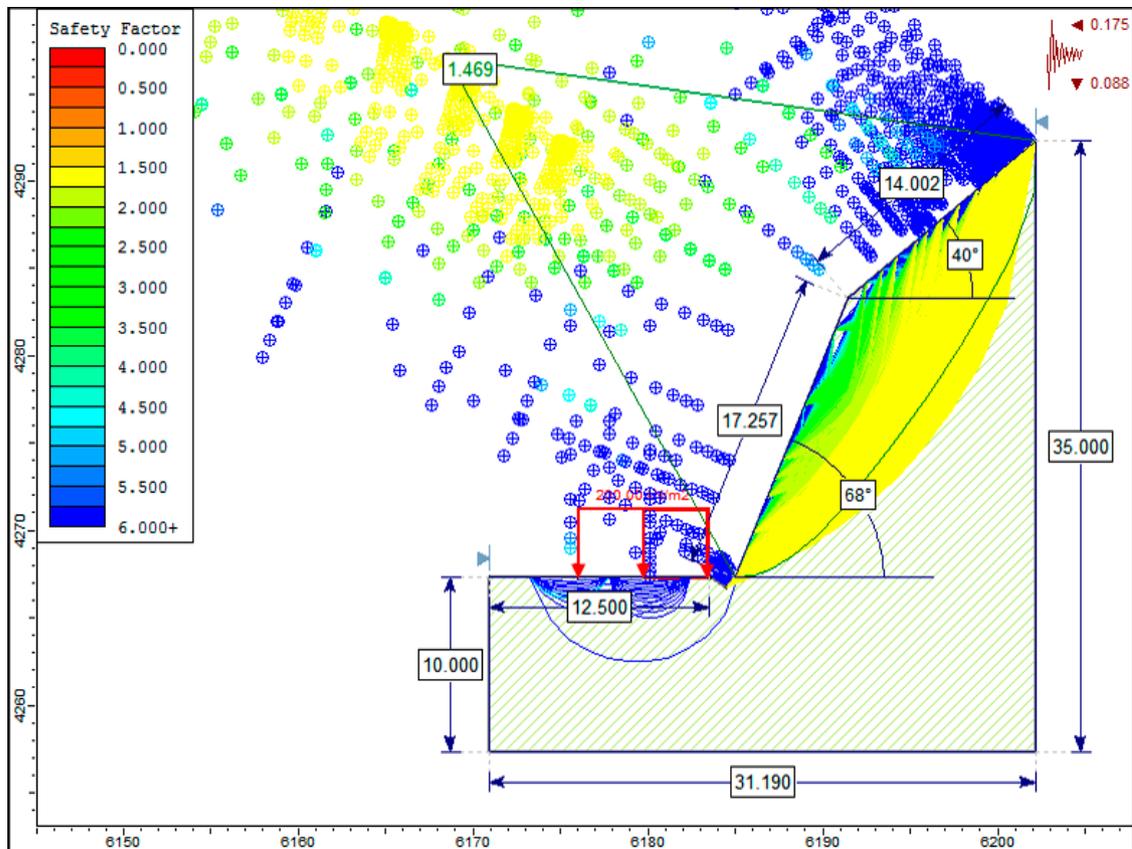


Figura 45: Análisis Slide en condiciones de sismicidad.

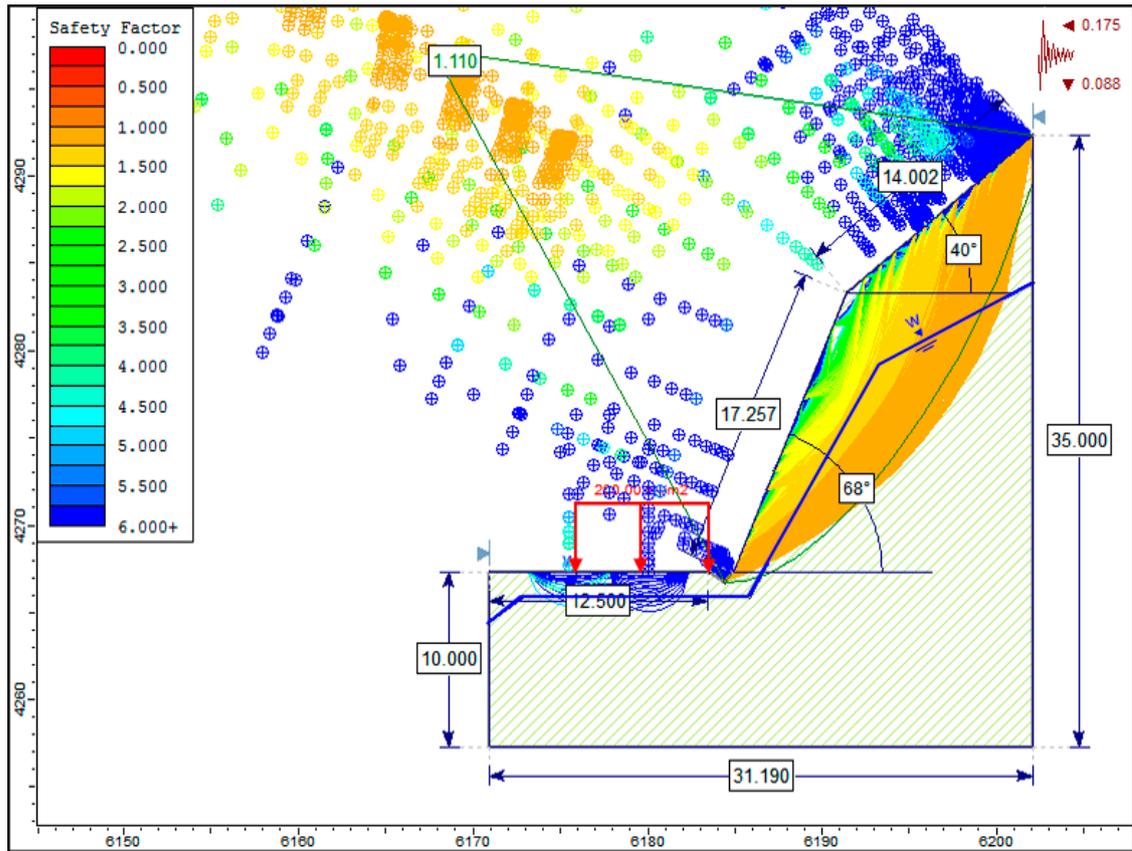


Figura 46: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad.

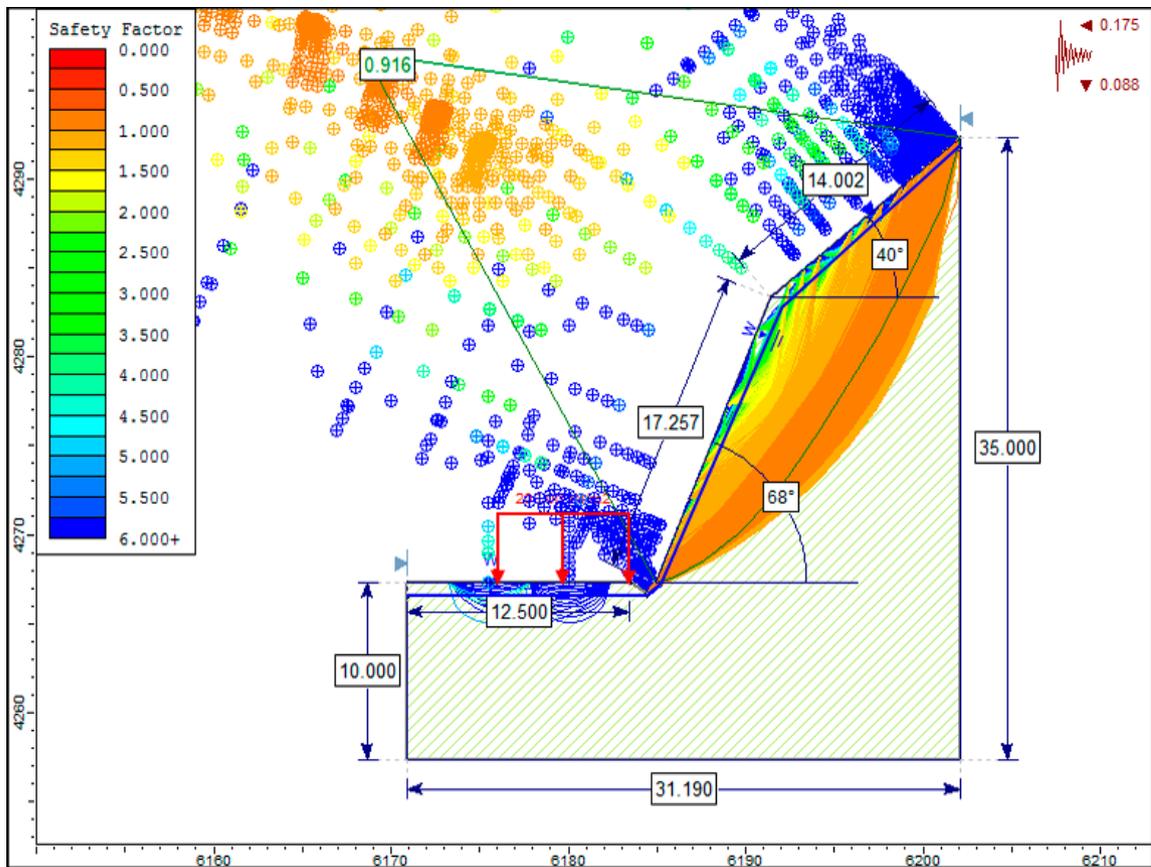


Figura 47: Análisis Slide en condiciones de saturación total y sismicidad.

### 3.9.4 Talud Crítico N° 04:

La información correspondiente al Talud Crítico N° 04, su respectiva fotografía, y los valores del RMR se encuentran en la Tabla 27, 28 y 29 respectivamente.

Tabla 27: Coordenadas y descripción de la Talud Crítico N° 04.

DATUM	ZONA	COORDENADAS		COTA
		ESTE	NORTE	
WGS - 84	17 S	741588	9280887	1902
		DESCRIPCIÓN		

El talud se ubica en la parte SW de la carretera entre las progresivas Km 129+043 - Km 129+083, dentro de la Formación Chúlec (Ki - Ch). Esta compuesto litológicamente de calizas arenosas dispuestas en estratos delgados con espesores que varían de 20 cm a 1 m. El talud tiene una altura aproximada de 14 m con una inclinación de 74°, la cresta del talud sigue la morfología natural del terreno sin ningún cambio de rumbo con respecto al talud. Se evidencia una meteorización moderada con tonalidades gris amarillentas y un grado de fracturamiento medio con bloques irregulares, presentando tres familias de discontinuidades. La estratificación tiene una dirección de inclinación hacia la cara del talud; por lo cual, el mecanismo potencial de rotura de acuerdo al análisis cinemático es planar; además, revela la intersección de dos discontinuidades favorables para la formación de bloques en cuña y demuestra que se tiene un mecanismo en vuelco. Al ser afectadas por la precipitación y sismicidad, inestabilizan y erosionan el macizo rocoso, generando deslizamientos y desprendimientos constantes de bloques.



Foto 18: Afloramiento de calizas arenosas en estratificación delgada de la Formación Chúlec (Ki - Ch), en las progresivas Km 129+043 - Km 129+083.

Tabla 28: Parámetros del Macizo Rocoso, orientación de las familias y geometría del Talud Crítico N°4.

MACIZO ROCOSO				ORIENTACIÓN			
LITOLOGÍA / FORMACIÓN	METEORIZACIÓN	GRADO DE FRACTURAMIENTO	GSI	TIPO	D	DD	
Caliza, Chulec	1=Fresco	1=Alto	1= Bloq. regular	ESTRATO	50°	87°	
				FAMILIA 1	70°	352°	
	2=Leve	2=Medio	2=Bloq. Irregular	FAMILIA 2	68°	262°	
				GEOMETRÍA DEL TALUD			
	3=Moderado	3=Bajo	3=Bloq. y Capas	ALTURA	14 m		
				PIE	10 m		
	4=Alto			4= Frac-intenso	DIRECCIÓN	TALUD	CABEZA
					D	74°	35°
	3	2	2	DD	70°	70°	

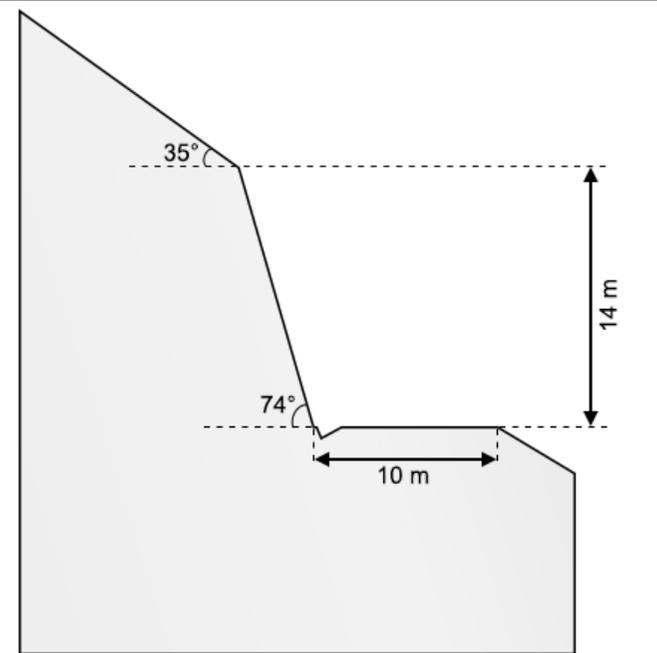


Foto 19: Perfil del Talud Crítico N°4 en las progresivas Km 129+043 - Km 129+083.

Tabla 29: Asignación de Valores para el Macizo Rocoso, Talud crítico N° 04.

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)	4
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.01 mm (5)	0.1 – 1.0 mm (4)	1 – 5 mm (1)	> 5mm (0)	0
	Rugosidad	Muy Rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Lisa (1)	Suave (0)	5
	Relleno	Ninguno (6)	Duro < 5 mm (4)	Duro > 5 mm (2)	Suave < 5 mm (1)	Suave > 5 mm (0)	0
	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>52</b>	

La estimación del GSI se realizó mediante la matriz publicada por Hoek, Carter, & Diederichs (2013), como se muestra en la Tabla 5, la cual presenta algunas modificaciones menores al gráfico del GSI publicado por Hoek y Marinos (2000). Presenta dos escalas lineales simples, **JCond<sub>89</sub>** (condiciones de superficie de las discontinuidades) y **RQD**. La medición o estimación en campo es muy simple y posiblemente otorga el mayor grado de consistencia. Lo que es más importante, la relación entre los valores GSI calculados y mapeados son razonablemente cercanas a la relación ideal de 1:1 para un ajuste perfecto y obtener propiedades de entrada para modelos numéricos. La estimación del GSI para la Talud Crítico N° 4 se muestra en la Tabla 30.

Tabla 30: Estimación del GSI en términos del RQD y la Condición de las Juntas

ESTIMACIÓN DEL GSI					
CÁLCULO DEL RQD					
$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$	ND	L(m)	$\lambda$	RQD	
		55	4	14	60
CLASIFICACIÓN DE CONDICIONES DE DISCONTINUIDADES, BIENIAWSKI (1989)					
LONGITUD DE LA DISCONTINUIDAD	ABERTURA	RUGOSIDAD	RELLENO	ALTERACIÓN	VALORACIÓN JCOND <sub>89</sub>
< 1m (6)	Cerrada (6)	Muy Rugosa (6)	Ninguno (6)	Sana (6)	
1 -3 m (4)	< 0.01 mm (5)	Rugosa (5)	Duro < 5mm (4)	Lig. Alt (5)	
3 - 10 m (2)	0.1 - 1.0 mm (4)	Lig. Rugosa (3)	Duro > 5mm (2)	Mod. Alt (3)	
10 - 20 m (1)	1 - 5 mm (1)	Lisa (1)	Suave < 5mm (1)	Muy Alt (1)	
> 20 m (0)	> 5 mm (0)	Suave (0)	Suave > 5mm (0)	Descompuesta (0)	
4	0	5	0	3	12
$GSI = 1.5JCOND_{89} + RQD/2$				<b>GSI = 48.02</b>	

La determinación de las propiedades geomecánicas del Talud Crítico 04 se realizó mediante el software RocData v.4.0, y se muestra en la Figura 48. El análisis cinemático con el software Dips v.6.0, se presenta en las Figuras 49 - 53. El análisis de estabilidad de los taludes con las seis condiciones, se realizó con el software Slide v.6.0, y se muestran en las Figuras 54 - 59.

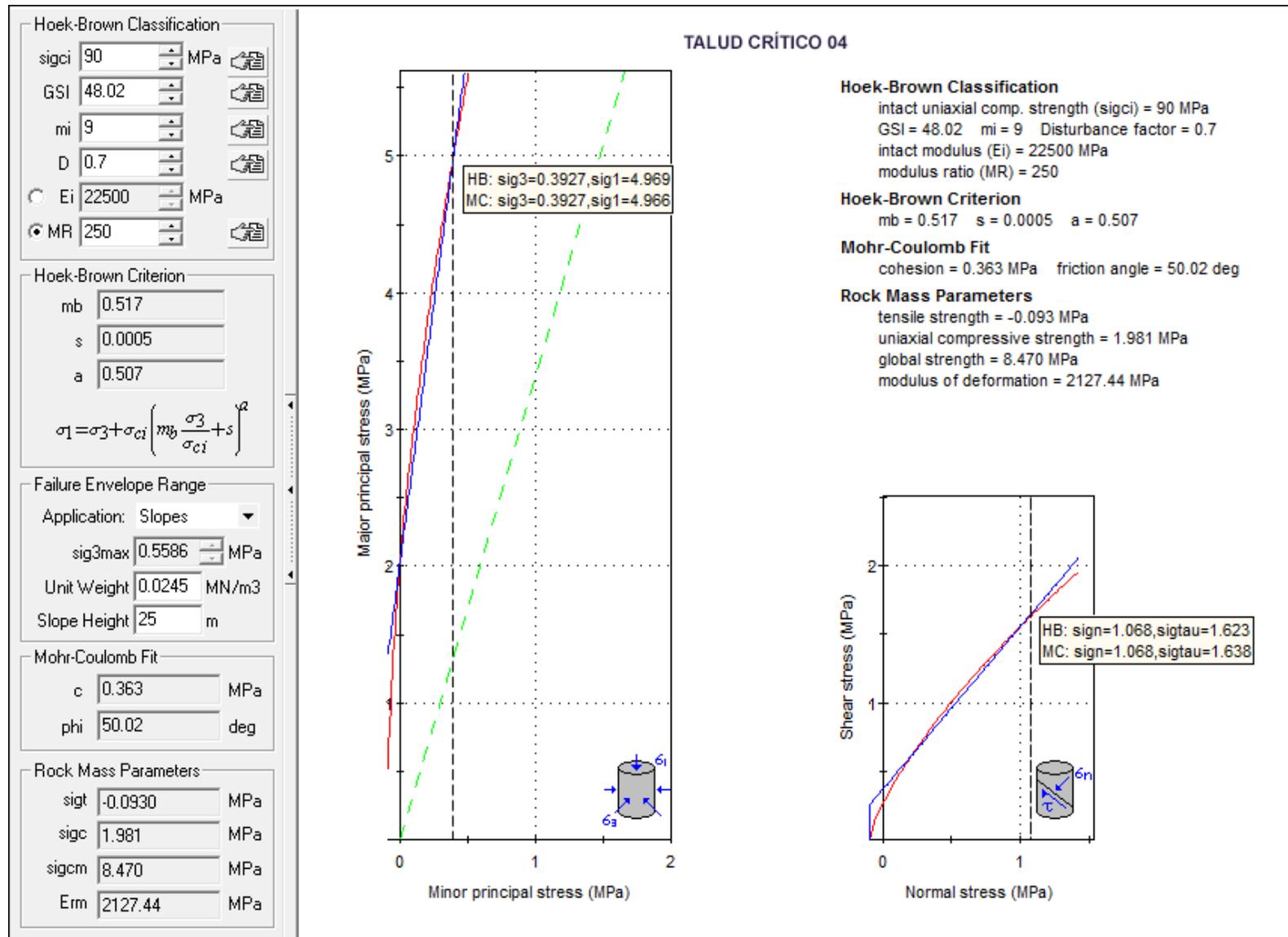


Figura 48: Análisis de las Propiedades Geomecánicas en el software RocData v.4 correspondiente al Talud Crítico 04.

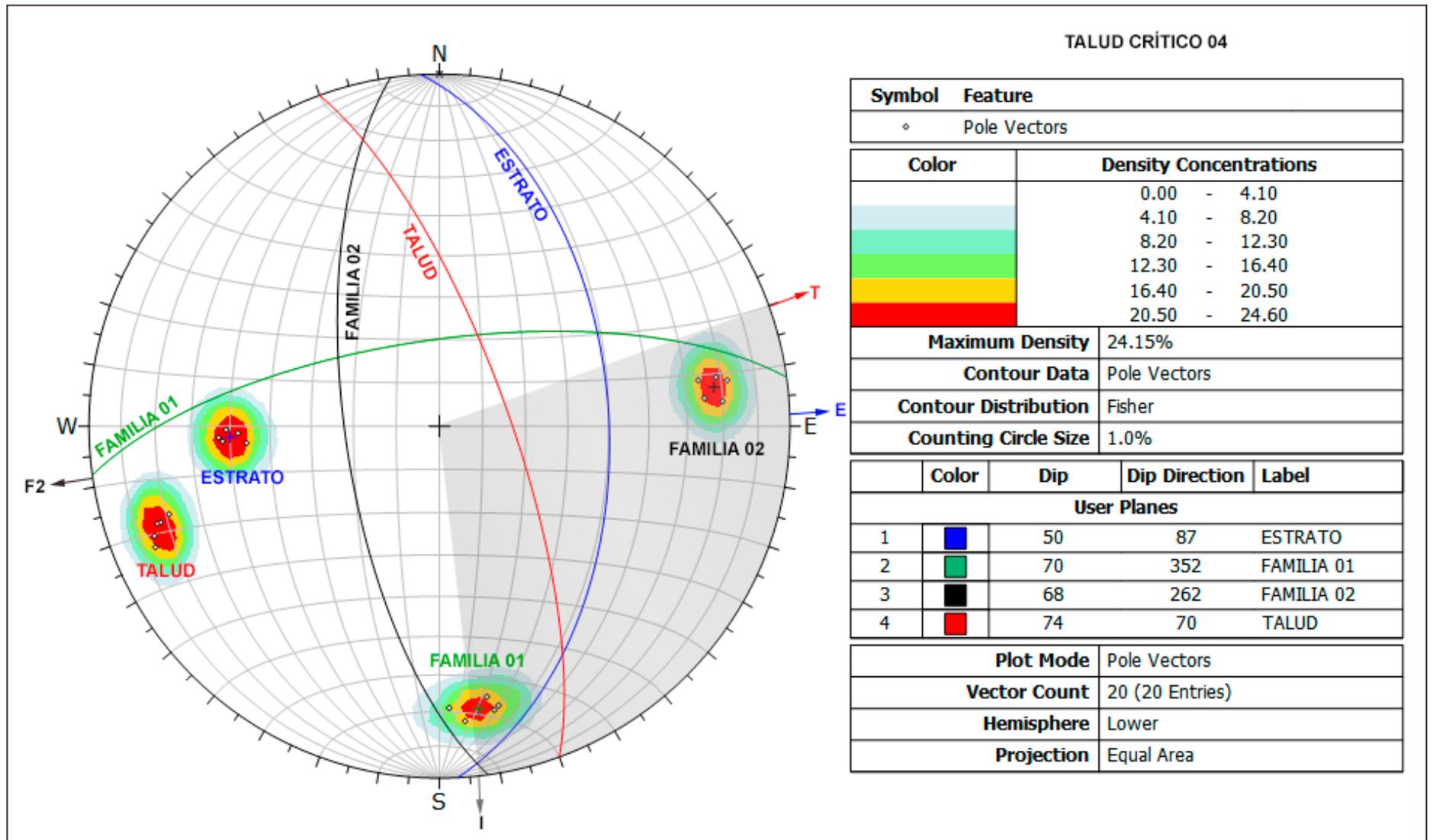


Figura 49: Análisis Cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indica rotura planar.

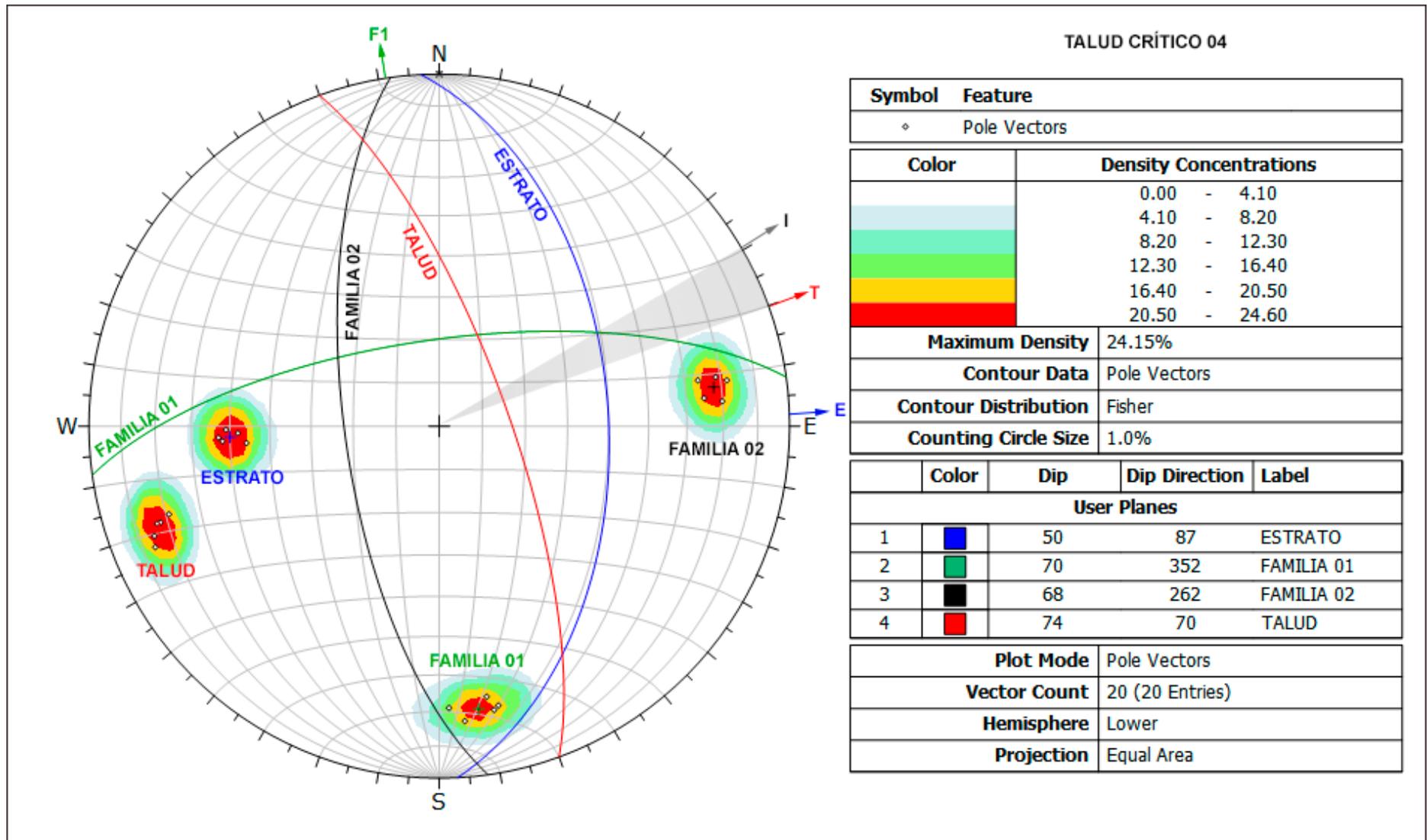


Figura 50: Análisis Cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indica rotura en cuña directa.

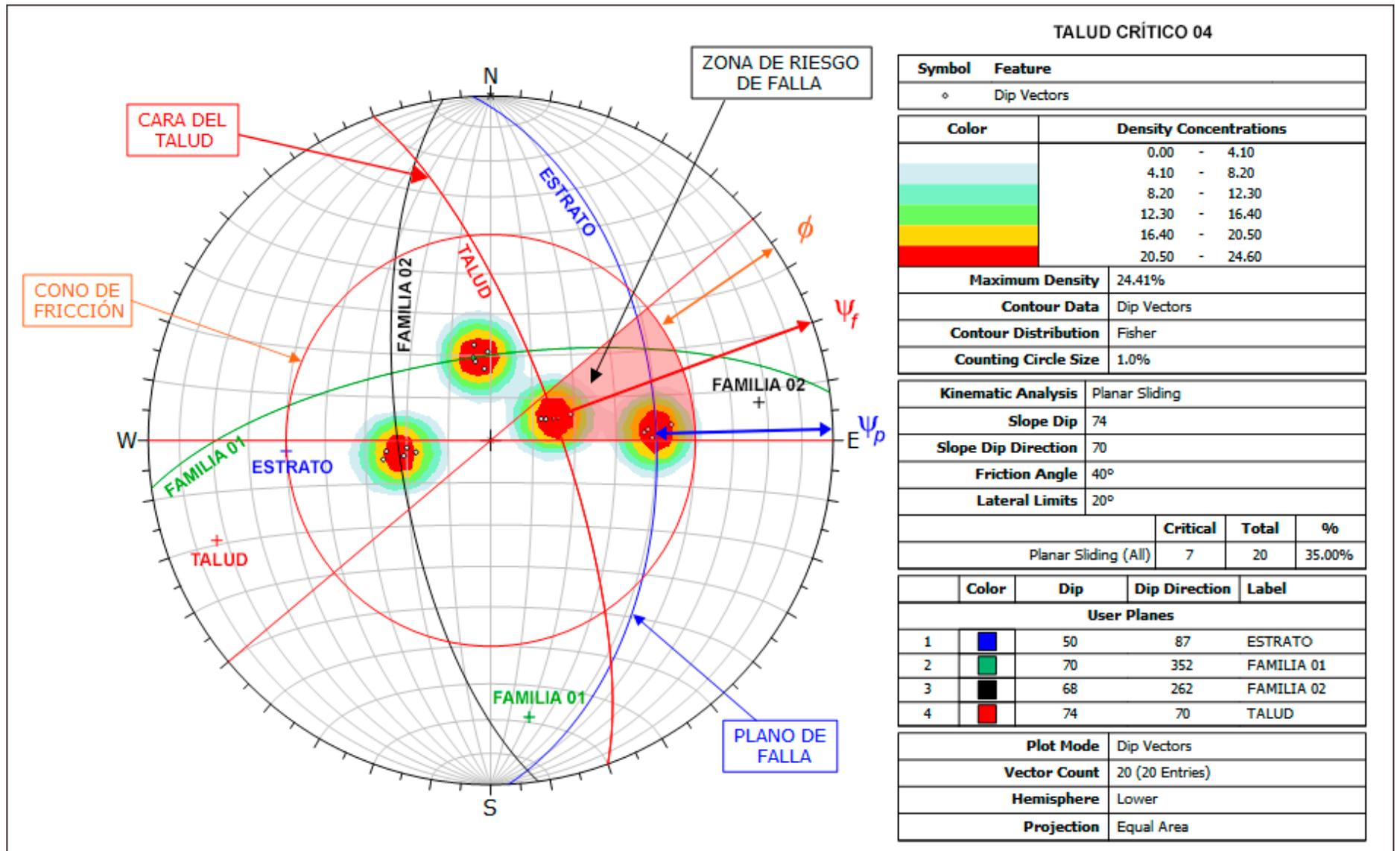


Figura 51: Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de deslizamiento planar.

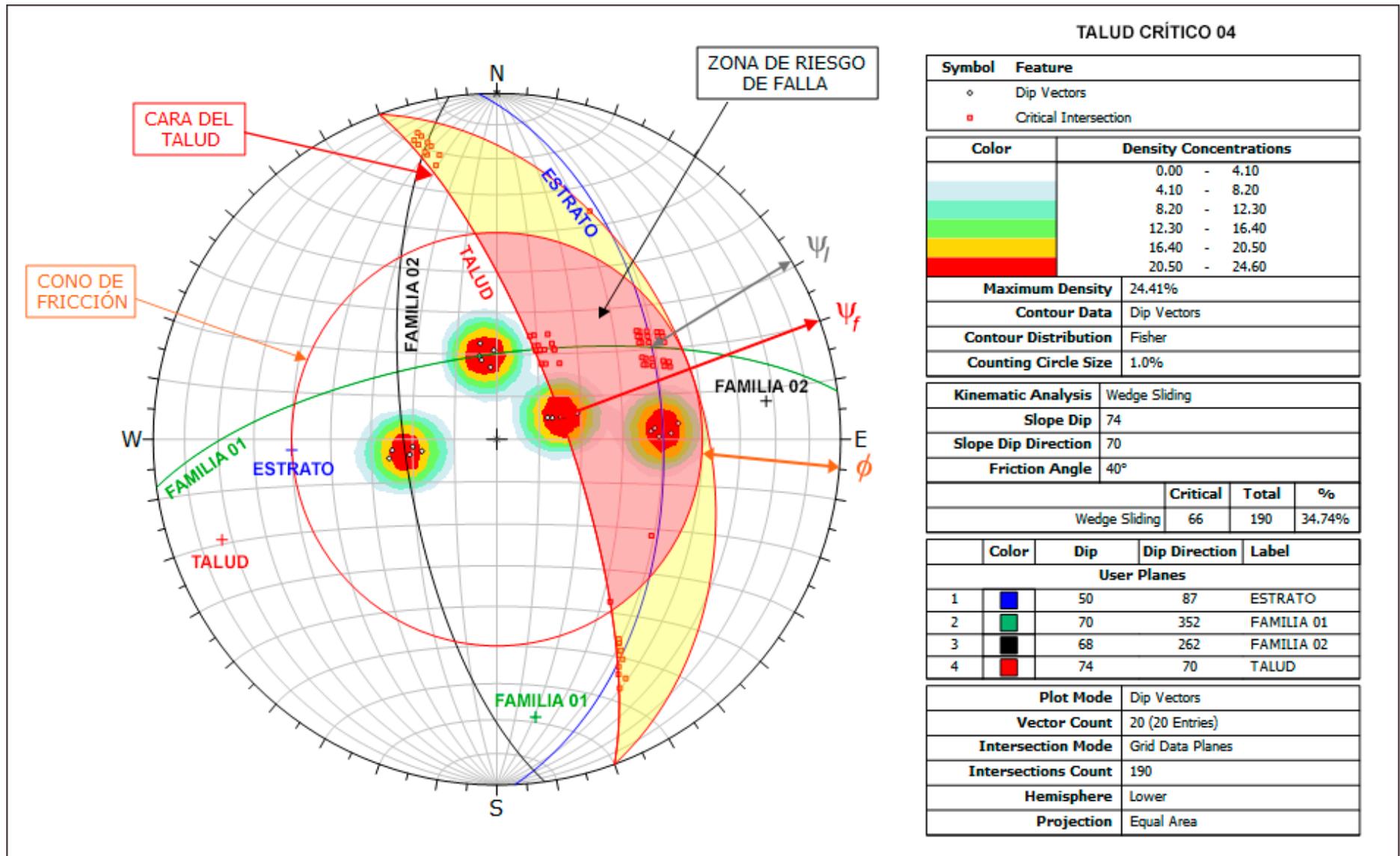


Figura 52: Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de deslizamiento en cuña.

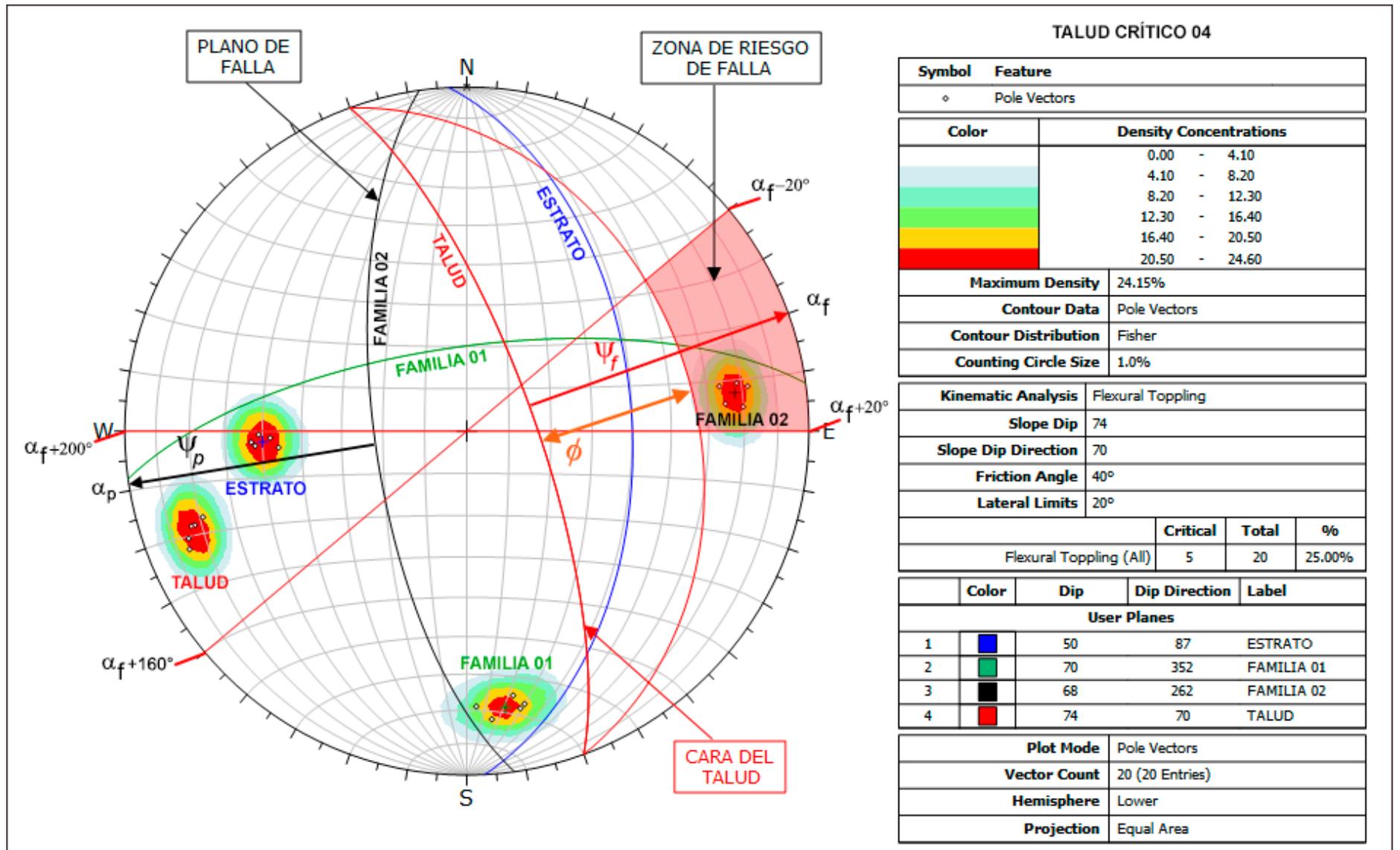


Figura 53: Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de rotura en vuelco.

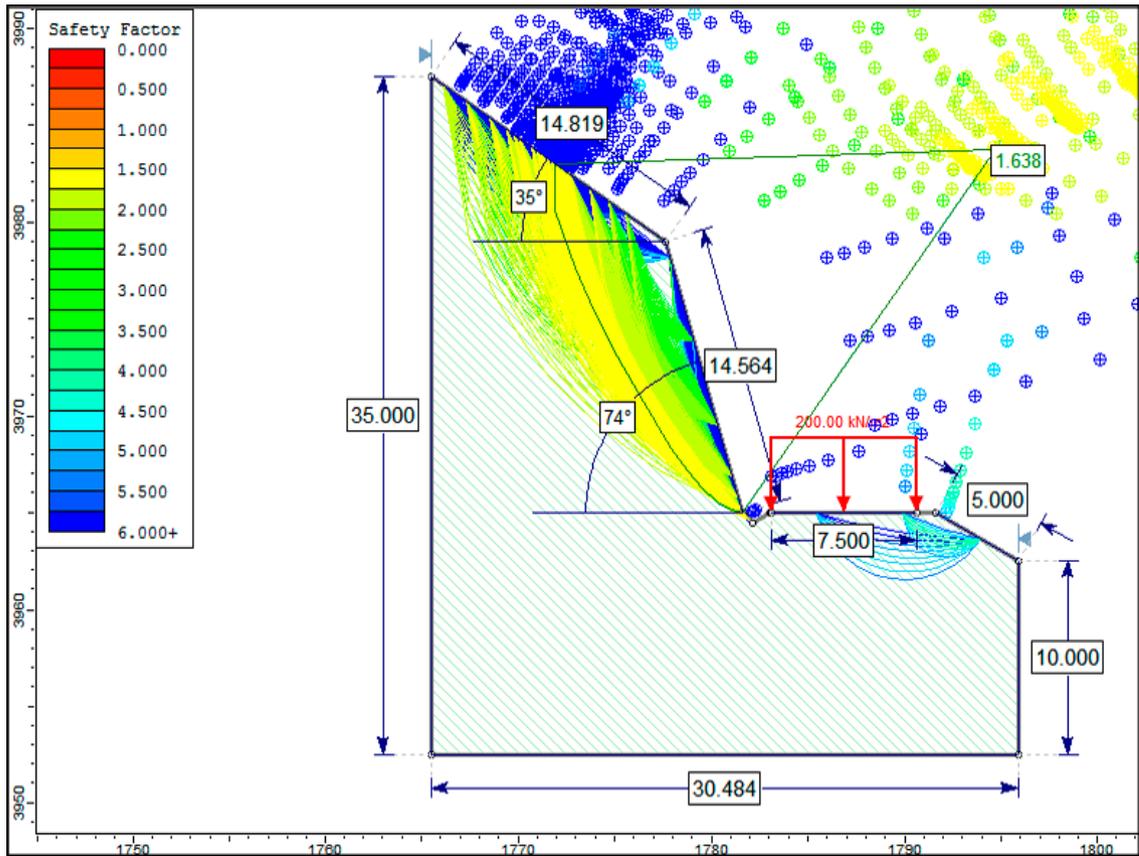


Figura 54: Análisis Slide en condiciones naturales.

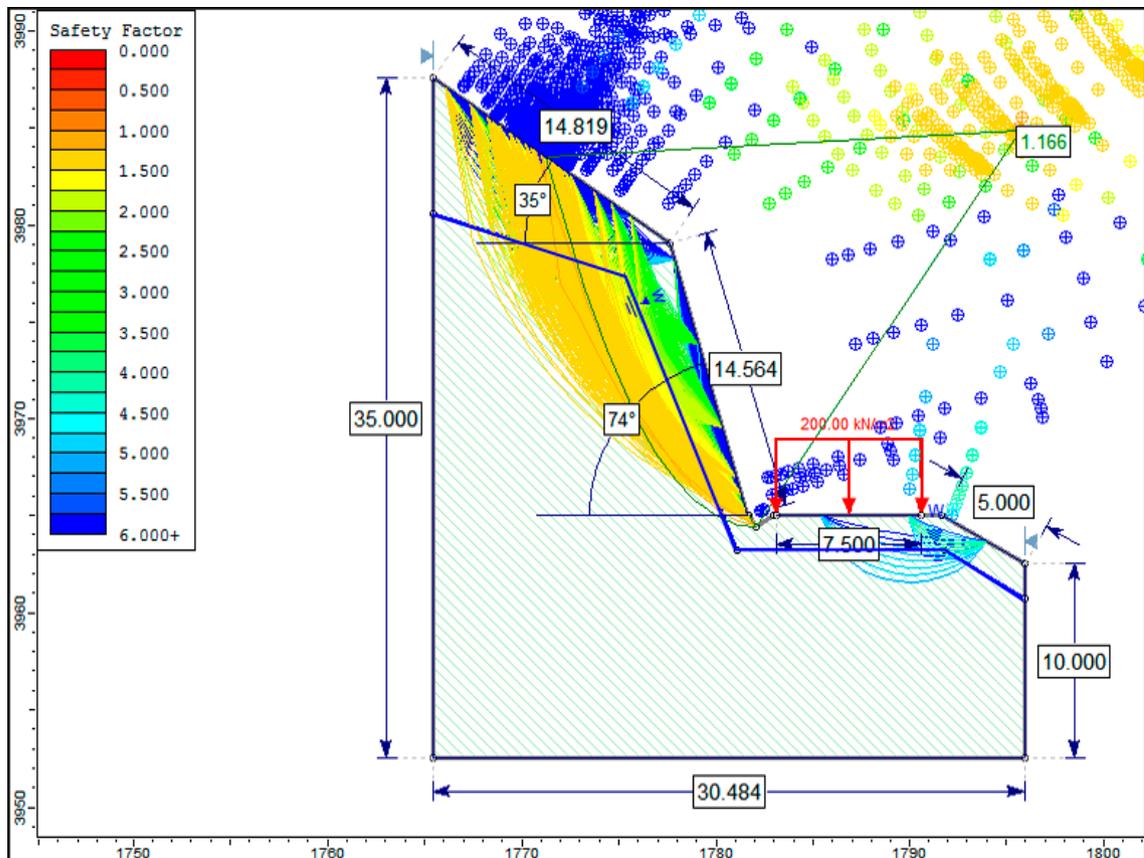


Figura 55: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial.

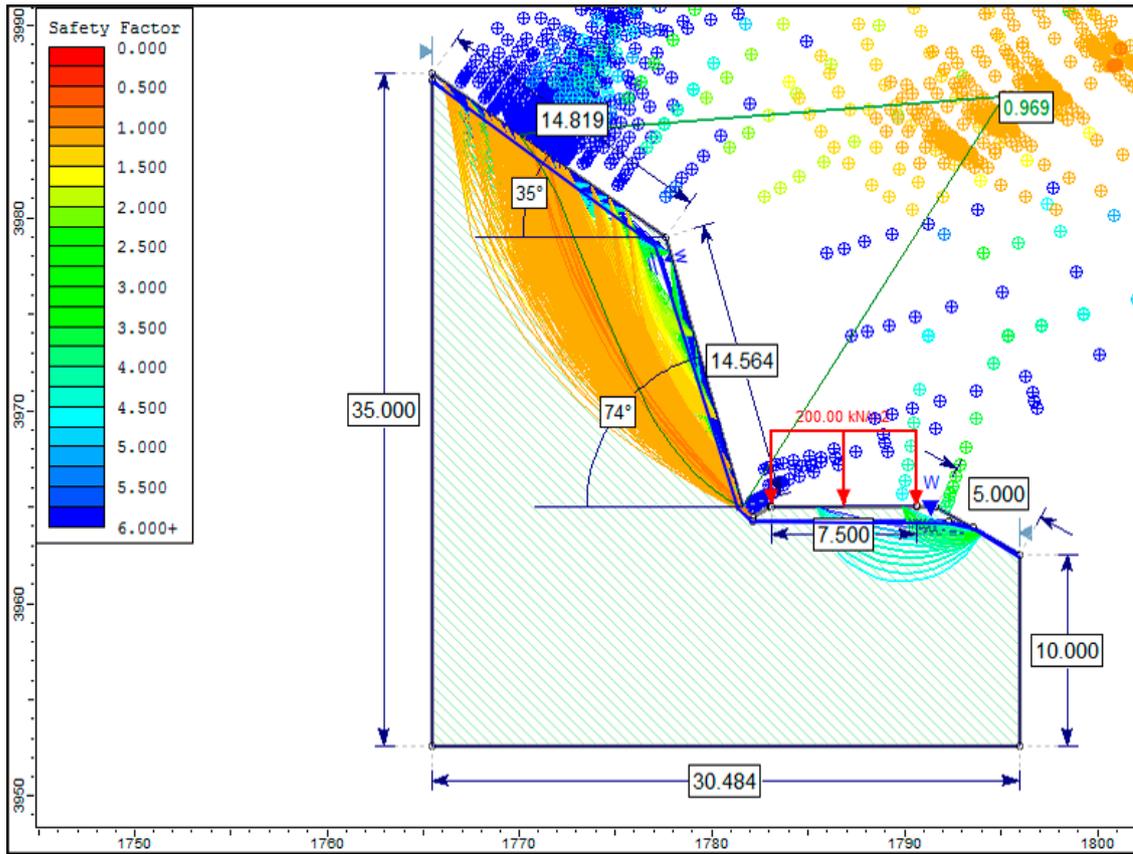


Figura 56: Análisis Slide en condiciones de saturación total.

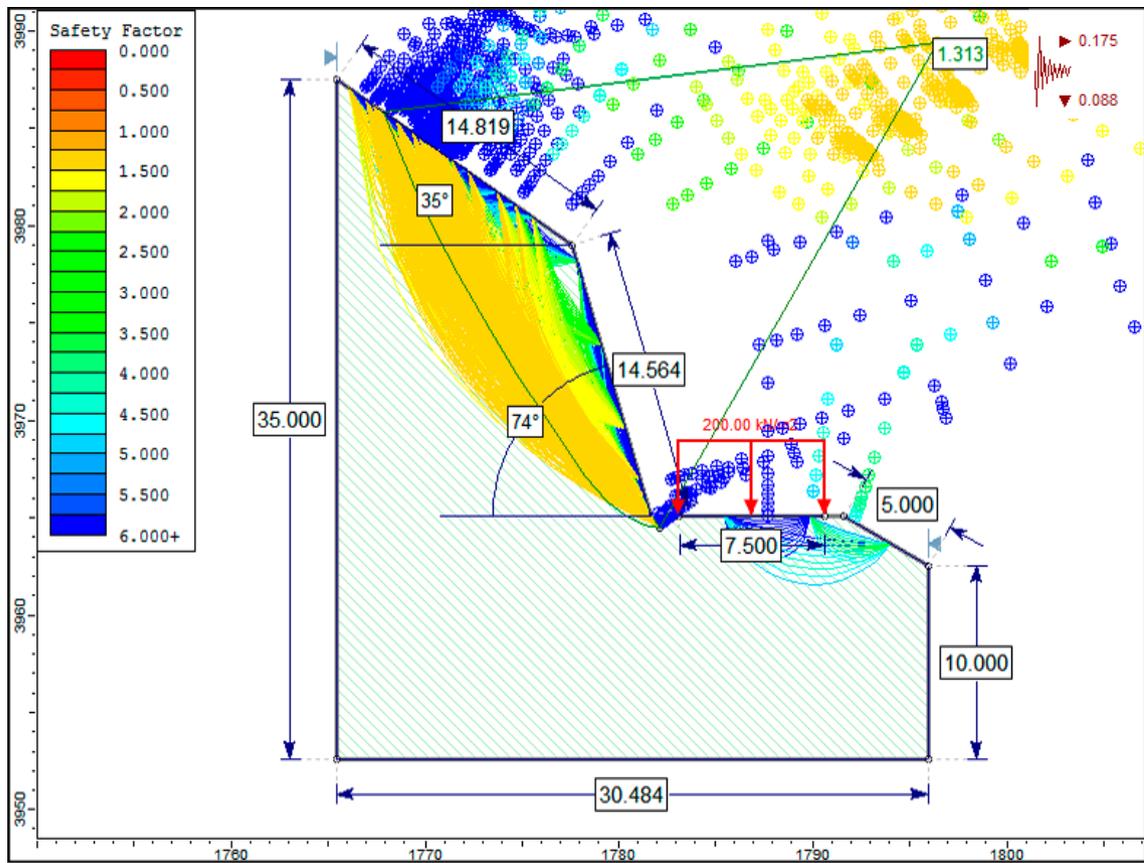


Figura 57: Análisis Slide en condiciones de sismicidad.

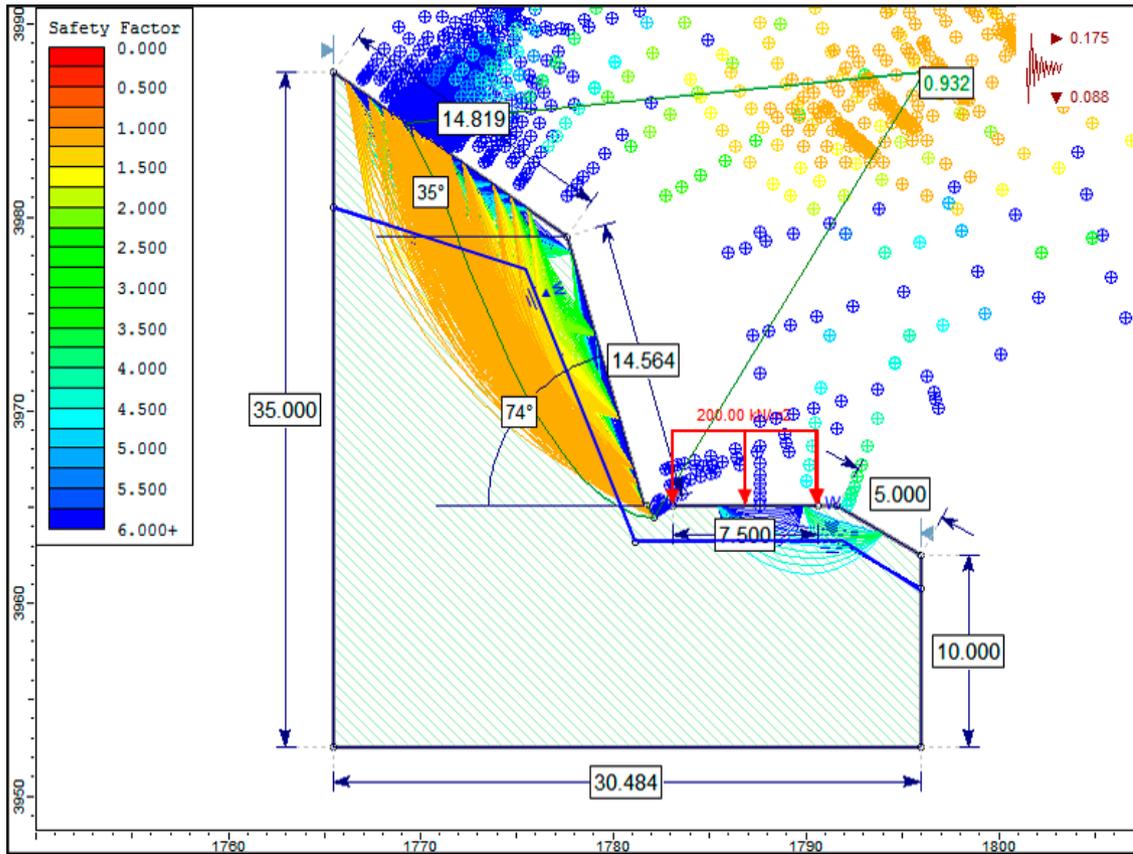


Figura 58: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad.

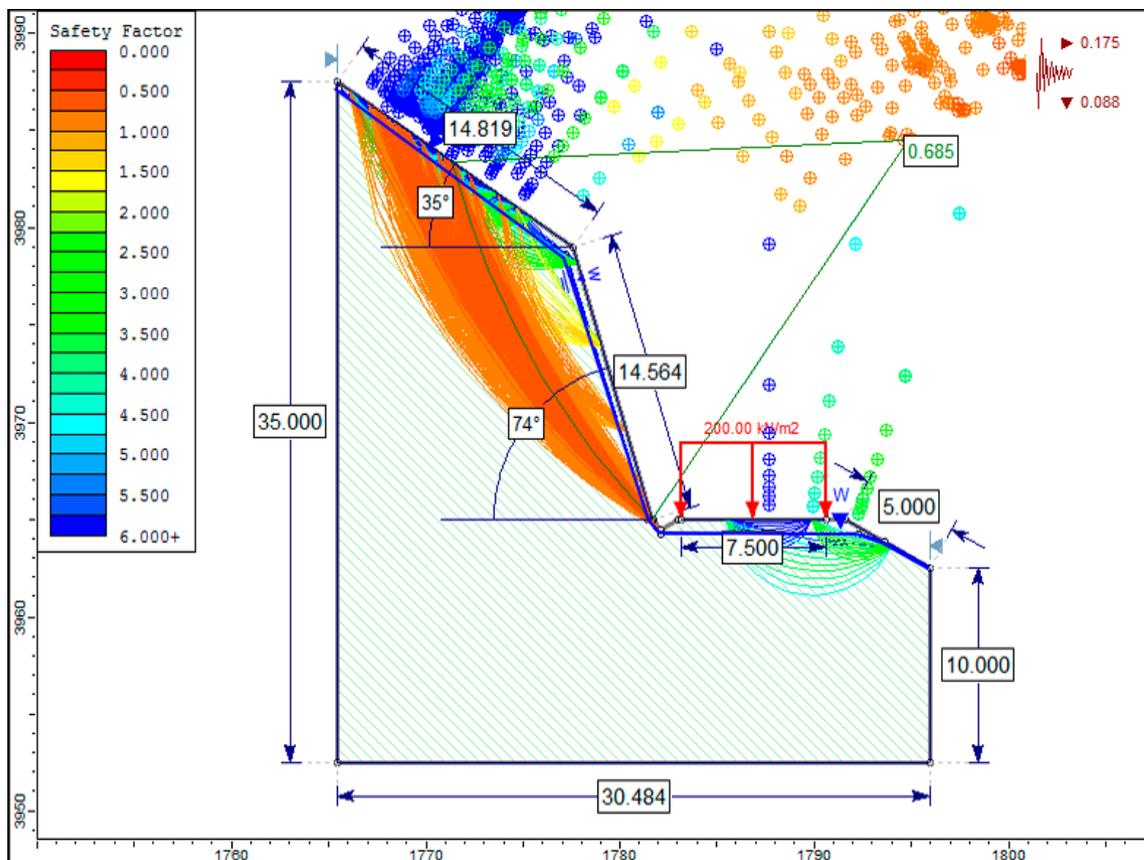


Figura 59: Análisis Slide en condiciones de saturación total y sismicidad.

### 3.9.5 Talud Crítico N° 05:

La información correspondiente al Talud Crítico N° 05, su respectiva fotografía, y los valores del RMR se encuentran en la Tabla 31, 32 y 33 respectivamente.

Tabla 31: Coordenadas y descripción de la Talud Crítico N° 05.

DATUM	ZONA	COORDENADAS		COTA
		ESTE	NORTE	
WGS - 84	17 S	740843	9281248	1873
DESCRIPCIÓN				

El talud se ubica dentro de la Formación Pariatambo (Ki - Pa), que litológicamente corresponde a calizas gris oscuras, bituminosas, dispuestas en estratos delgados y uniformes con espesores que varían de 10 cm a 50 cm. El talud tiene una altura aproximada de 15 m con un ángulo de inclinación de 68°. La cresta sigue la morfología natural del terreno sin ningún cambio de rumbo con respecto al talud. Se encuentra en la parte SW de la carretera entre las progresivas Km 128+195 - Km 128+235. Se evidencia una meteorización moderada con tonalidades gris amarillentas y un grado de fracturamiento medio con bloques irregulares, presentando tres familias de discontinuidades. De acuerdo al análisis cinemático, se presentan dos discontinuidades favorables para la formación de bloques en cuña. Al ser afectadas por la precipitación y sismicidad, inestabilizan y erosionan el macizo rocoso, generando desprendimientos constantes de bloques.



Foto 20: Afloramiento de calizas bituminosas en estratificación delgada de la Formación Pariatambo (Ki - Pa), en las progresivas Km 128+195 - Km 128+235.

Tabla 32: Parámetros del Macizo Rocoso, orientación de las familias y geometría del Talud Crítico N°5.

MACIZO ROCOSO				ORIENTACIÓN		
LITOLÓGIA / FORMACIÓN	METEORIZACIÓN	GRADO DE FRACTURAMIENTO	GSI	TIPO	D	DD
Caliza, Chulec	1=Fresco	1=Alto	1= Bloq. regular	ESTRATO	52°	205°
				FAMILIA 1	58°	4°
	2=Leve	2=Medio	2=Bloq. Irregular	FAMILIA 2	64°	82°
				GEOMETRÍA DEL TALUD		
	3=Moderado	3=Bajo	3=Bloq. y Capas	ALTURA	15 m	
				PIE	14 m	
	4=Alto			DIRECCIÓN	TALUD	CABEZA
				D	68°	40°
	3	2	2	DD	45°	70°

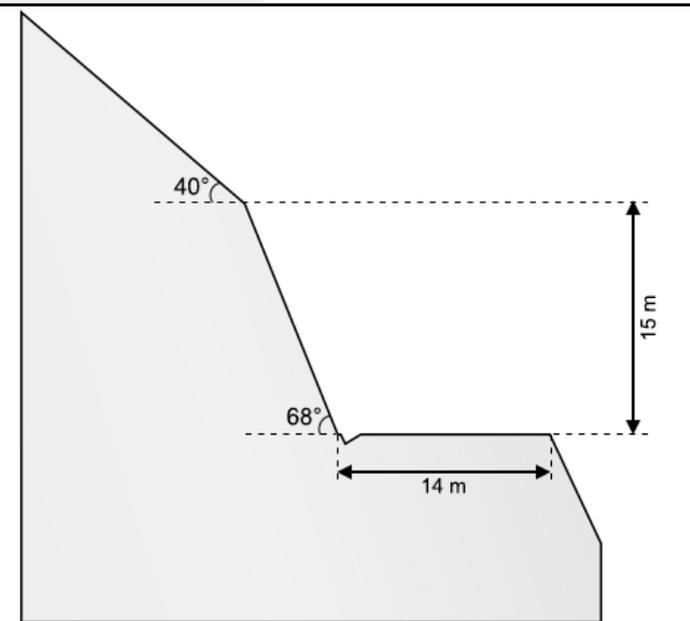


Foto 21: Perfil del Talud Crítico N°5 en las progresivas Km 128+195 - Km 128+235.

Tabla 33: Asignación de Valores para el Macizo Rocoso, Talud crítico N° 05.

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)	0
	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)	0
	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>48</b>	

La estimación del GSI se realizó mediante la matriz publicada por Hoek, Carter, & Diederichs (2013), como se muestra en la Tabla 5, la cual presenta algunas modificaciones menores al gráfico del GSI publicado por Hoek y Marinos (2000). Presenta dos escalas lineales simples, **JCond<sub>89</sub>** (condiciones de superficie de las discontinuidades) y **RQD**. La medición o estimación en campo es muy simple y posiblemente otorga el mayor grado de consistencia. Lo que es más importante, la relación entre los valores GSI calculados y mapeados son razonablemente cercanas a la relación ideal de 1:1 para un ajuste perfecto y obtener propiedades de entrada para modelos numéricos. La estimación del GSI para la Talud Crítico N° 5 se muestra en la Tabla 34.

Tabla 34: Estimación del GSI en términos del RQD y la Condición de las Juntas

ESTIMACIÓN DEL GSI					
CÁLCULO DEL RQD					
$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$	ND	L(m)	$\lambda$	RQD	
		49	4	12	65.4
CLASIFICACIÓN DE CONDICIONES DE DISCONTINUIDADES, BIENIAWSKI (1989)					
LONGITUD DE LA DISCONTINUIDAD	ABERTURA	RUGOSIDAD	RELLENO	ALTERACIÓN	VALORACIÓN JCOND <sub>89</sub>
< 1m (6)	Cerrada (6)	Muy Rugosa (6)	Ninguno (6)	Sana (6)	
1 -3 m (4)	< 0.01 mm (5)	Rugosa (5)	Duro < 5mm (4)	Lig. Alt (5)	
3 - 10 m (2)	0.1 - 1.0 mm (4)	Lig. Rugosa (3)	Duro > 5mm (2)	Mod. Alt (3)	
10 - 20 m (1)	1 - 5 mm (1)	Lisa (1)	Suave < 5mm (1)	Muy Alt (1)	
> 20 m (0)	> 5 mm (0)	Suave (0)	Suave > 5mm (0)	Descompuesta (0)	
2	0	3	0	3	8
$GSI = 1.5JCOND_{89} + RQD/2$				<b>GSI = 44.68</b>	

La determinación de las propiedades geomecánicas del Talud Crítico 05 se realizó mediante el software RocData v.4.0, y se muestra en la Figura 60. El análisis cinemático con el software Dips v.6.0, se presenta en las Figuras 61 - 62. El análisis de estabilidad de los taludes con las seis condiciones, se realizó con el software Slide v.6.0, y se muestran en las Figuras 63 - 68.

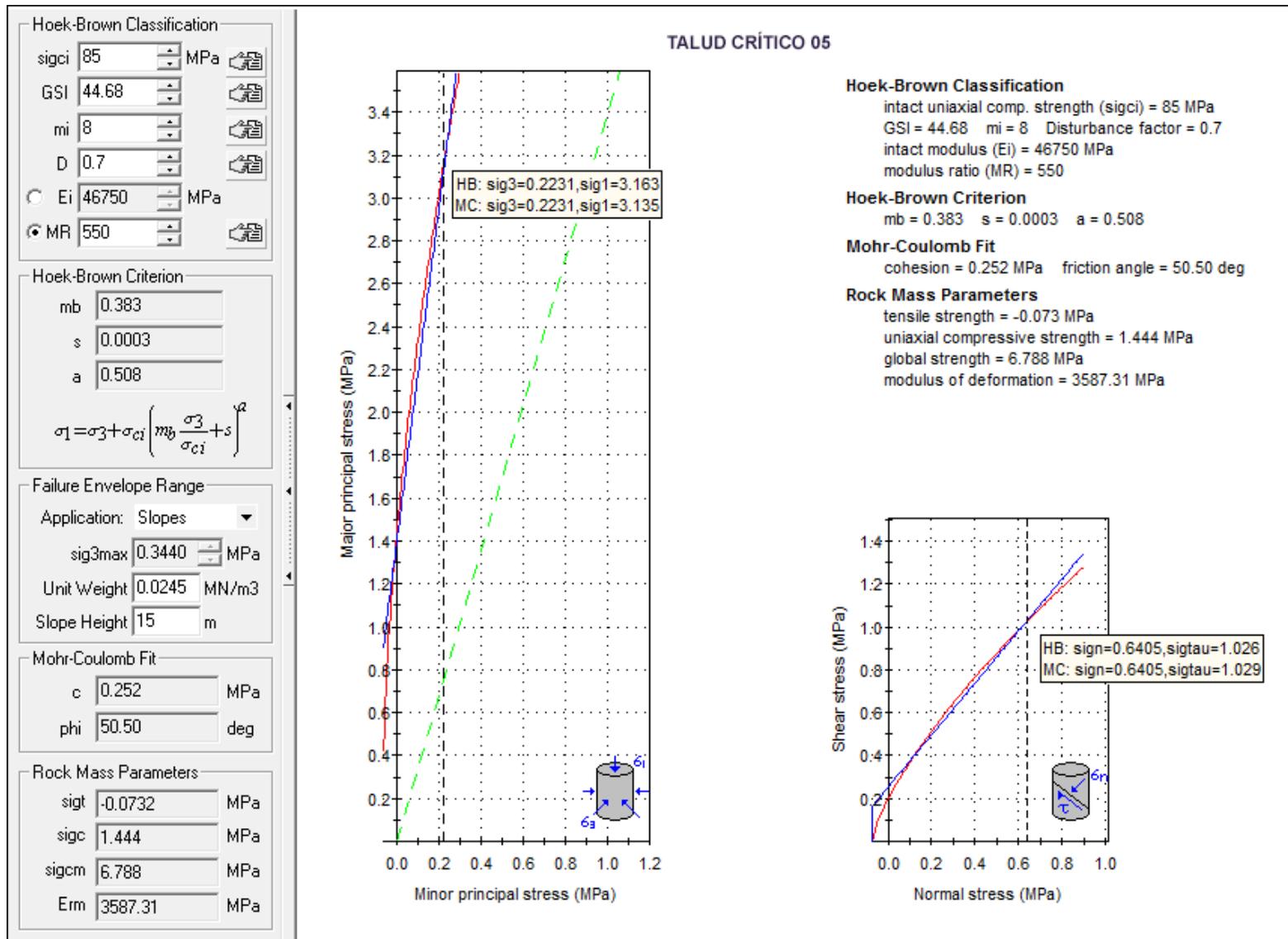


Figura 60: Análisis de las Propiedades Geomecánicas en el software RocData v.4 correspondiente al Talud Crítico 05.

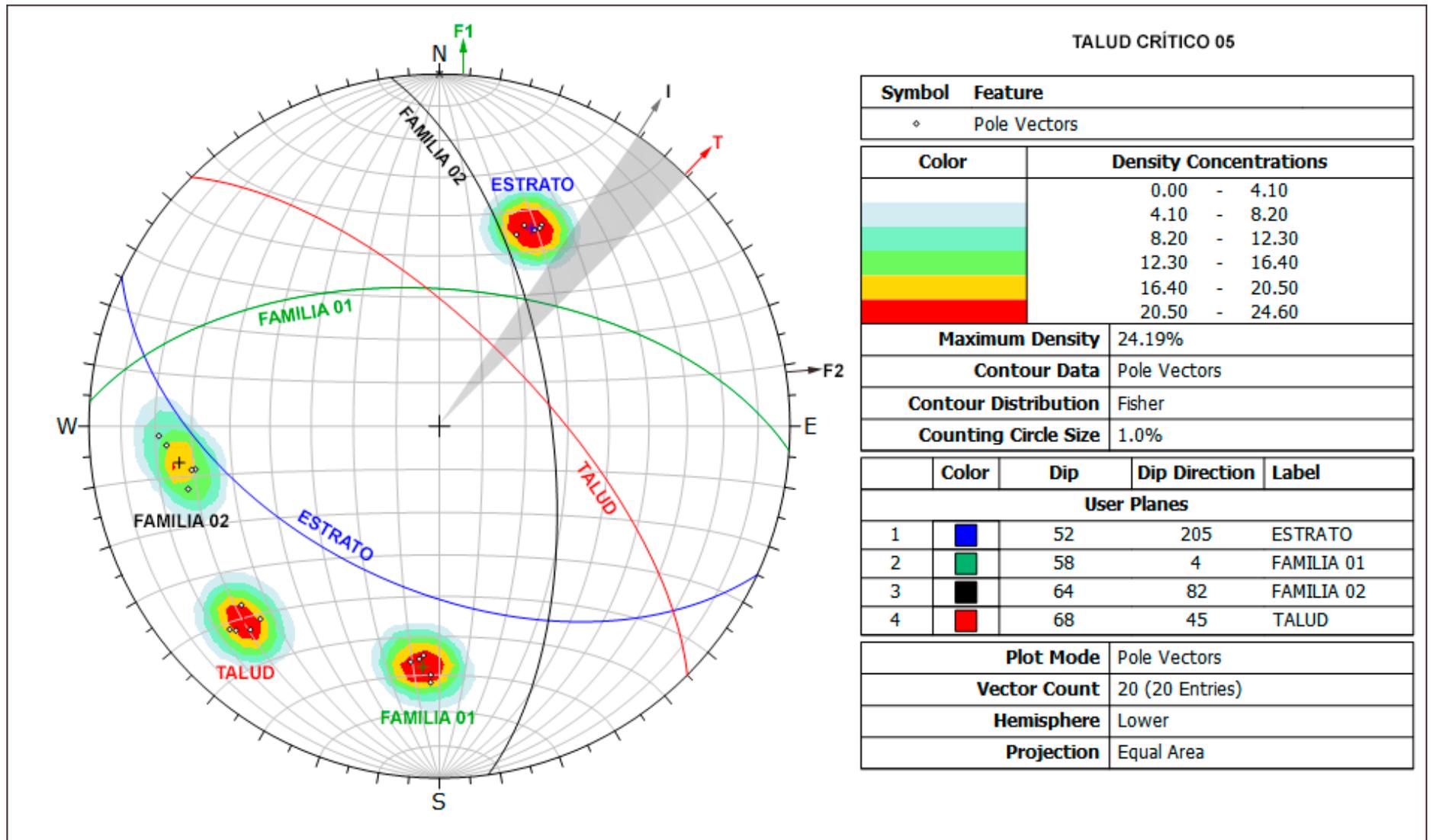


Figura 61: Análisis Cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indica rotura en cuña directa.

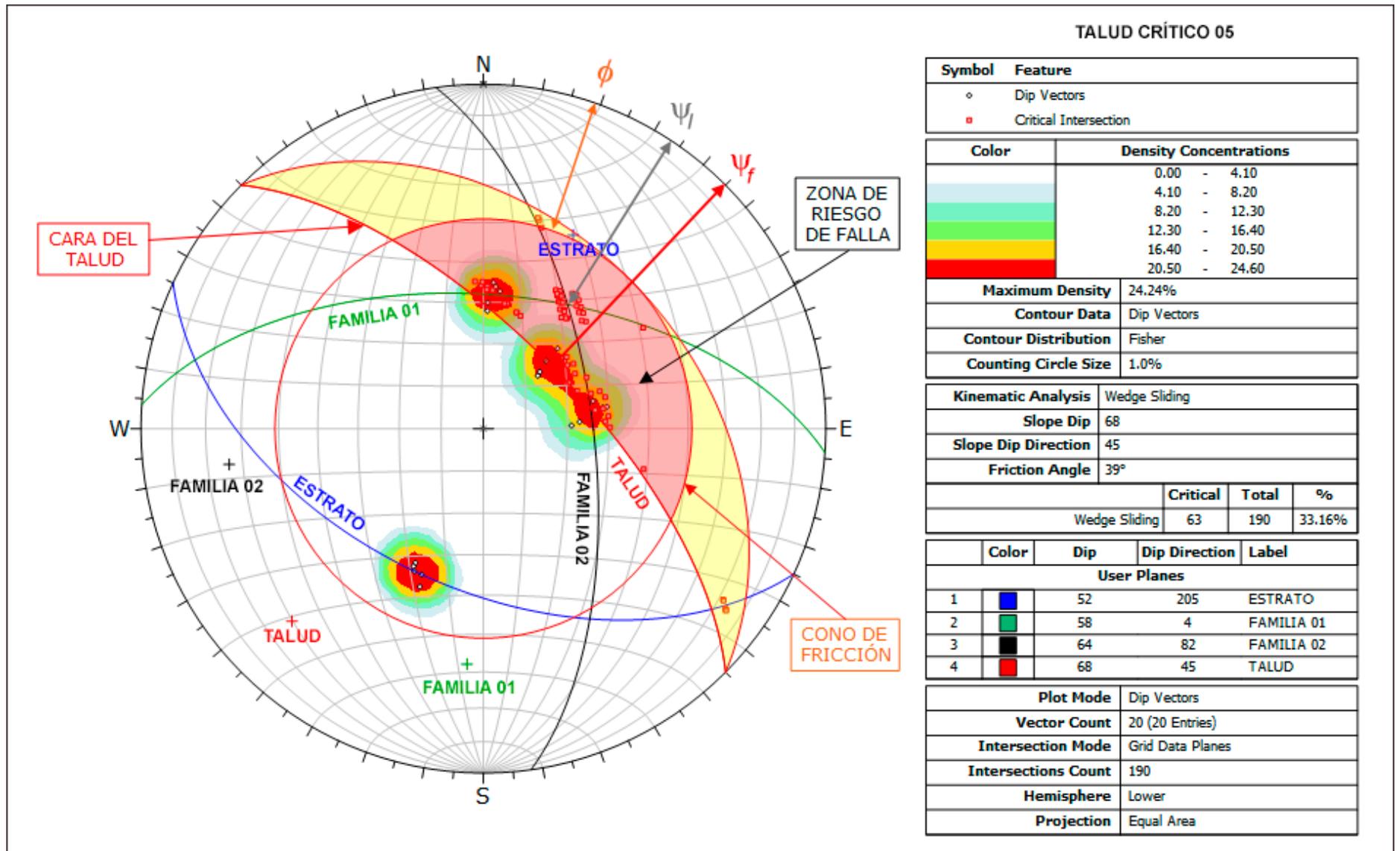


Figura 62: Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de deslizamiento en cuña.

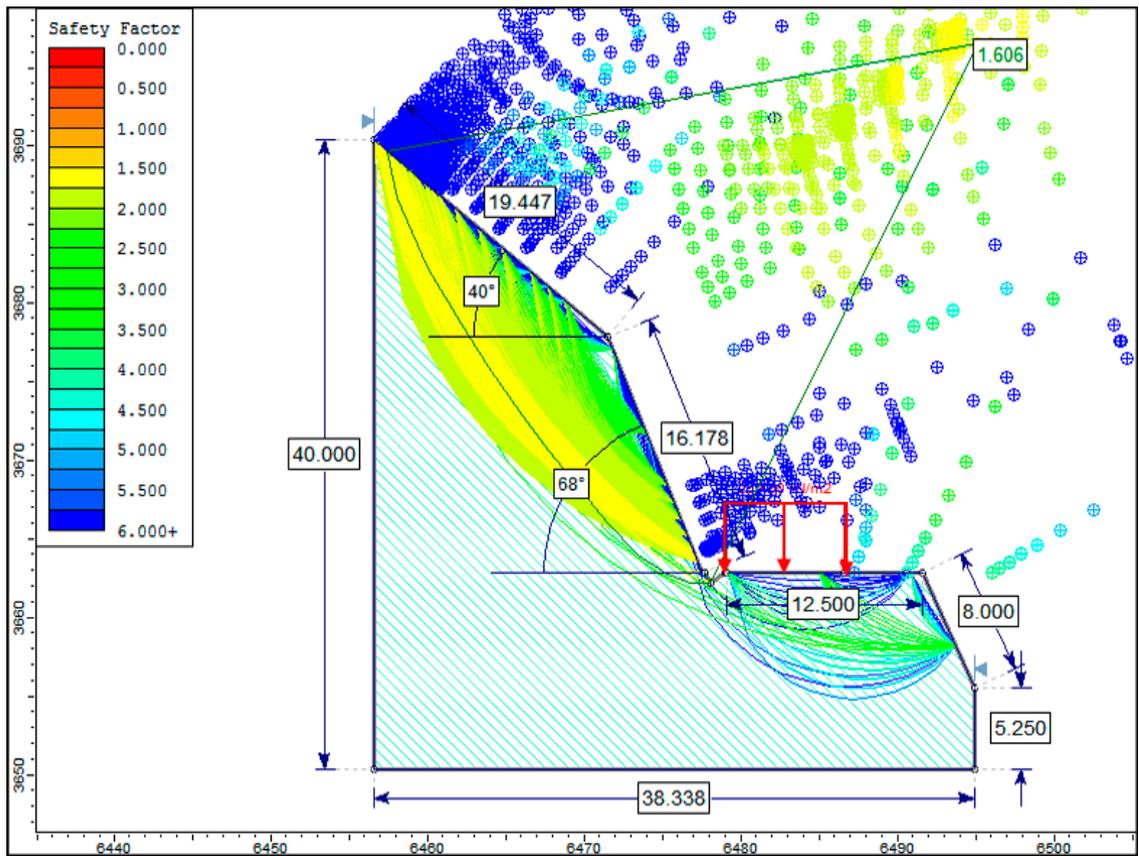


Figura 63: Análisis Slide en condiciones naturales.

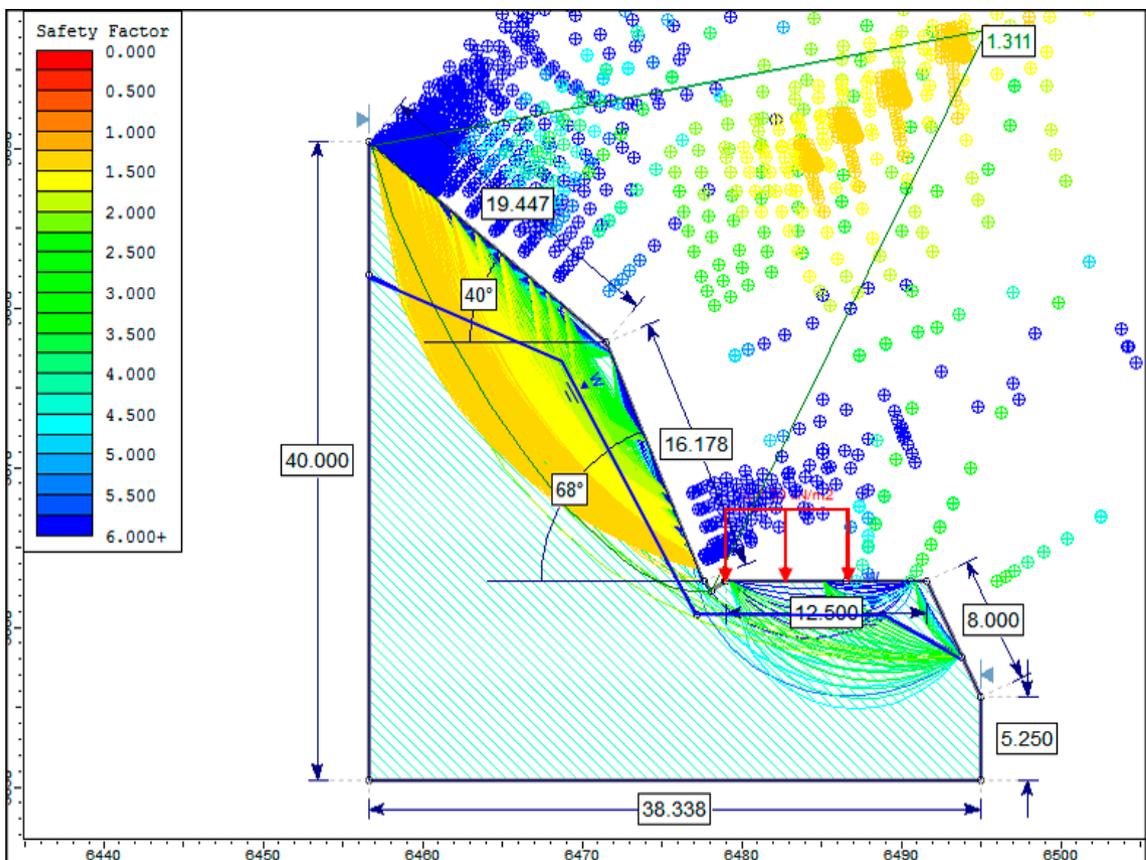


Figura 64: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial.

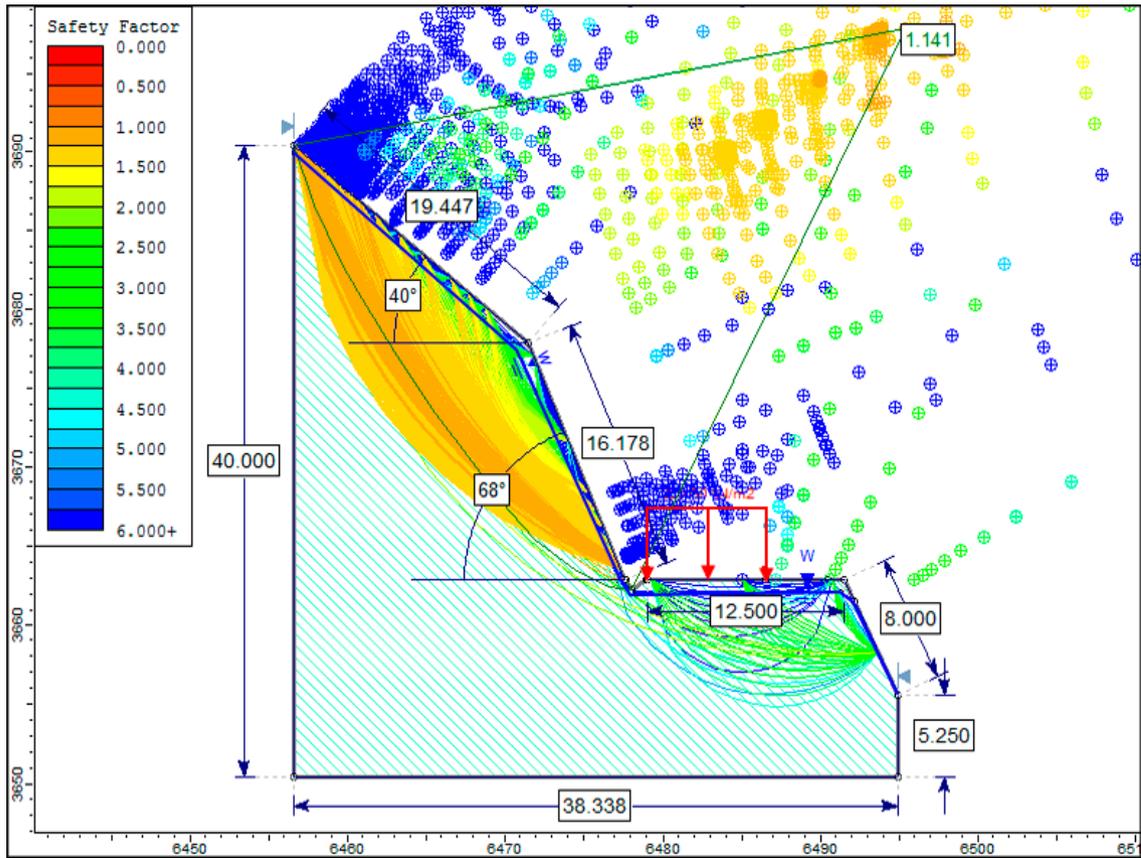


Figura 65: Análisis Slide en condiciones de saturación total.

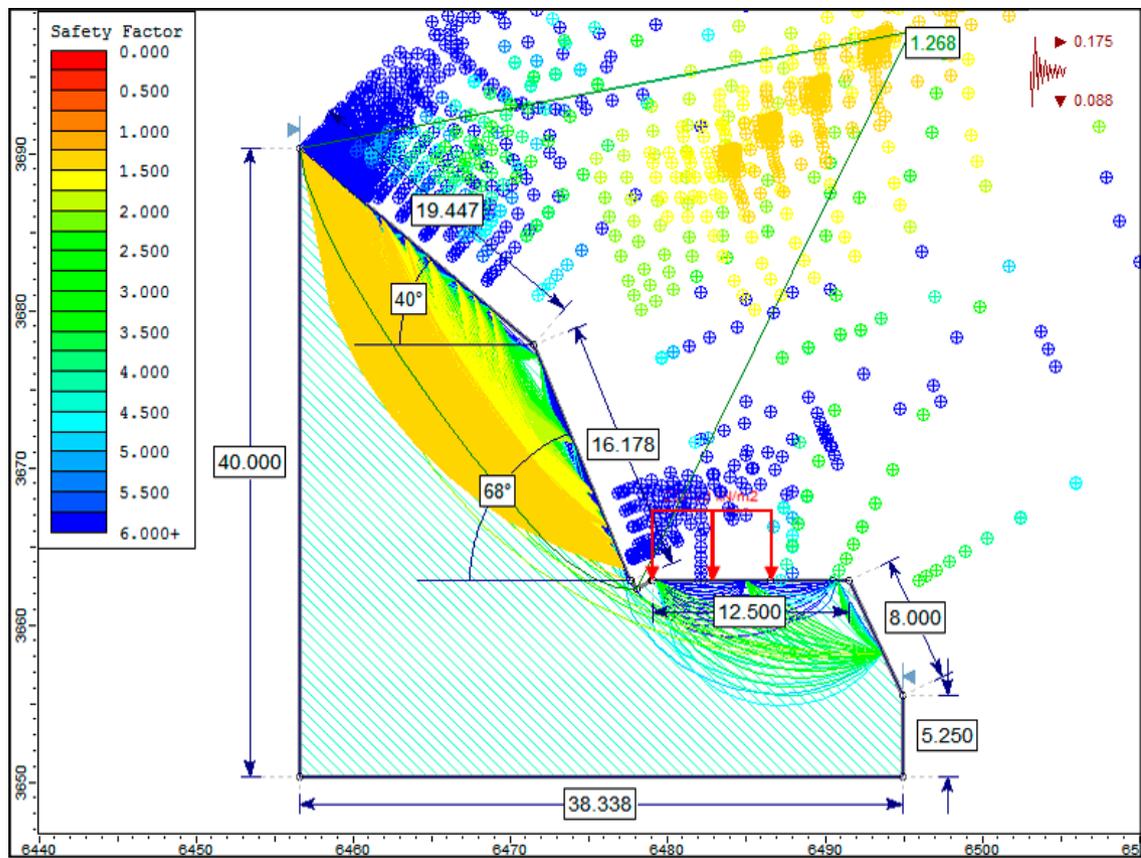


Figura 66: Análisis Slide en condiciones de sismicidad.

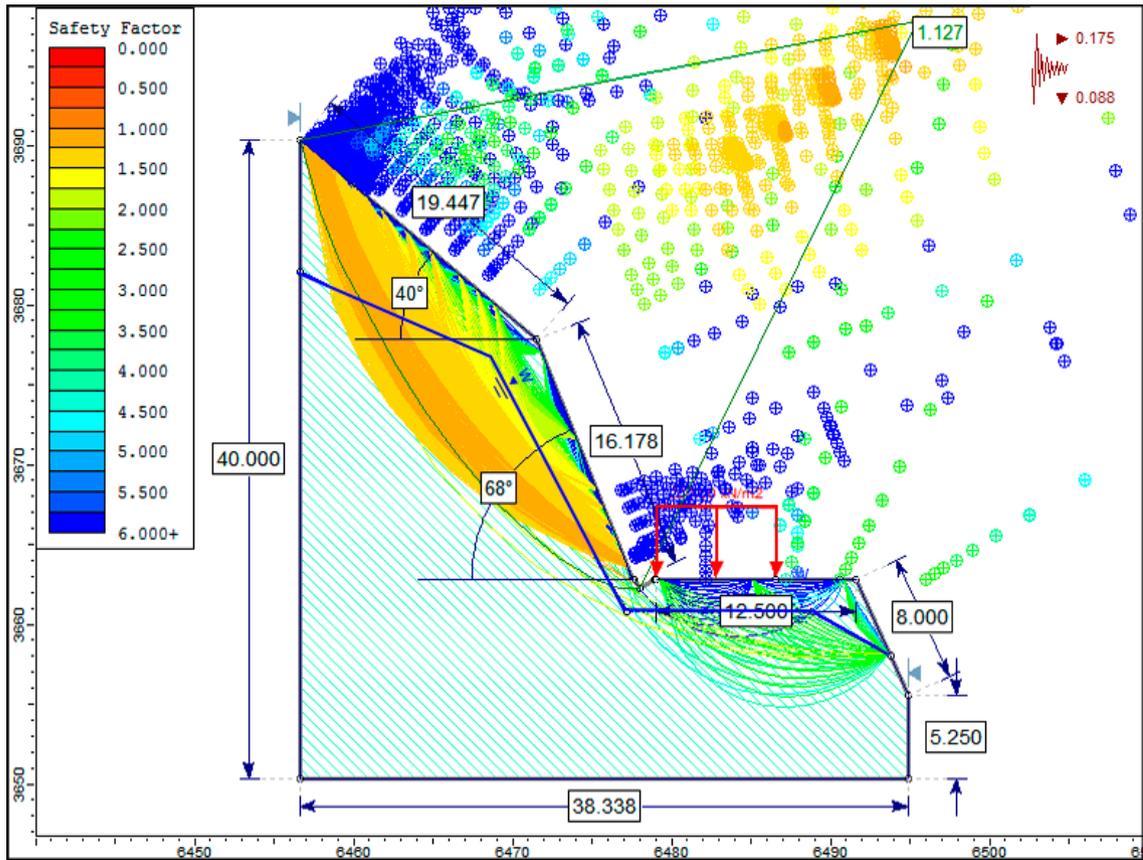


Figura 67: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad.

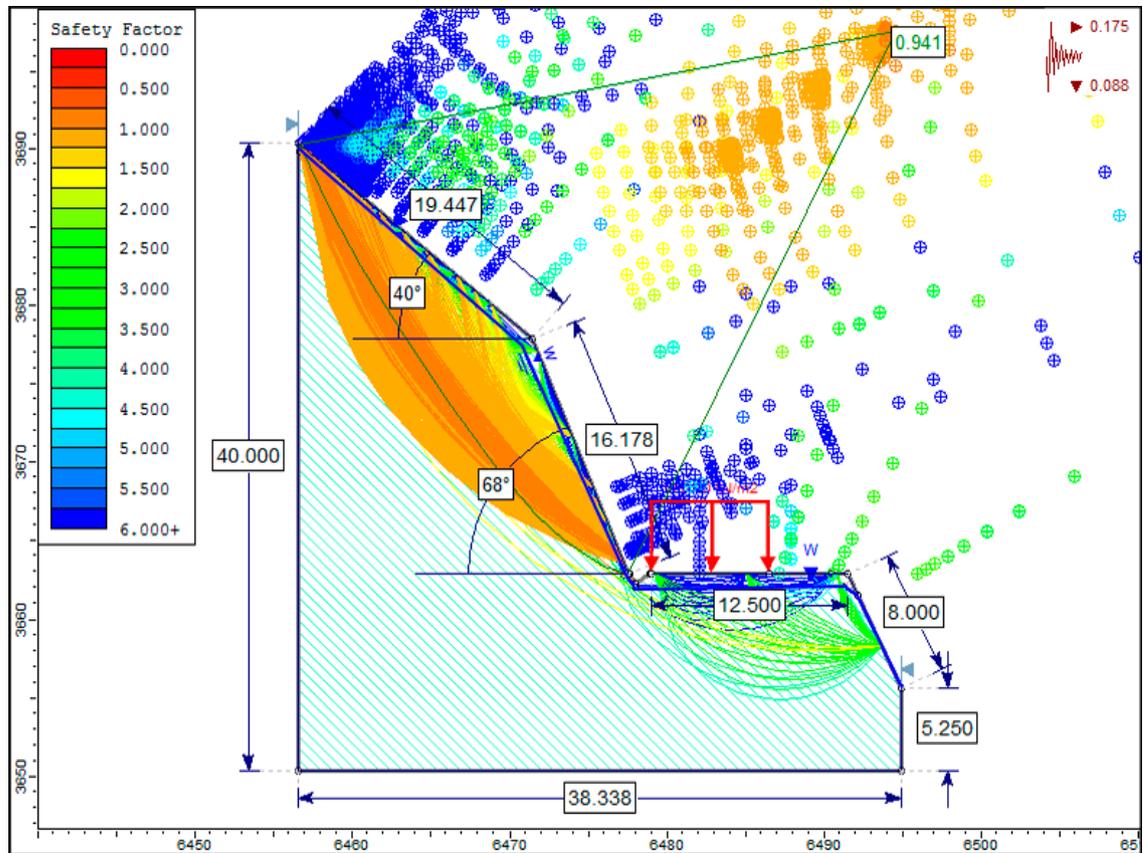


Figura 68: Análisis Slide en condiciones de saturación total y sismicidad.

### 3.9.6 Talud Crítico N° 06:

La información correspondiente al Talud Crítico N° 06, su respectiva fotografía, y los valores del RMR se encuentran en la Tabla 35, 36 y 37 respectivamente.

Tabla 35: Coordenadas y descripción de la Talud Crítico N° 06.

DATUM	ZONA	COORDENADAS		COTA
		ESTE	NORTE	
WGS - 84	17 S	739348	9281436	1834
DESCRIPCIÓN				

El talud se ubica en la parte SW de la carretera entre las progresivas Km 126+582 - Km 126+632, caracterizada por estratos irregulares de calizas grisáceas, con espesores que varían de 50 cm a 1.20 m, perteneciente al Grupo Pulluicana (Ks - P). La altura del talud es de aproximadamente 18 m con un ángulo de inclinación casi vertical de 84°. La cresta sigue la morfología natural del terreno sin ningún cambio de rumbo con respecto al talud. Se evidencia una meteorización moderada con una tonalidad gris oscura y un grado de fracturamiento medio con bloques irregulares, presentando tres familias de discontinuidades. De acuerdo al análisis cinemático, los mecanismos potenciales de rotura son de tipo cuña y planar; además, se evidencia una baja probabilidad de mecanismo en vuelco. Al ser afectadas por la precipitación y sismicidad, inestabilizan y erosionan el macizo rocoso, generando deslizamientos y desprendimientos constantes de bloques.



Foto 22: Afloramiento de calizas grisáceas en estratificación irregular del Grupo Pulluicana (Ks - P), en las progresivas Km 126+582 - Km 126+632.

Tabla 36: Parámetros del Macizo Rocos, orientación de las familias y geometría del Talud Crítico N°6.

MACIZO ROCOSO				ORIENTACIÓN		
LITOLOGÍA / FORMACIÓN	METEORIZACIÓN	GRADO DE FRACTURAMIENTO	GSI	TIPO	D	DD
Caliza, Chulec	1=Fresco	1=Alto	1= Bloq. regular	ESTRATO	62°	33°
				FAMILIA 1	68°	192°
	2=Leve	2=Medio	2=Bloq. Irregular	FAMILIA 2	76°	264°
				GEOMETRÍA DEL TALUD		
	3=Moderado	3=Bajo	3=Bloq. y Capas	ALTURA	18 m	
				PIE	12 m	
	4=Alto			DIRECCIÓN	TALUD	CABEZA
				D	84°	30°
	3	2	2	DD	26°	26°

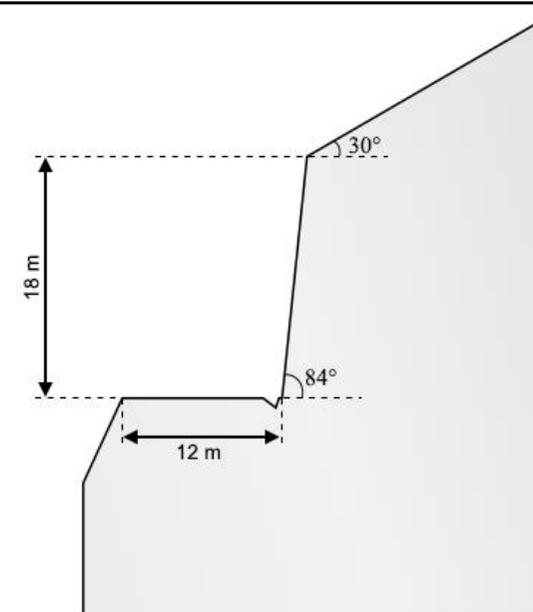


Foto 23: Perfil del Talud Crítico N°6 en las progresivas Km 126+582 - Km 126+632.

Tabla 37: Asignación de Valores para el Macizo Rocoso, Talud crítico N° 06.

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)	15	
Condición de las Juntas	Persistencia	< 1m (6)	1 – 3 m (4)	3 – 10 m (2)	10 – 20 m (1)	> 20 m (0)	4
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.01 mm (5)	0.1 – 1.0 mm (4)	1 – 5 mm (1)	> 5mm (0)	0
	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)	1
	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)	7	
<b>VALOR TOTAL RMR</b>						<b>53</b>	

La estimación del GSI se realizó mediante la matriz publicada por Hoek, Carter, & Diederichs (2013), como se muestra en la Tabla 5, la cual presenta algunas modificaciones menores al gráfico del GSI publicado por Hoek y Marinos (2000). Presenta dos escalas lineales simples, **JCond<sub>89</sub>** (condiciones de superficie de las discontinuidades) y **RQD**. La medición o estimación en campo es muy simple y posiblemente otorga el mayor grado de consistencia. Lo que es más importante, la relación entre los valores GSI calculados y mapeados son razonablemente cercanas a la relación ideal de 1:1 para un ajuste perfecto y obtener propiedades de entrada para modelos numéricos. La estimación del GSI para la Talud Crítico N° 6 se muestra en la Tabla 38.

Tabla 38: Estimación del GSI en términos del RQD y la Condición de las Juntas

ESTIMACIÓN DEL GSI					
CÁLCULO DEL RQD					
$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$	ND	L(m)	$\lambda$	RQD	
	51	4	13	63.6	
CLASIFICACIÓN DE CONDICIONES DE DISCONTINUIDADES, BIENIAWSKI (1989)					
LONGITUD DE LA DISCONTINUIDAD	ABERTURA	RUGOSIDAD	RELLENO	ALTERACIÓN	VALORACIÓN JCOND <sub>89</sub>
< 1m (6)	Cerrada (6)	Muy Rugosa (6)	Ninguno (6)	Sana (6)	
1 -3 m (4)	< 0.01 mm (5)	Rugosa (5)	Duro < 5mm (4)	Lig. Alt (5)	
3 - 10 m (2)	0.1 - 1.0 mm (4)	Lig. Rugosa (3)	Duro > 5mm (2)	Mod. Alt (3)	
10 - 20 m (1)	1 - 5 mm (1)	Lisa (1)	Suave < 5mm (1)	Muy Alt (1)	
> 20 m (0)	> 5 mm (0)	Suave (0)	Suave > 5mm (0)	Descompuesta (0)	
4	0	3	1	3	11
$GSI = 1.5JCOND_{89} + RQD/2$				<b>GSI = 48.28</b>	

La determinación de las propiedades geomecánicas del Talud Crítico 06 se realizó mediante el software RocData v.4.0, y se muestra en la Figura 69. El análisis cinemático con el software Dips v.6.0, se presenta en las Figuras 70 - 74. El análisis de estabilidad de los taludes con las seis condiciones, se realizó con el software Slide v.6.0, y se muestran en las Figuras 75 - 80.

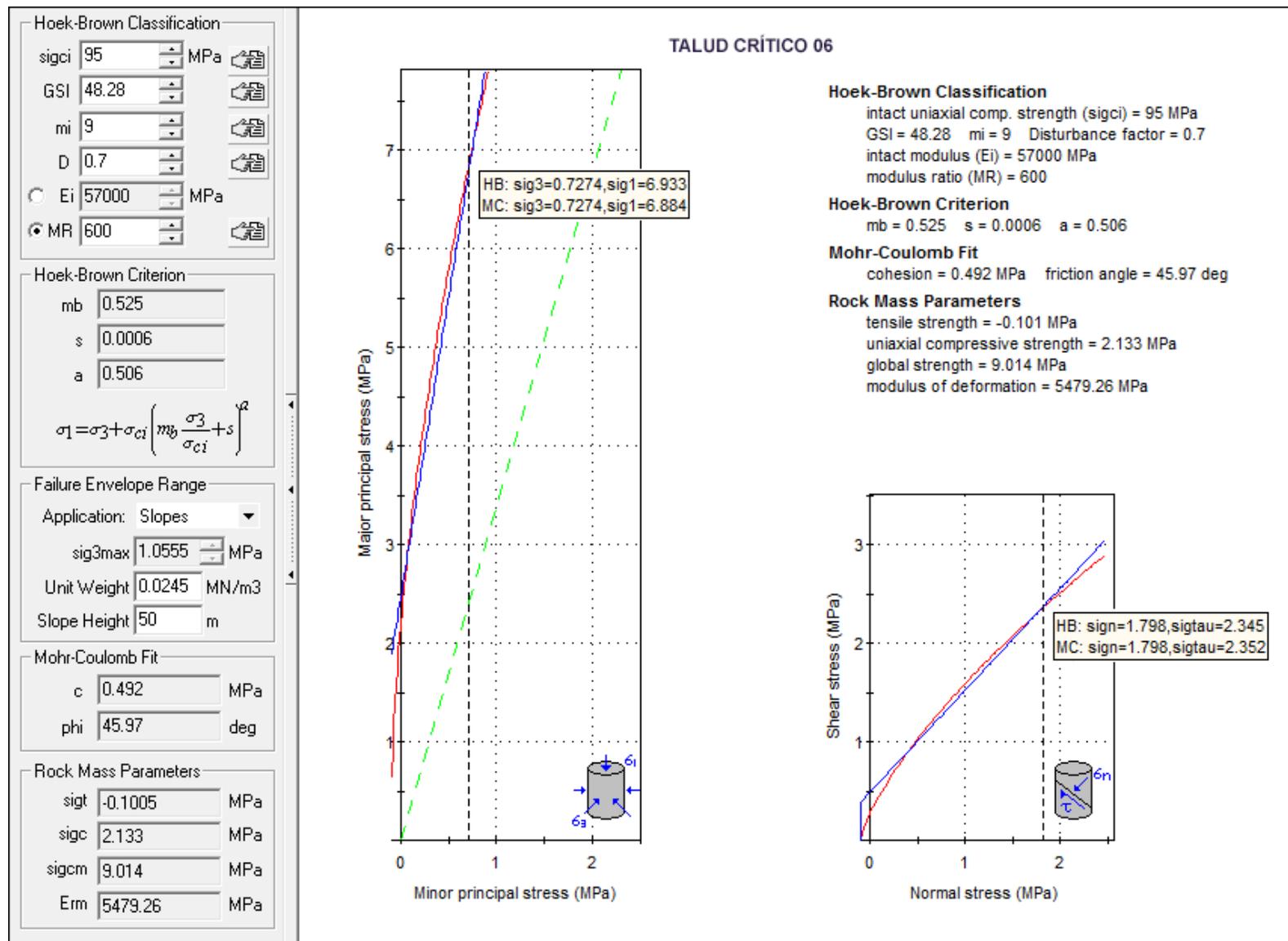


Figura 69: Análisis de las Propiedades Geomecánicas en el software RocData v.4 correspondiente al Talud Crítico 06.

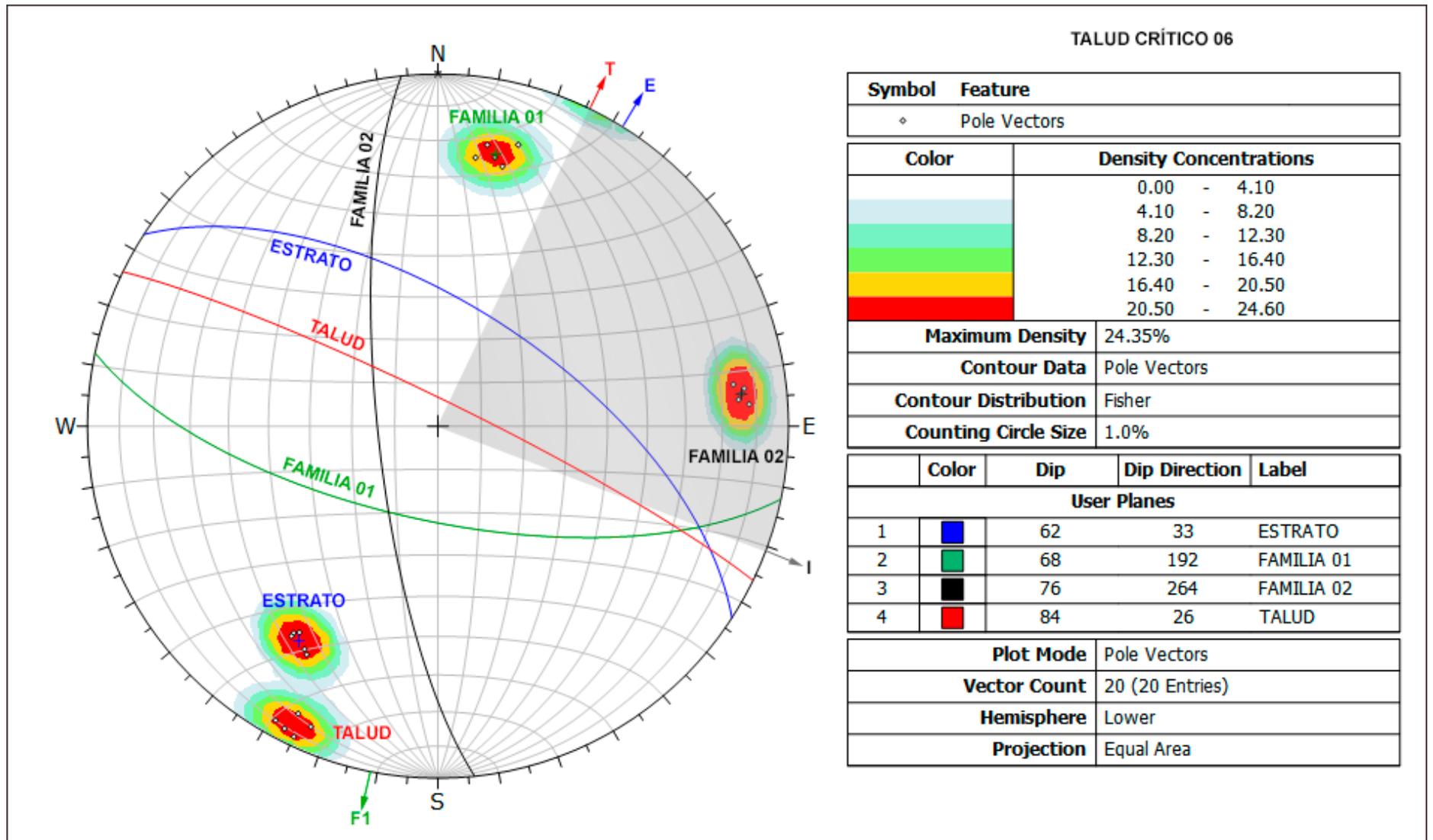


Figura 70: Análisis Cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indica rotura planar.

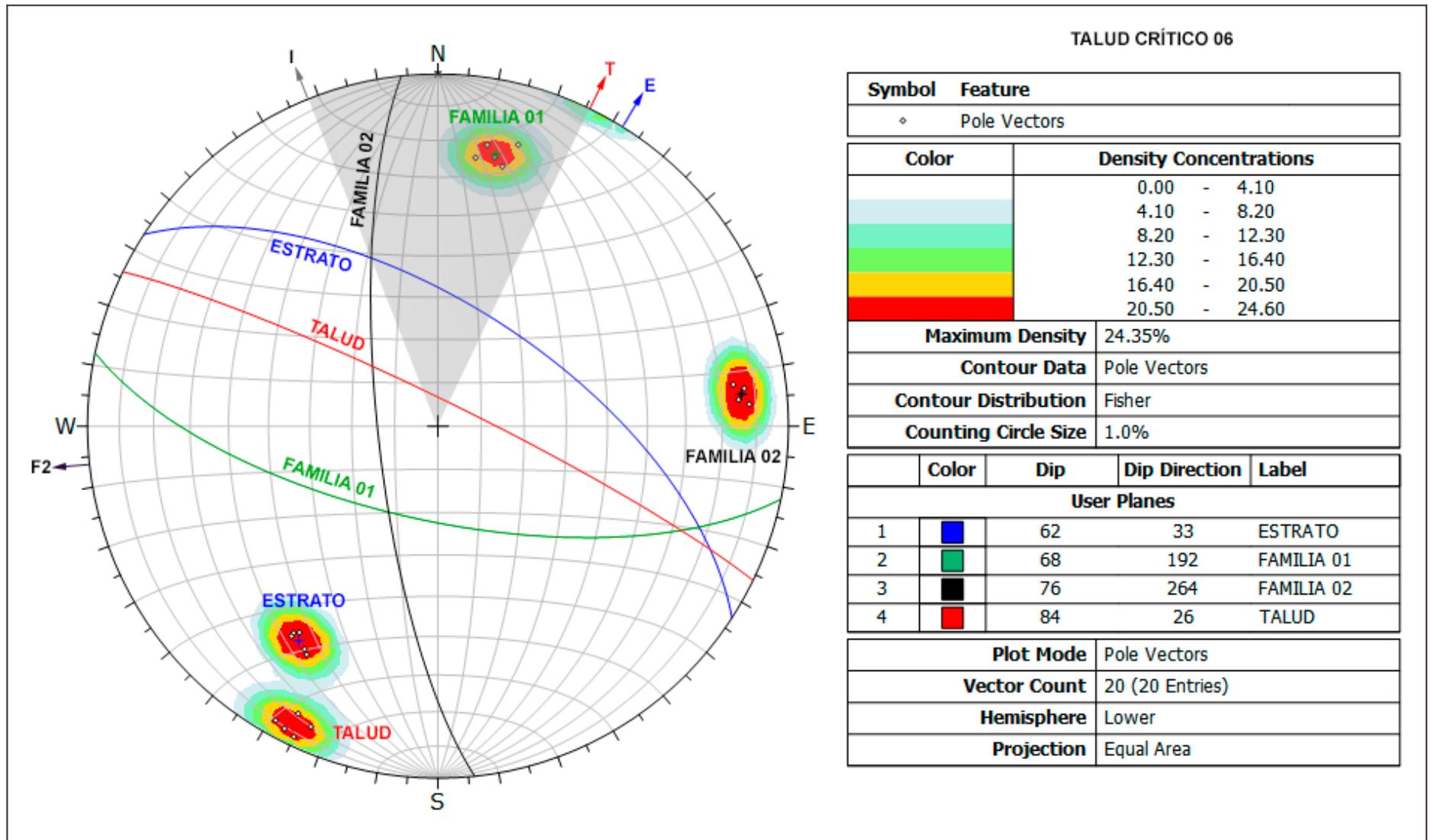


Figura 71: Análisis Cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indica rotura en cuña directa.

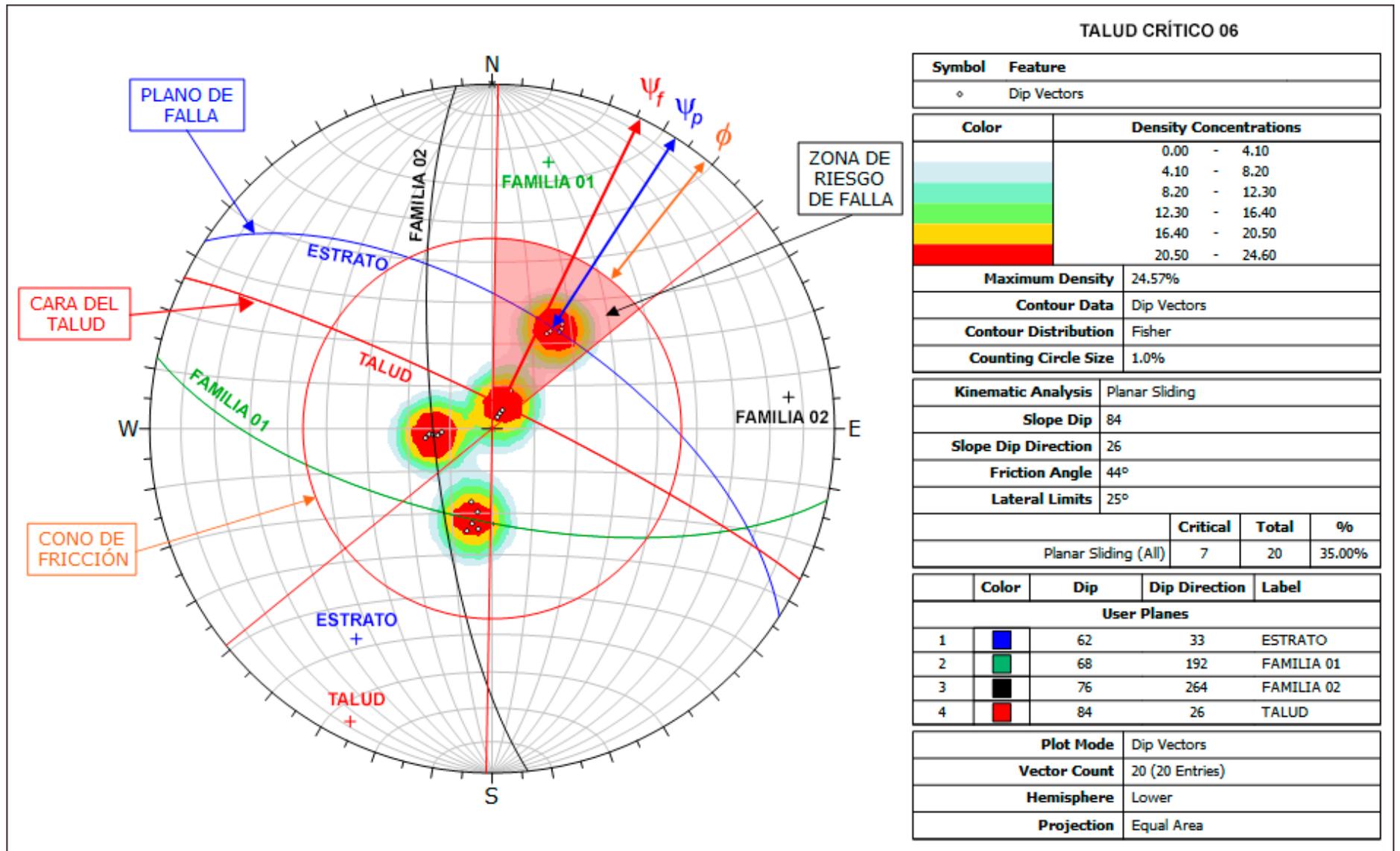


Figura 72: Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de deslizamiento planar.

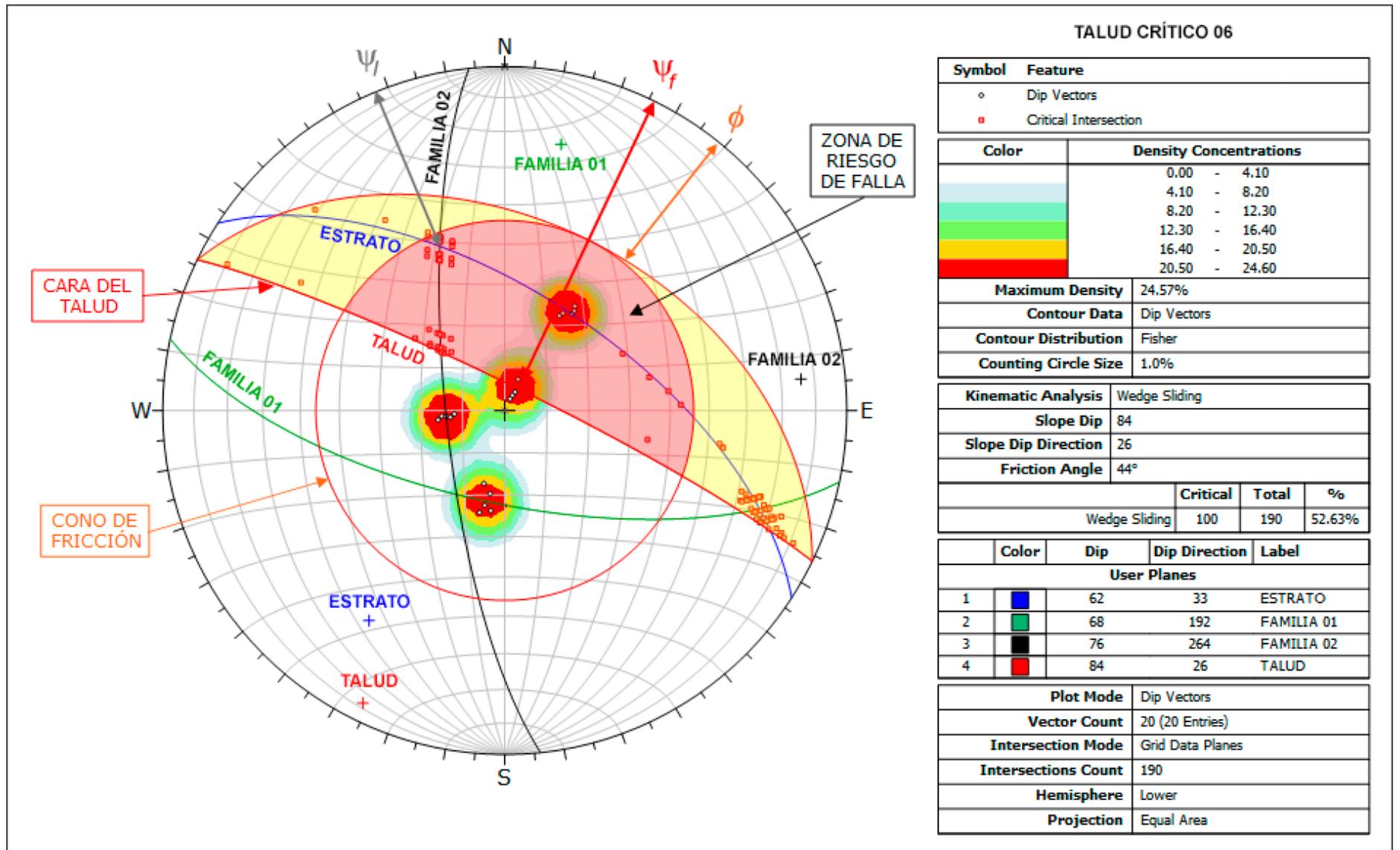


Figura 73: Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de deslizamiento en cuña.

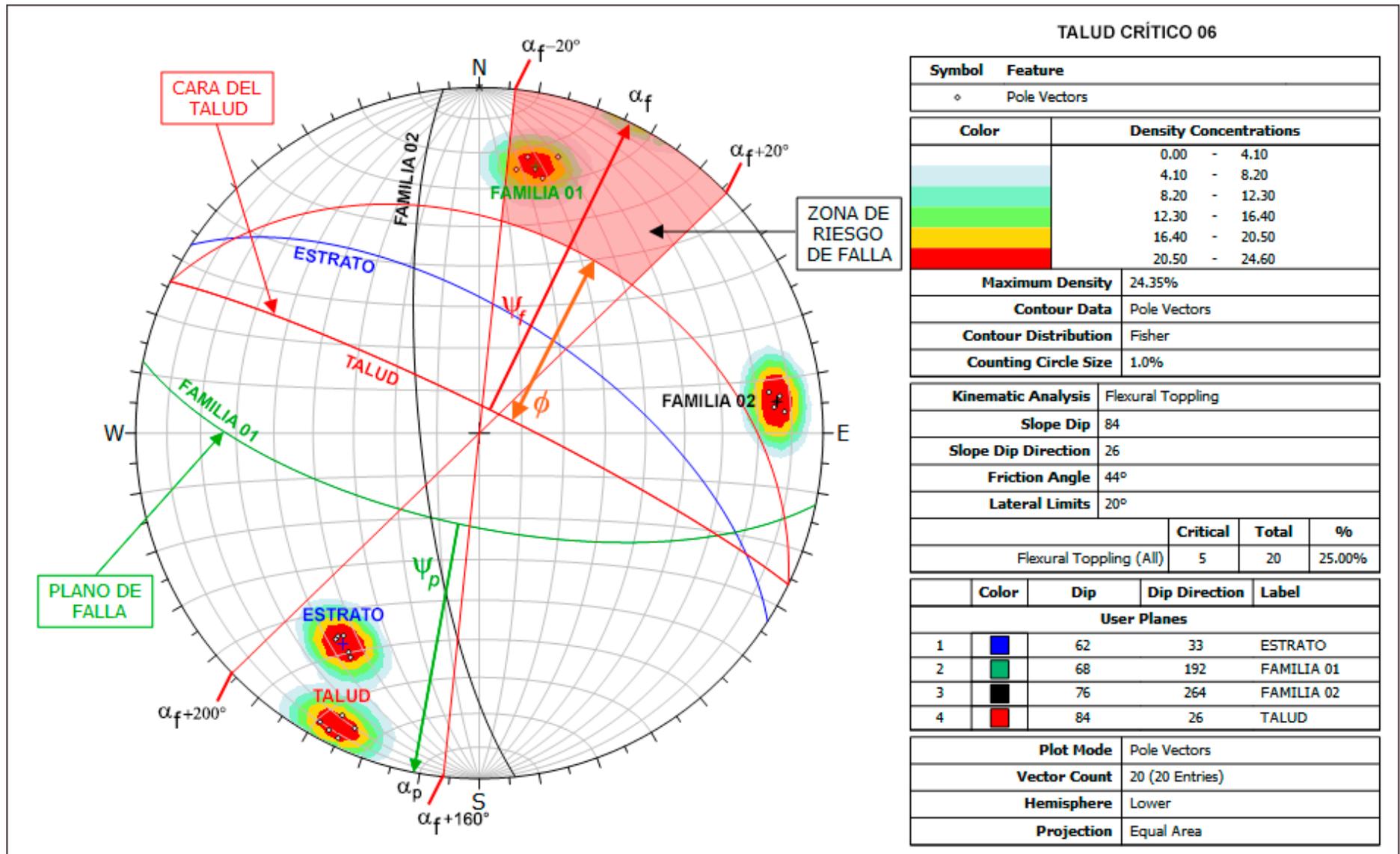


Figura 74: Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de rotura en vuelco.



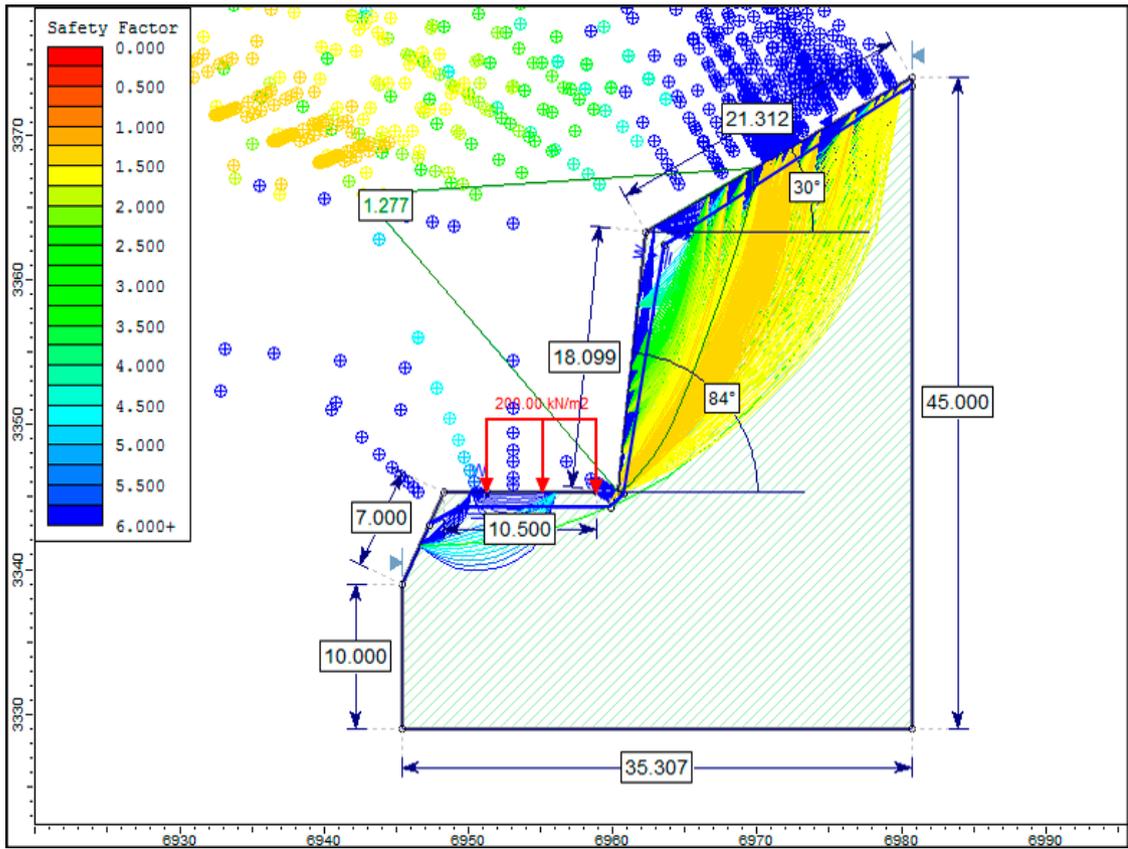


Figura 77: Análisis Slide en condiciones de saturación total.

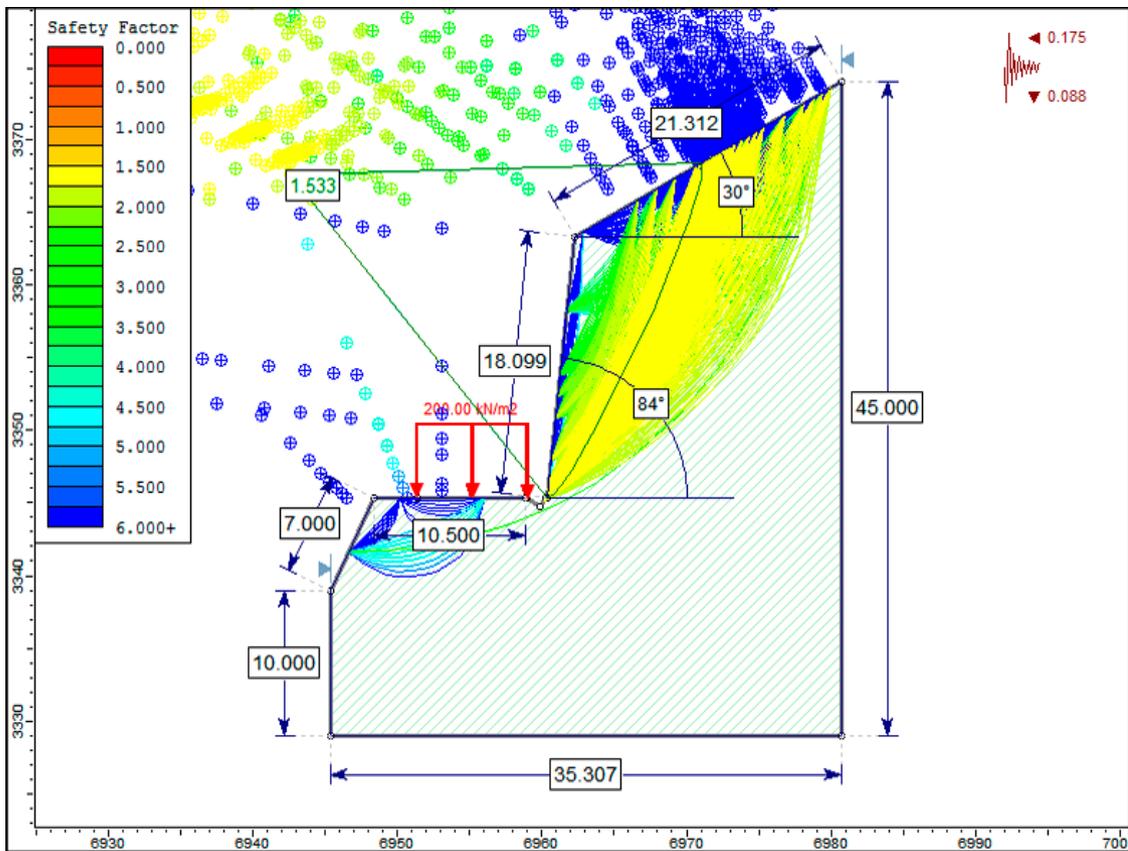


Figura 78: Análisis Slide en condiciones de sismicidad.

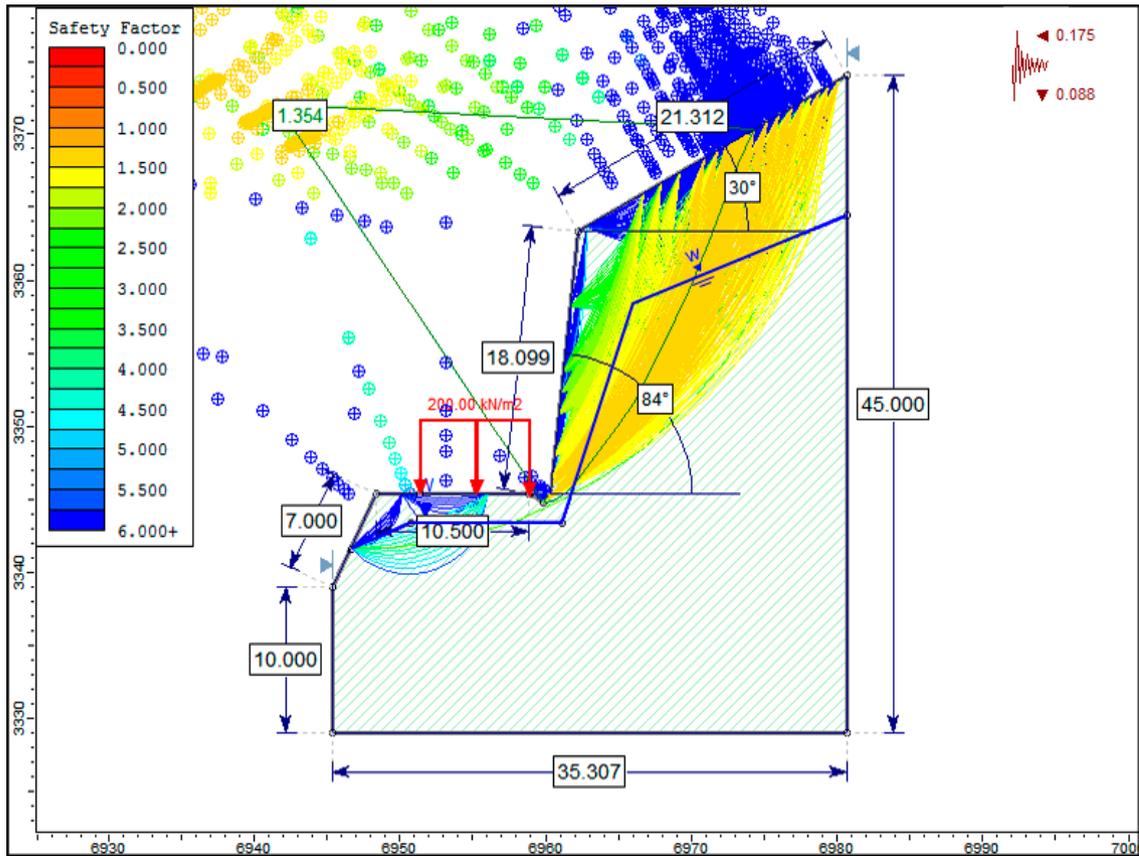


Figura 79: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad.

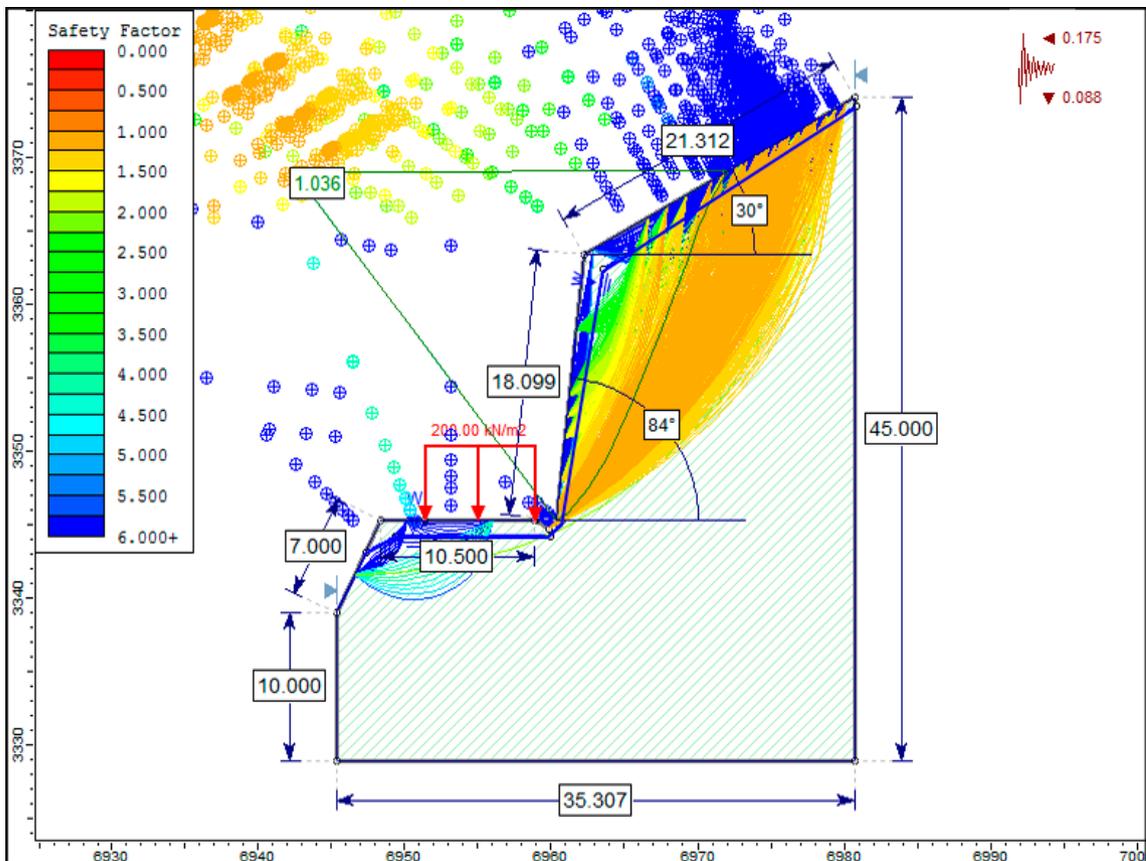


Figura 80: Análisis Slide en condiciones de saturación total y sismicidad.

### 3.9.7 Talud Crítico N° 07:

La información correspondiente al Talud Crítico N° 07, su respectiva fotografía, y los valores del RMR se encuentran en la Tabla 39, 40 y 41 respectivamente.

Tabla 39: Coordenadas y descripción de la Talud Crítico N° 07.

DATUM	ZONA	COORDENADAS		COTA
		ESTE	NORTE	
WGS - 84	17 S	739158	9281632	1812
DESCRIPCIÓN				

El talud se ubica entre las progresivas Km 126+318 - Km 126+358, compuesto litológicamente por areniscas de granulometría fina caracterizada por estratos medianos, con espesores que varían de 40 cm a 80 cm, perteneciente al Grupo Pulluicana (Ks - P). El talud se encuentra en la parte SW de la carretera y tiene una altura aproximada de 12 m con un ángulo de inclinación de 74°. La cresta sigue la morfología natural del terreno sin ningún cambio de rumbo con respecto al talud. Se evidencia una meteorización moderada con una tonalidad gris amarillenta y un grado de fracturamiento medio con bloques irregulares, presentando tres familias de discontinuidades. El análisis cinemático revela la intersección de dos discontinuidades favorables para la formación de bloques en cuña; además, la estratificación tiene una dirección de inclinación hacia la cara del talud, por lo que, los mecanismos de rotura potenciales son de tipo cuña y planar, en ese orden. Al ser afectadas por la precipitación y sismicidad, inestabilizan y erosionan el macizo rocoso, generando deslizamientos y desprendimientos constantes de bloques.



Foto 24: Afloramiento de calizas arenosas de granulometría fina, perteneciente al Grupo Pulluicana (Ks - P), en las progresivas Km 126+318 - Km 126+358.

Tabla 40: Parámetros del Macizo Rocoso, orientación de las familias y geometría del Talud Crítico N°7.

MACIZO ROCOSO				ORIENTACIÓN		
LITOLOGÍA / FORMACIÓN	METEORIZACIÓN	GRADO DE FRACTURAMIENTO	GSI	TIPO	D	DD
Caliza, Chulec	1=Fresco	1=Alto	1= Bloq. regular	ESTRATO	62°	12°
				FAMILIA 1	64°	234°
	2=Leve	2=Medio	2=Bloq. Irregular	FAMILIA 2	72°	105°
				GEOMETRÍA DEL TALUD		
	3=Moderado	3=Bajo	3=Bloq. y Capas	ALTURA	12 m	
				PIE	12 m	
	4=Alto			DIRECCIÓN	TALUD	CABEZA
				D	74°	40°
	3	2	2	DD	22°	22°

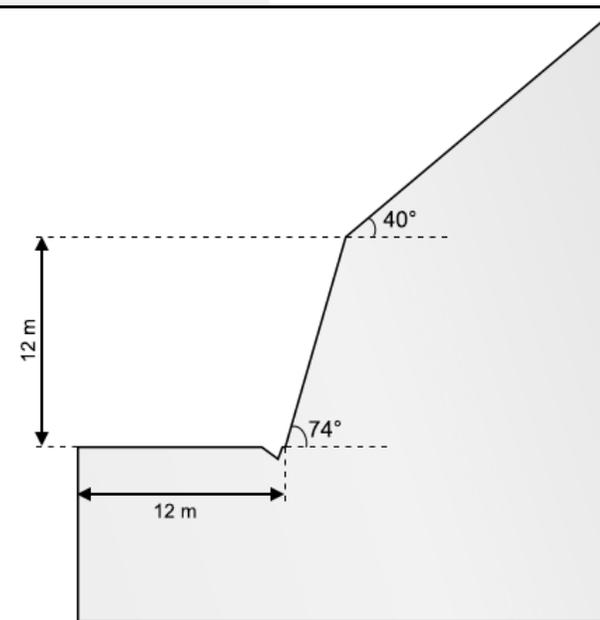


Foto 25: Perfil del Talud Crítico N°7 en las progresivas Km 126+318 - Km 126+358.

Tabla 41: Asignación de Valores para el Macizo Rocoso, Talud crítico N° 07.

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)	15	
Condición de las Juntas	Persistencia	< 1m (6)	1 – 3 m (4)	3 – 10 m (2)	10 – 20 m (1)	> 20 m (0)	1
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.01 mm (5)	0.1 – 1.0 mm (4)	1 – 5 mm (1)	> 5mm (0)	0
	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)	1
	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>53</b>	

La estimación del GSI se realizó mediante la matriz publicada por Hoek, Carter, & Diederichs (2013), como se muestra en la Tabla 5, la cual presenta algunas modificaciones menores al gráfico del GSI publicado por Hoek y Marinos (2000). Presenta dos escalas lineales simples, **JCond<sub>89</sub>** (condiciones de superficie de las discontinuidades) y **RQD**. La medición o estimación en campo es muy simple y posiblemente otorga el mayor grado de consistencia. Lo que es más importante, la relación entre los valores GSI calculados y mapeados son razonablemente cercanas a la relación ideal de 1:1 para un ajuste perfecto y obtener propiedades de entrada para modelos numéricos. La estimación del GSI para la Talud Crítico N° 7 se muestra en la Tabla 42.

Tabla 42: Estimación del GSI en términos del RQD y la Condición de las Juntas

ESTIMACIÓN DEL GSI					
CÁLCULO DEL RQD					
$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$	ND	L(m)	$\lambda$	RQD	
		41	4	10	72.7
CLASIFICACIÓN DE CONDICIONES DE DISCONTINUIDADES, BIENIAWSKI (1989)					
LONGITUD DE LA DISCONTINUIDAD	ABERTURA	RUGOSIDAD	RELLENO	ALTERACIÓN	VALORACIÓN JCOND <sub>89</sub>
< 1m (6)	Cerrada (6)	Muy Rugosa (6)	Ninguno (6)	Sana (6)	
1 -3 m (4)	< 0.01 mm (5)	Rugosa (5)	Duro < 5mm (4)	Lig. Alt (5)	
3 - 10 m (2)	0.1 - 1.0 mm (4)	Lig. Rugosa (3)	Duro > 5mm (2)	Mod. Alt (3)	
10 - 20 m (1)	1 - 5 mm (1)	Lisa (1)	Suave < 5mm (1)	Muy Alt (1)	
> 20 m (0)	> 5 mm (0)	Suave (0)	Suave > 5mm (0)	Descompuesta (0)	
1	0	3	1	3	8
$GSI = 1.5JCOND_{89} + RQD/2$				<b>GSI = 48.33</b>	

La determinación de las propiedades geomecánicas del Talud Crítico 07 se realizó mediante el software RocData v.4.0, y se muestra en la Figura 81. El análisis cinemático con el software Dips v.6.0, se presenta en las Figuras 82 - 85. El análisis de estabilidad de los taludes con las seis condiciones, se realizó con el software Slide v.6.0, y se muestran en las Figuras 86 - 91.

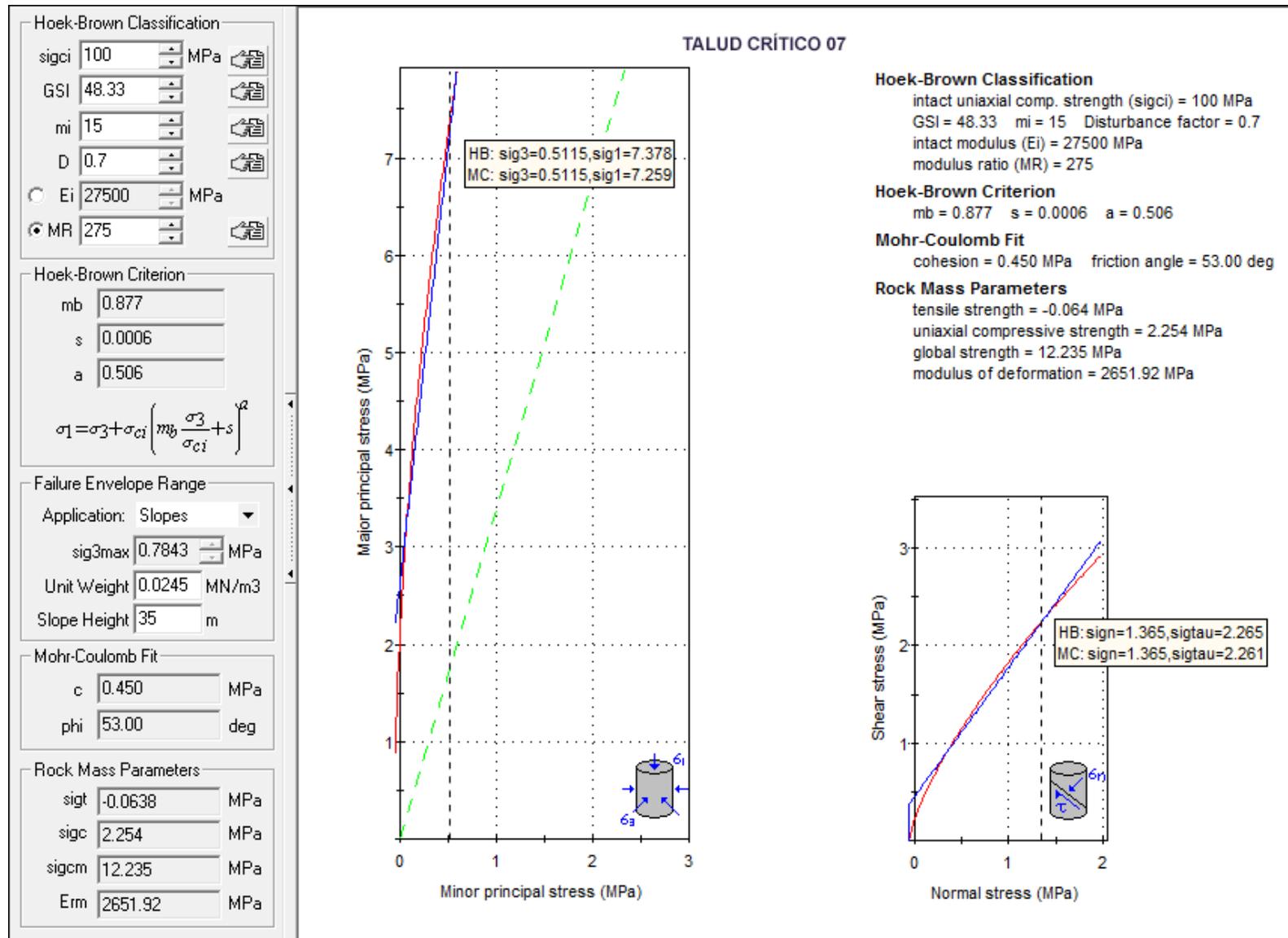


Figura 81: Análisis de las Propiedades Geomecánicas en el software RocData v.4 correspondiente al Talud Crítico 07.

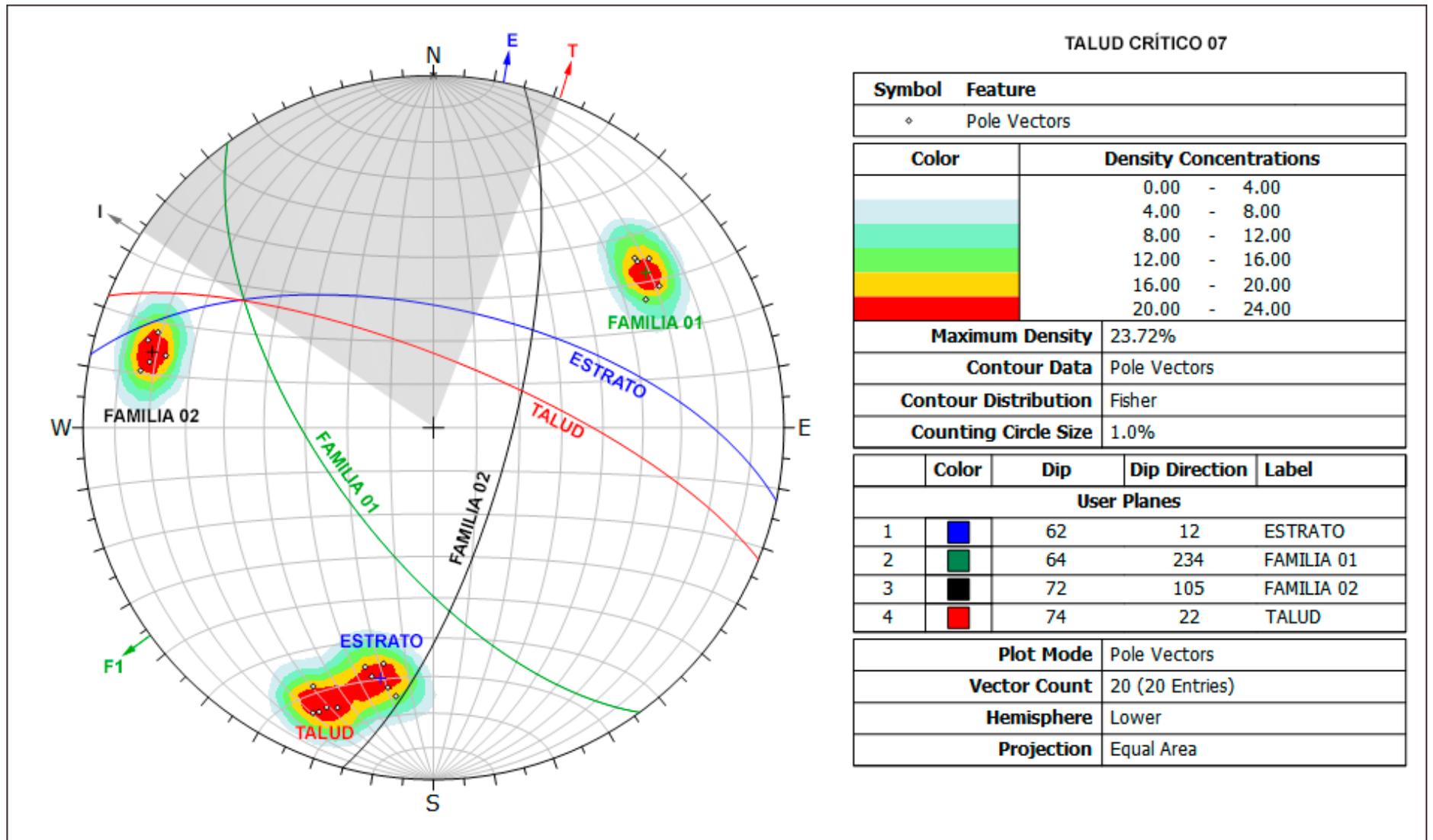


Figura 82: Análisis Cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indica rotura planar.

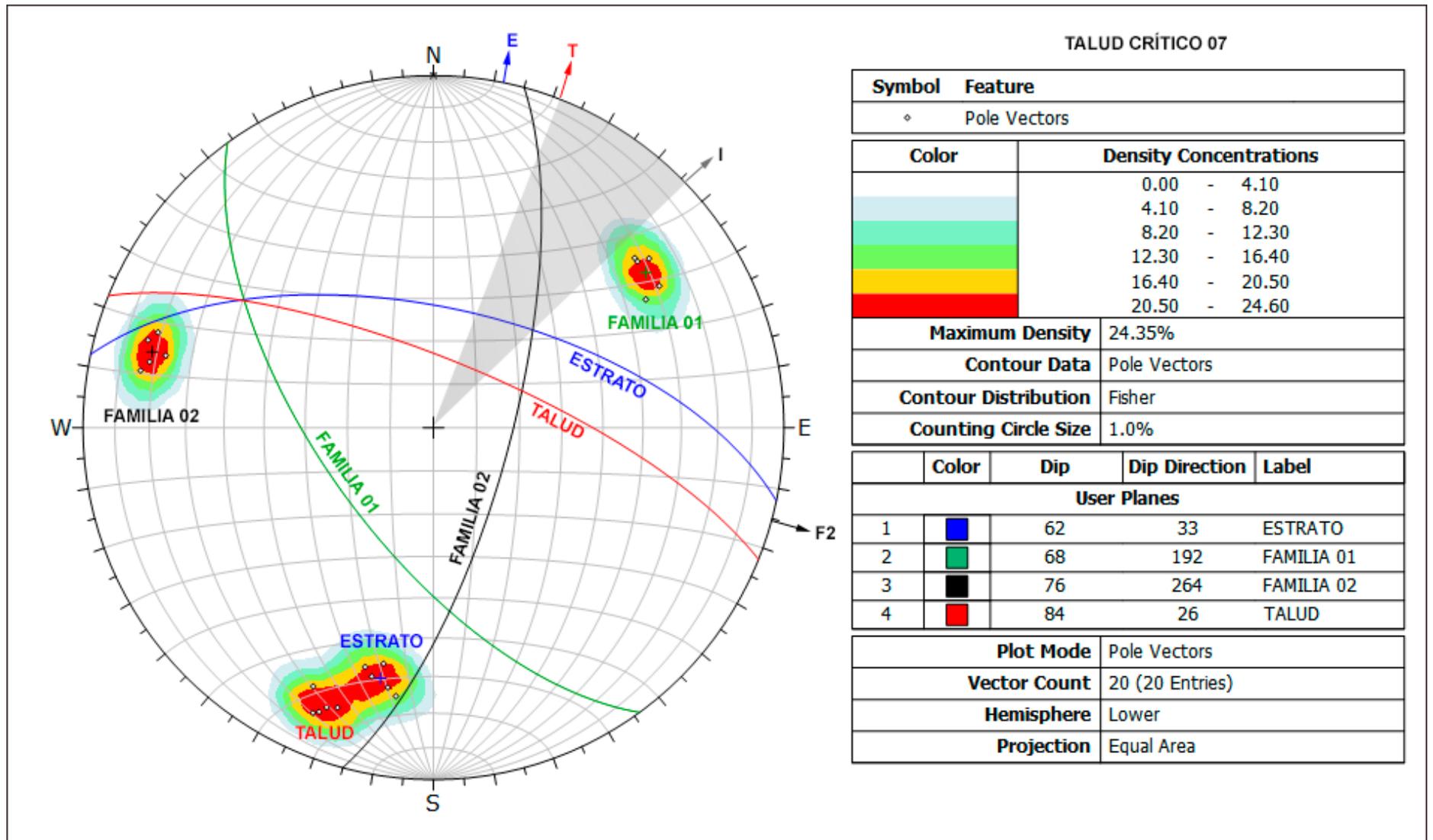


Figura 83: Análisis Cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indica rotura en cuña directa.

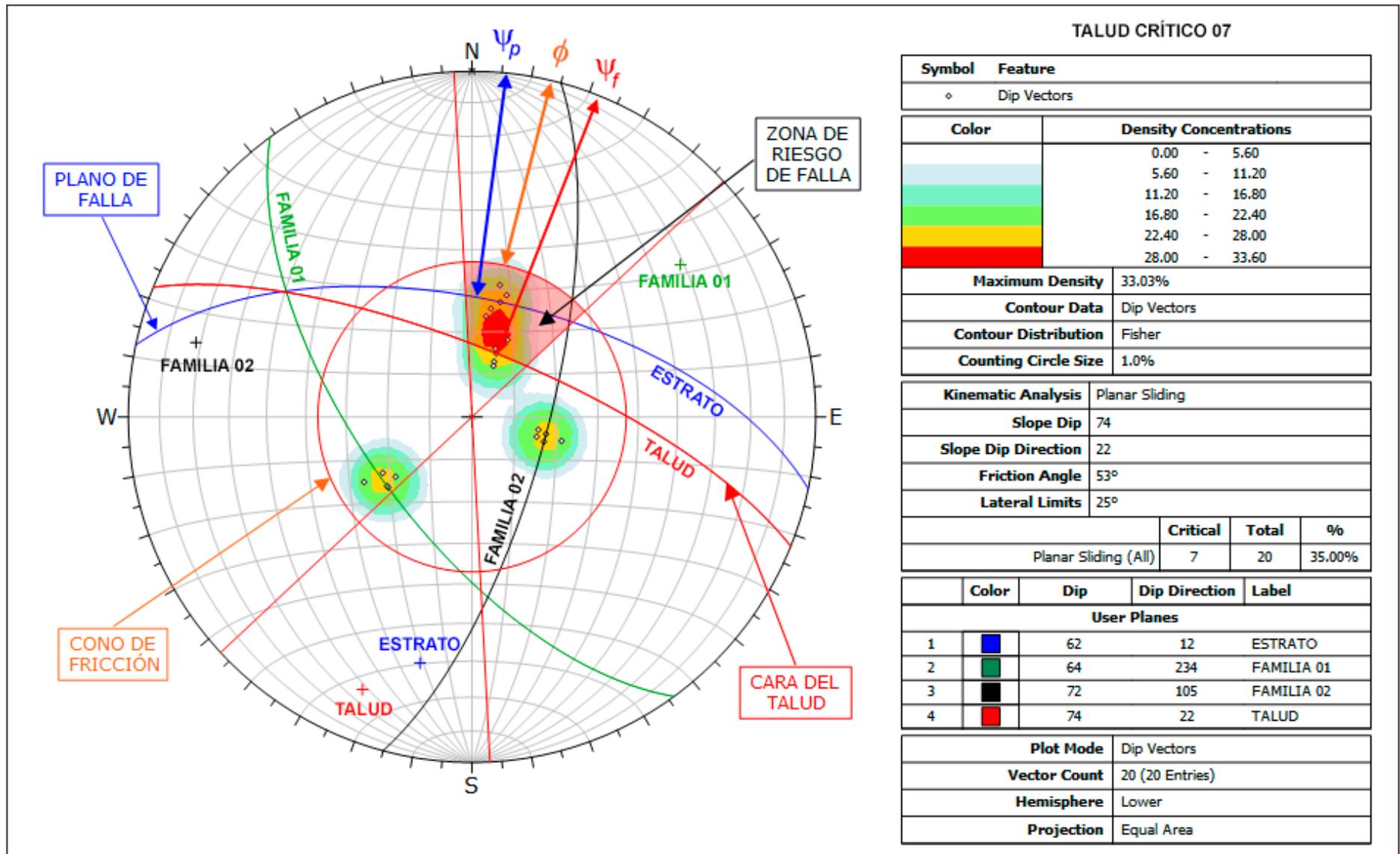


Figura 84: Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de deslizamiento planar.

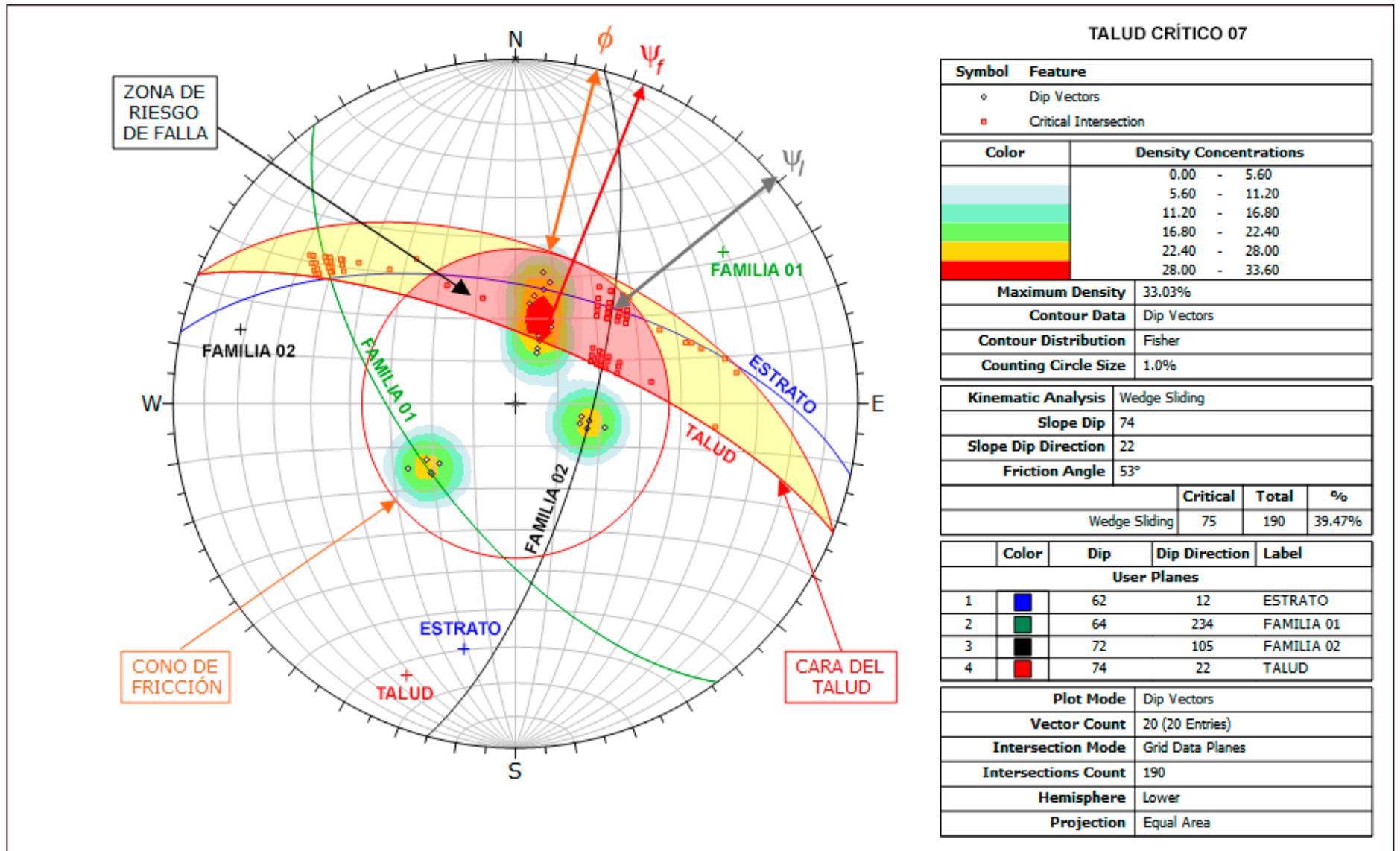


Figura 85: Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de deslizamiento en cuña.

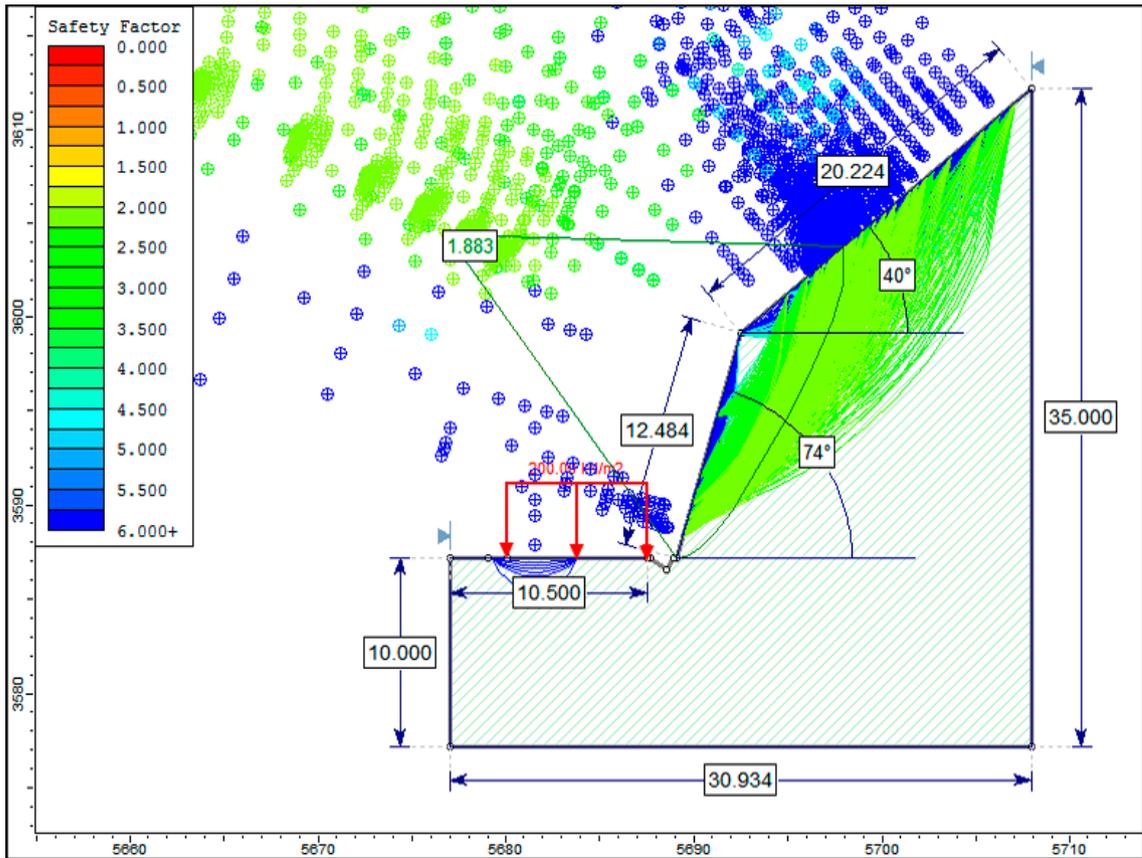


Figura 86: Análisis Slide en condiciones naturales.

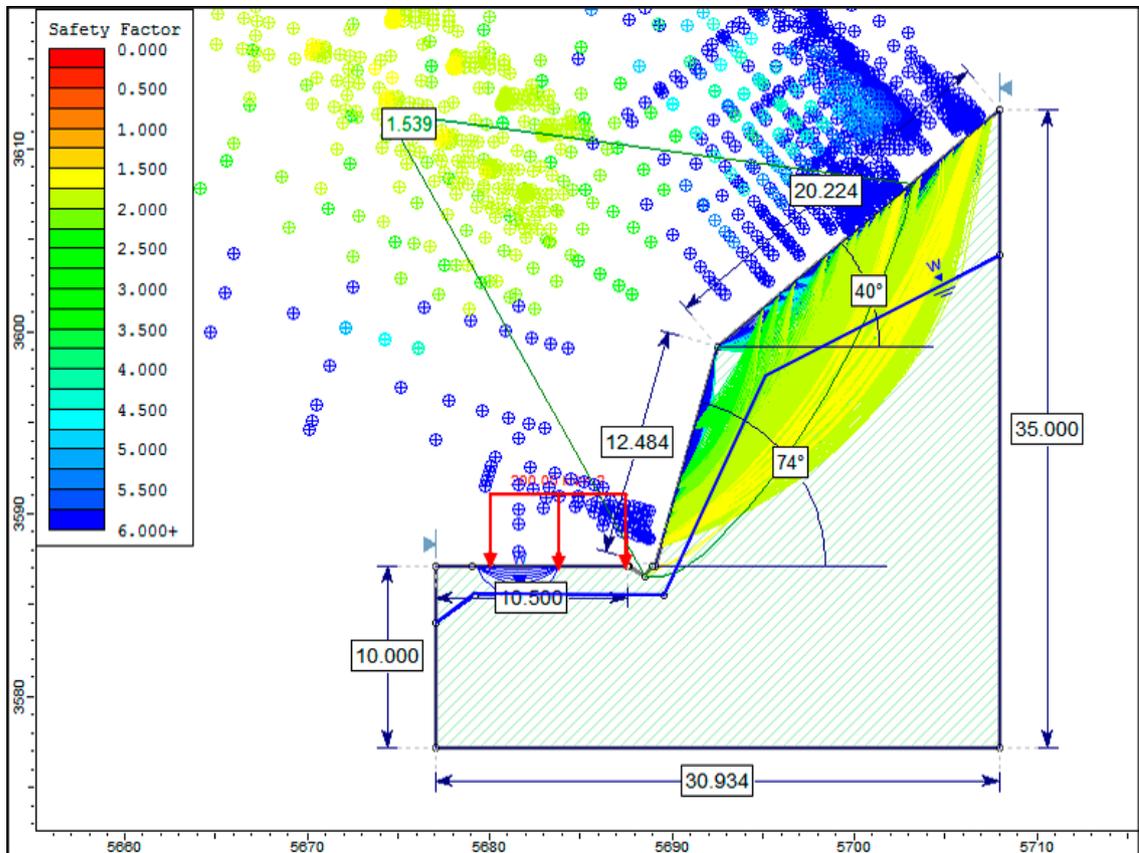


Figura 87: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial.

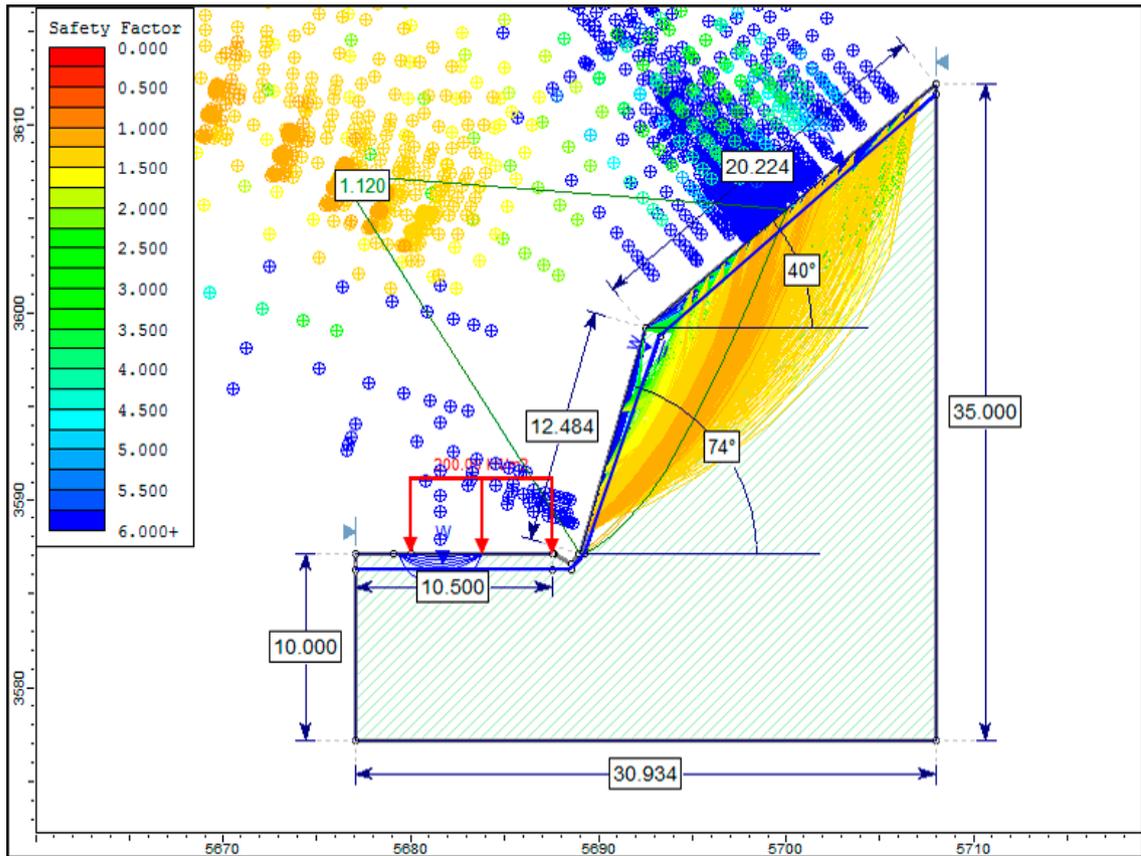


Figura 88: Análisis Slide en condiciones de saturación total.

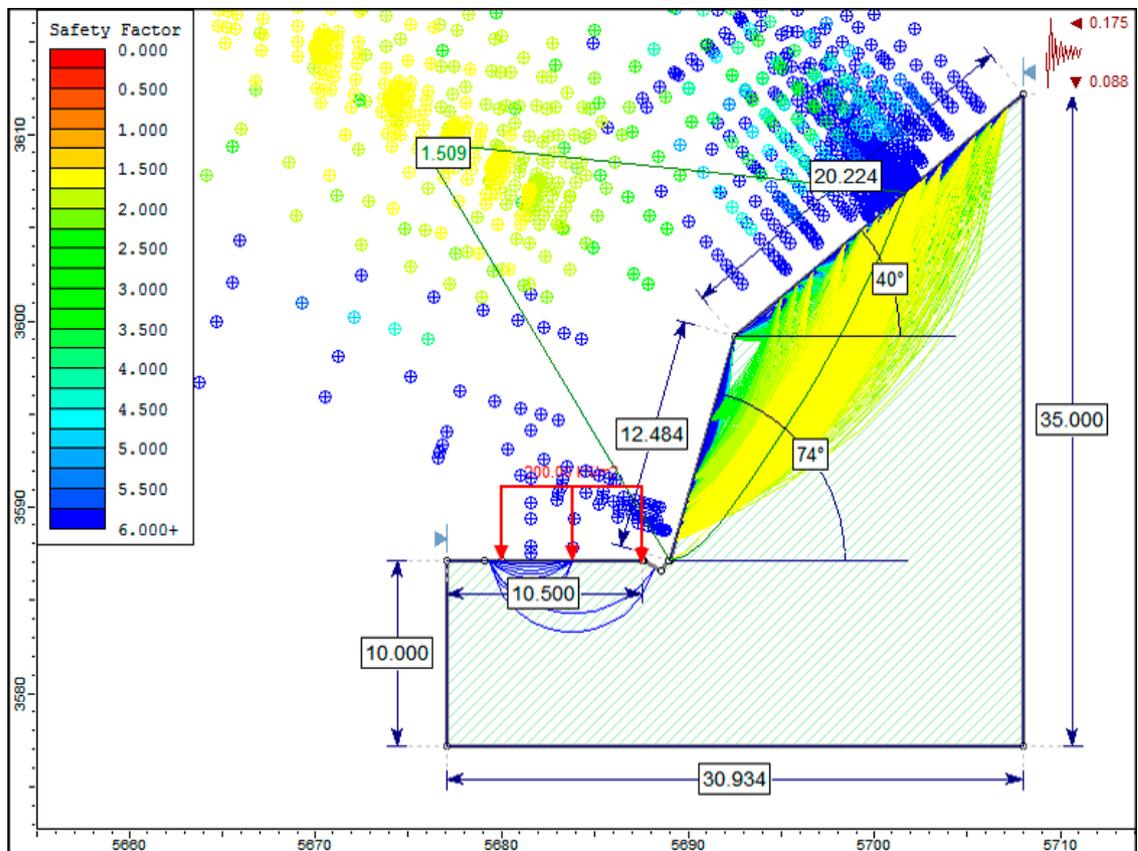


Figura 89: Análisis Slide en condiciones de sismicidad.

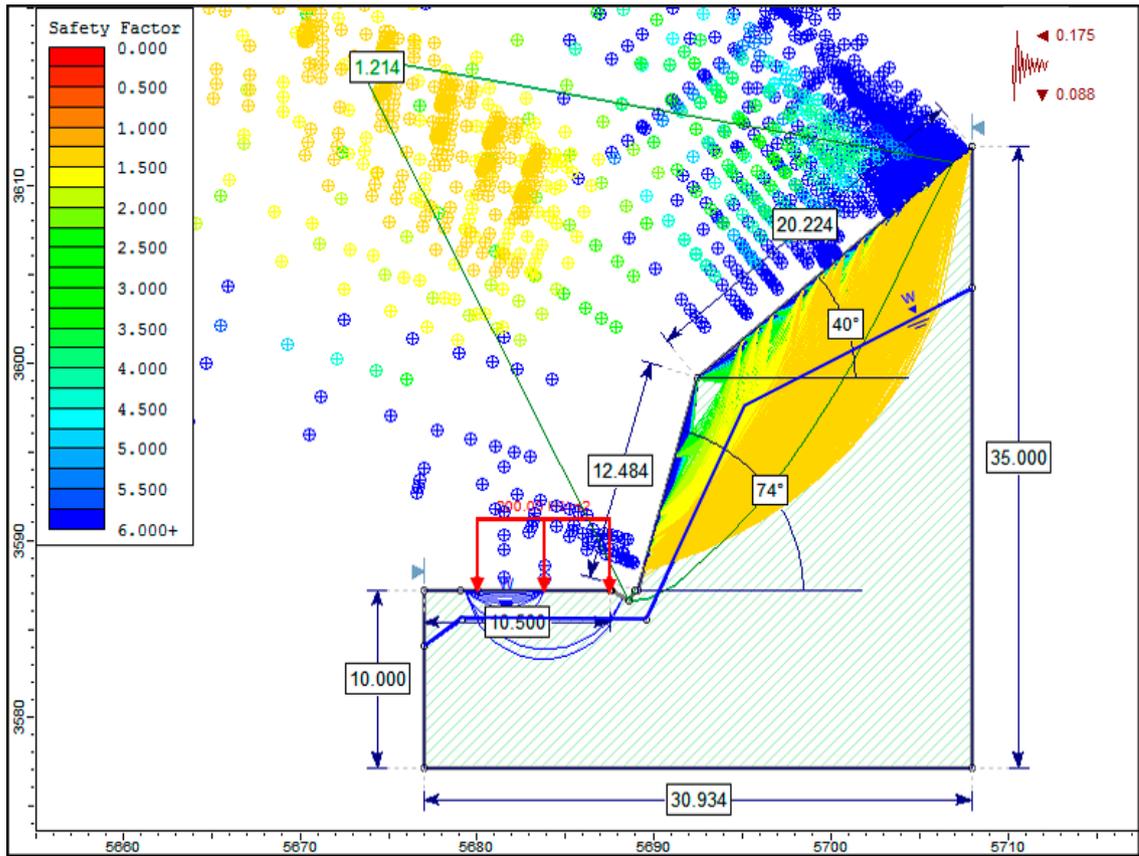


Figura 90: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad.

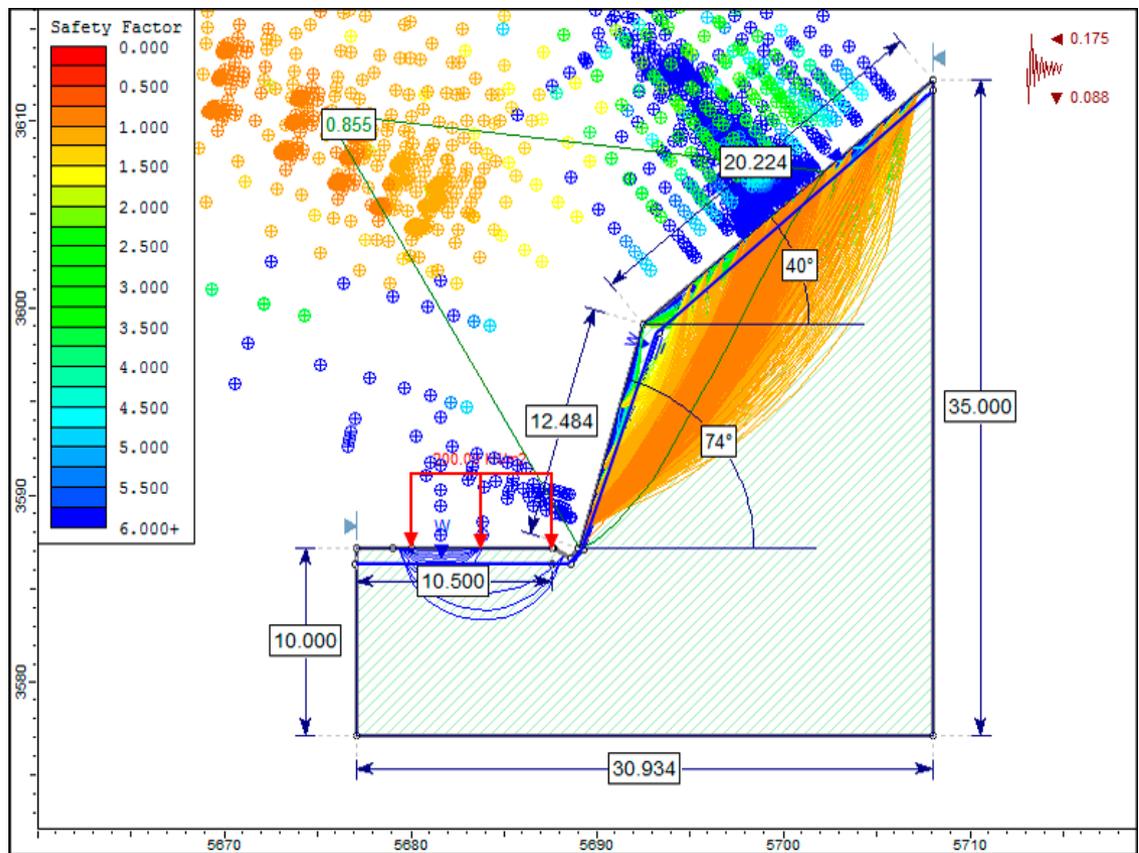


Figura 91: Análisis Slide en condiciones de saturación total y sismicidad.

### 3.9.8 Talud Crítico N° 08:

La información correspondiente al Talud Crítico N° 08, su respectiva fotografía, y los valores del RMR se encuentran en la Tabla 43, 44 y 45 respectivamente.

Tabla 43: Coordenadas y descripción de la Talud Crítico N° 08.

DATUM	ZONA	COORDENADAS		COTA
		ESTE	NORTE	
WGS - 84	17 S	738243	9282240	1775
DESCRIPCIÓN				
<p>El talud se encuentra localizado en la parte SW de la carretera entre las progresivas Km 125+183 - Km 125+233. Se encuentra dentro del Grupo Pulluicana (Ks - P), que litológicamente corresponde a una arenisca de granulometría fina dispuesta en estratos medianos con espesores que varían de 50 cm a 1 m; además, se evidencia una meteorización moderada con una tonalidad gris amarillenta. El talud tiene una altura aproximada de 25 m con un ángulo de inclinación de 74°. La cresta sigue la morfología natural del terreno sin ningún cambio de rumbo con respecto al talud. Muestra un grado de fracturamiento medio con bloques irregulares, presentando tres familias de discontinuidades. La estratificación tiene una dirección de inclinación hacia la cara del talud; además, el análisis cinemático revela la intersección de dos discontinuidades favorables para la formación de bloques en cuña, por lo que, los mecanismos de rotura potenciales son de tipo cuña y planar. Al ser afectadas por la precipitación y sismicidad, inestabilizan y erosionan el macizo rocoso, generando deslizamientos y desprendimientos constantes de bloques.</p>				



Foto 26: Afloramiento de calizas arenosas, perteneciente al Grupo Pulluicana (Ks - P), en las progresivas Km 125+183 - Km 125+233.

Tabla 44: Parámetros del Macizo Rocoso, orientación de las familias y geometría del Talud Crítico N°8.

MACIZO ROCOSO				ORIENTACIÓN			
LITOLÓGIA / FORMACIÓN	METEORIZACIÓN	GRADO DE FRACTURAMIENTO	GSI	TIPO	D	DD	
Caliza, Chulec	1=Fresco	1=Alto	1= Bloq. regular	ESTRATO	60°	8°	
				FAMILIA 1	66°	84°	
	2=Leve	2=Medio	2=Bloq. Irregular	FAMILIA 2	56°	228°	
				GEOMETRÍA DEL TALUD			
	3=Moderado	3=Bajo	3=Bloq. y Capas	ALTURA	25 m		
				PIE	12 m		
	4=Alto			4= Frac-intenso	DIRECCIÓN	TALUD	CABEZA
					D	74°	35°
	3	2	2	DD	22°	22°	

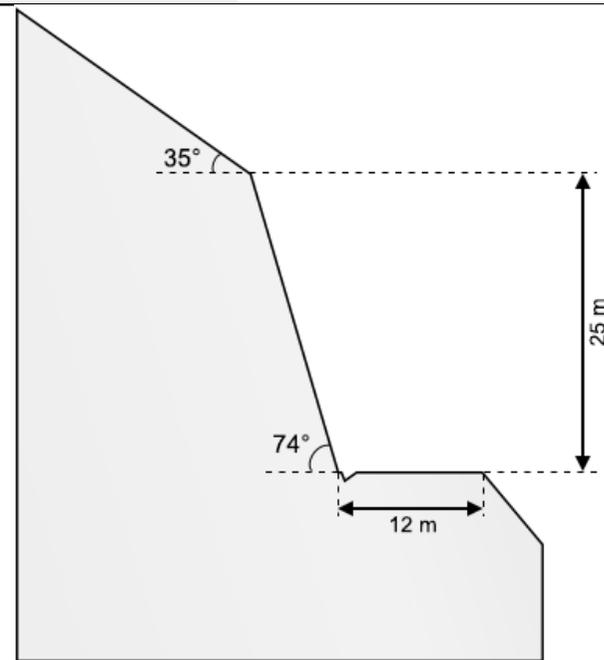
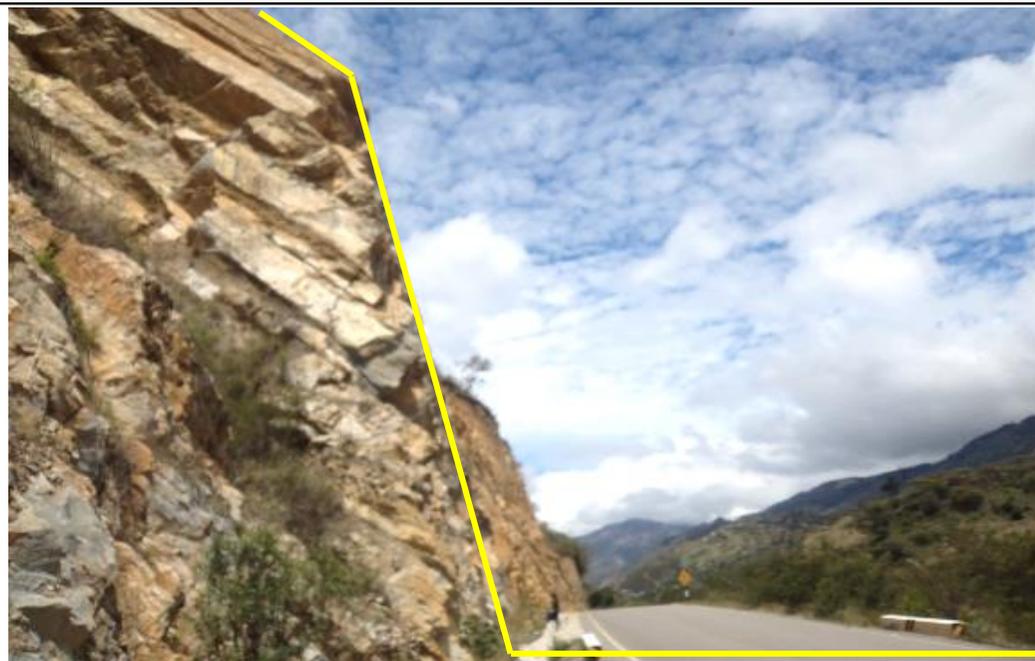


Foto 27: Perfil del Talud Crítico N°8 en las progresivas Km 125+183 - Km 125+233.

Tabla 45: Asignación de Valores para el Macizo Rocoso, Talud crítico N° 08.

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)	15	
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)	0
	Rugosidad	Muy Rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Lisa (1)	Suave (0)	5
	Relleno	Ninguno (6)	Duro < 5 mm (4)	Duro > 5 mm (2)	Suave < 5 mm (1)	Suave > 5 mm (0)	0
	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>55</b>	

La estimación del GSI se realizó mediante la matriz publicada por Hoek, Carter, & Diederichs (2013), como se muestra en la Tabla 5, la cual presenta algunas modificaciones menores al gráfico del GSI publicado por Hoek y Marinos (2000). Presenta dos escalas lineales simples, **JCond<sub>89</sub>** (condiciones de superficie de las discontinuidades) y **RQD**. La medición o estimación en campo es muy simple y posiblemente otorga el mayor grado de consistencia. Lo que es más importante, la relación entre los valores GSI calculados y mapeados son razonablemente cercanas a la relación ideal de 1:1 para un ajuste perfecto y obtener propiedades de entrada para modelos numéricos. La estimación del GSI para la Talud Crítico N° 8 se muestra en la Tabla 46.

Tabla 46: Estimación del GSI en términos del RQD y la Condición de las Juntas

ESTIMACIÓN DEL GSI							
CÁLCULO DEL RQD							
$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$				ND	L(m)	$\lambda$	RQD
				39	4	10	74.5
CLASIFICACIÓN DE CONDICIONES DE DISCONTINUIDADES, BIENIAWSKI (1989)							
LONGITUD DE LA DISCONTINUIDAD	ABERTURA	RUGOSIDAD	RELLENO	ALTERACIÓN	VALORACIÓN JCOND <sub>89</sub>		
< 1m (6)	Cerrada (6)	Muy Rugosa (6)	Ninguno (6)	Sana (6)			
1 -3 m (4)	< 0.01 mm (5)	Rugosa (5)	Duro < 5mm (4)	Lig. Alt (5)			
3 - 10 m (2)	0.1 - 1.0 mm (4)	Lig. Rugosa (3)	Duro > 5mm (2)	Mod. Alt (3)			
10 - 20 m (1)	1 - 5 mm (1)	Lisa (1)	Suave < 5mm (1)	Muy Alt (1)			
> 20 m (0)	> 5 mm (0)	Suave (0)	Suave > 5mm (0)	Descompuesta (0)			
2	0	5	0	3	10		
$GSI = 1.5JCOND_{89} + RQD/2$				<b>GSI = 52.25</b>			

La determinación de las propiedades geomecánicas del Talud Crítico 08 se realizó mediante el software RocData v.4.0, y se muestra en la Figura 92. El análisis cinemático con el software Dips v.6.0, se presenta en las Figuras 93 - 96. El análisis de estabilidad de los taludes con las seis condiciones, se realizó con el software Slide v.6.0, y se muestran en las Figuras 97 - 102.

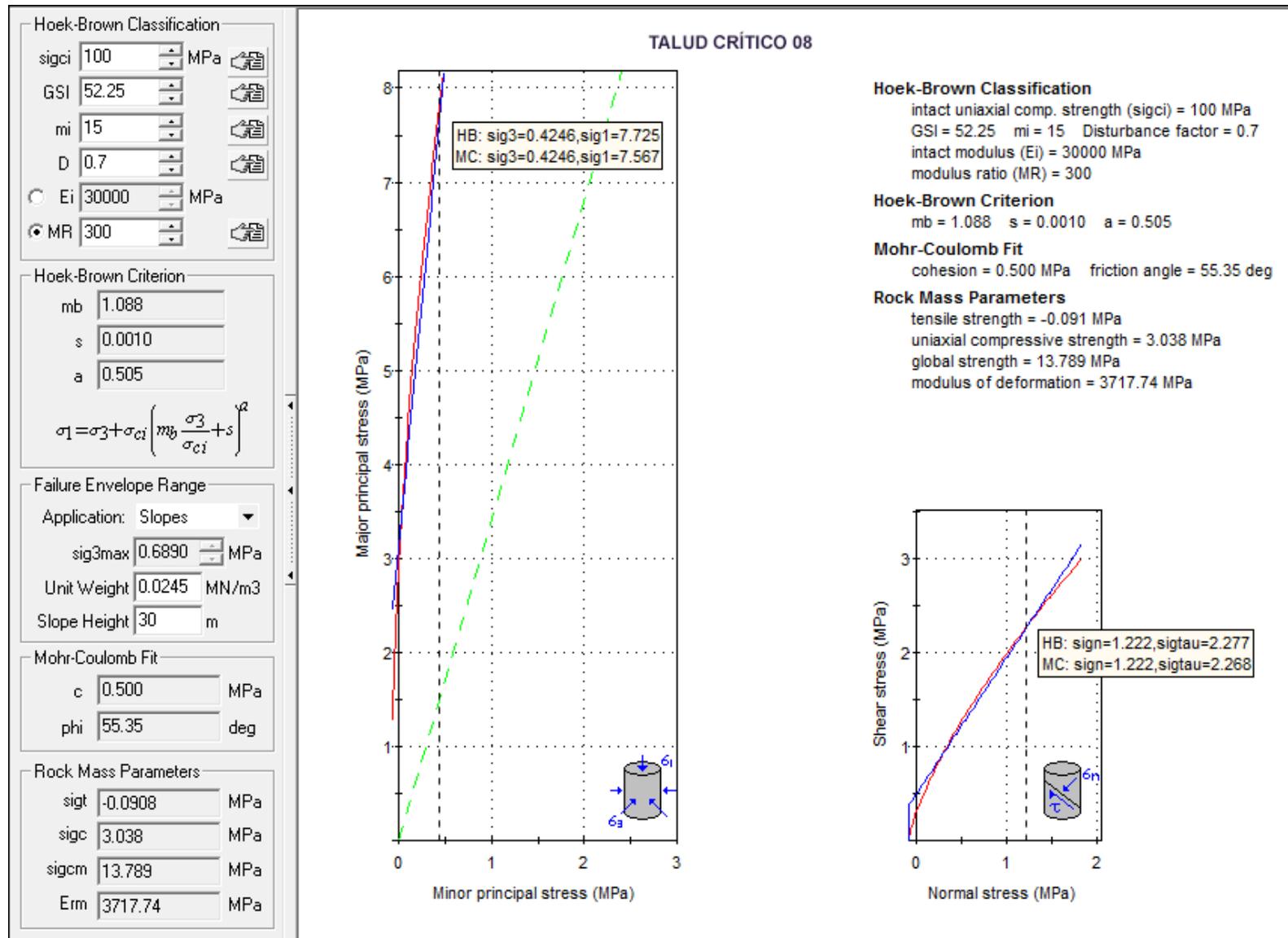


Figura 92: Análisis de las Propiedades Geomecánicas en el software RocData v.4 correspondiente al Talud Crítico 08.

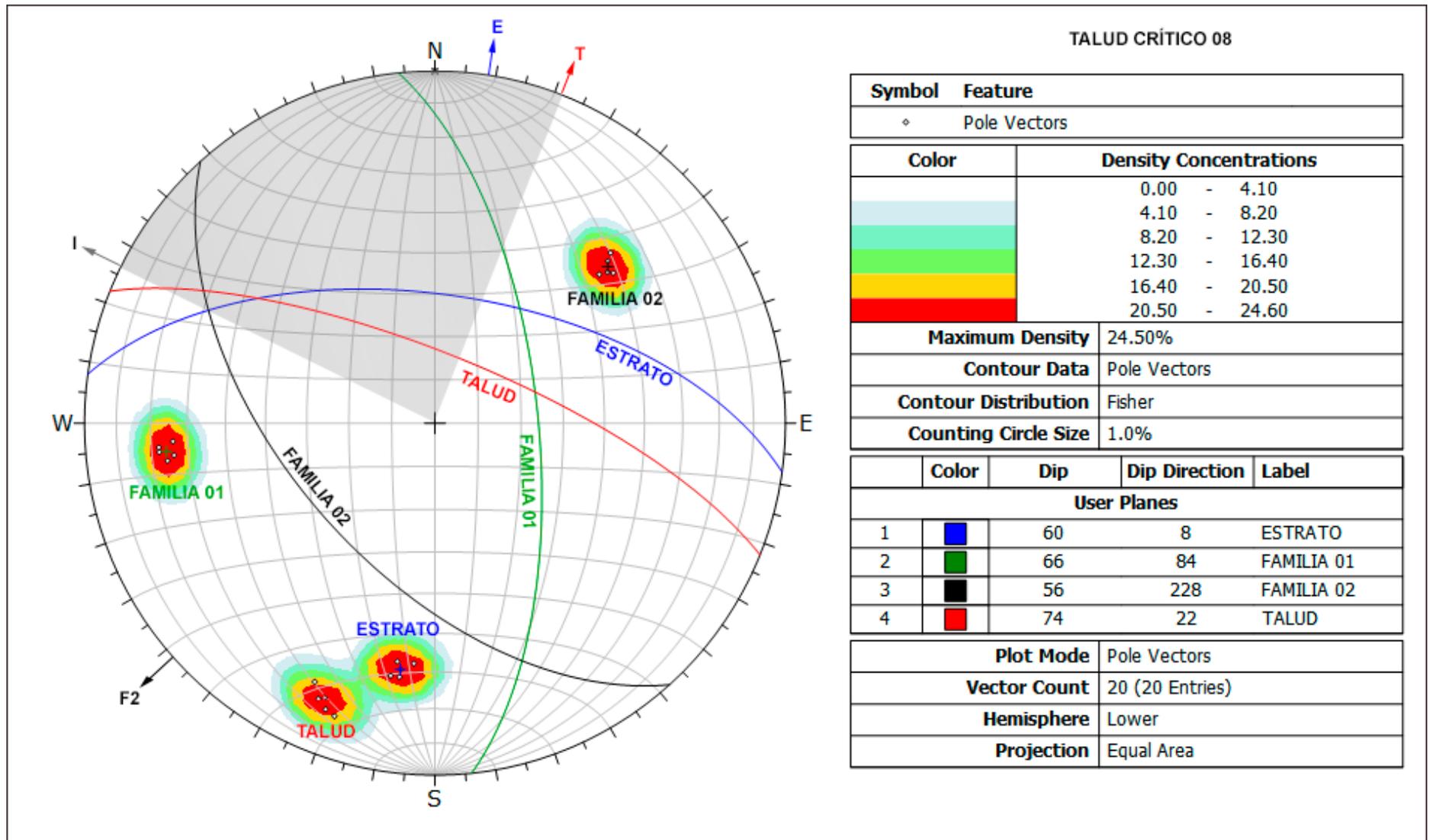


Figura 93: Análisis Cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indica rotura planar.

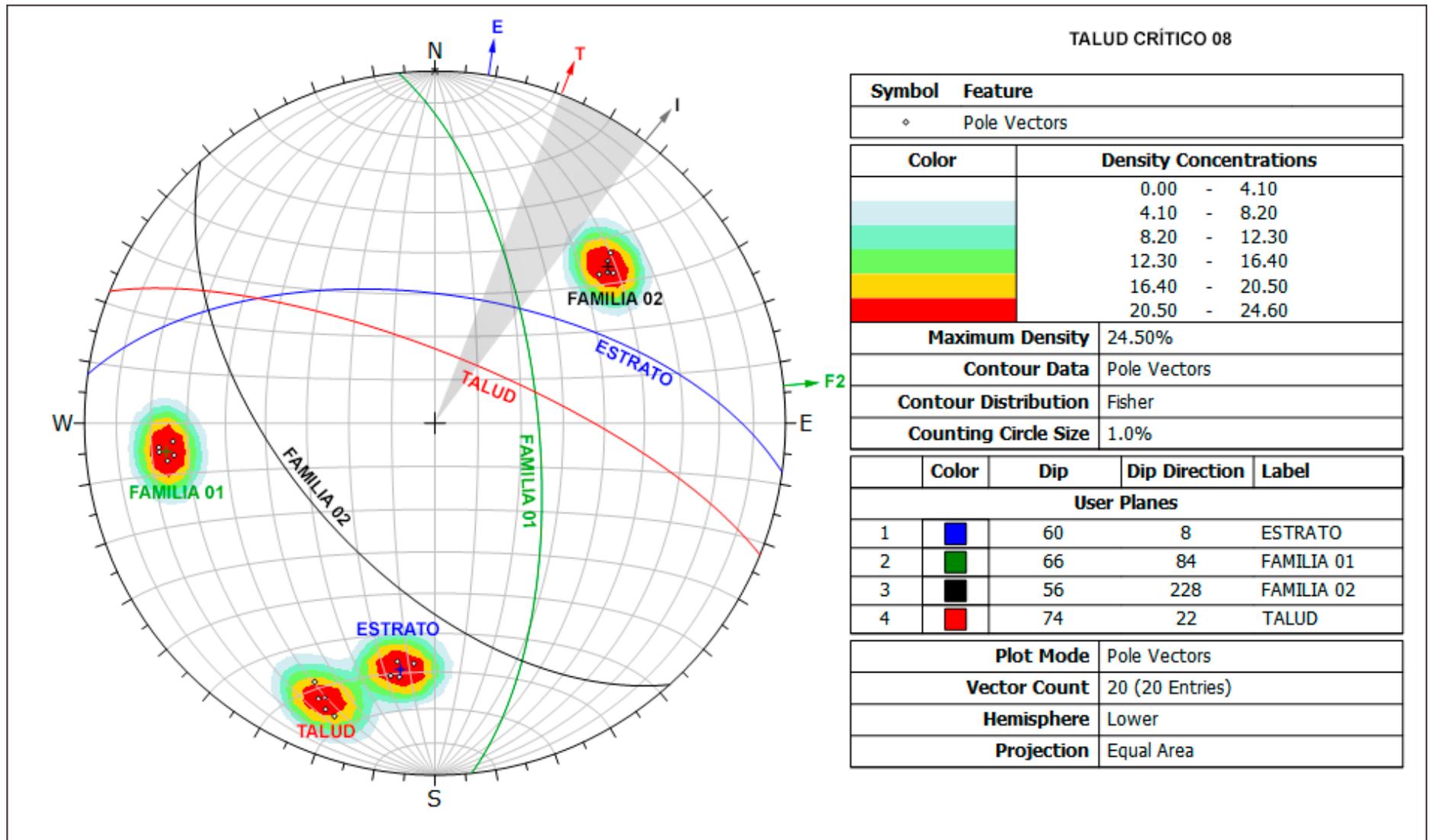


Figura 94: Análisis Cinemático mediante áreas de sombras, en el diagrama de polos y círculos máximos, indica rotura en cuña directa.

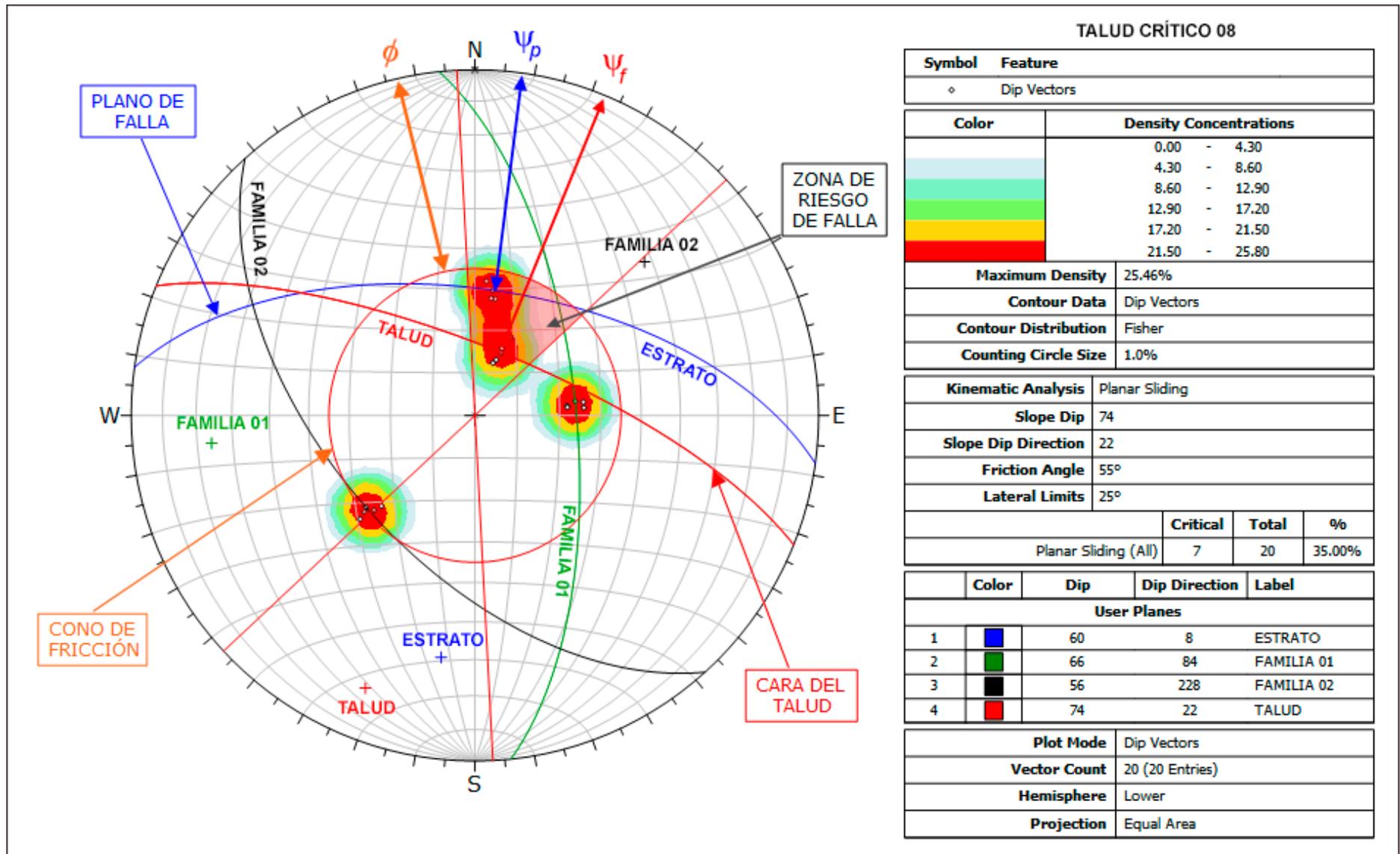


Figura 95: Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de deslizamiento planar.

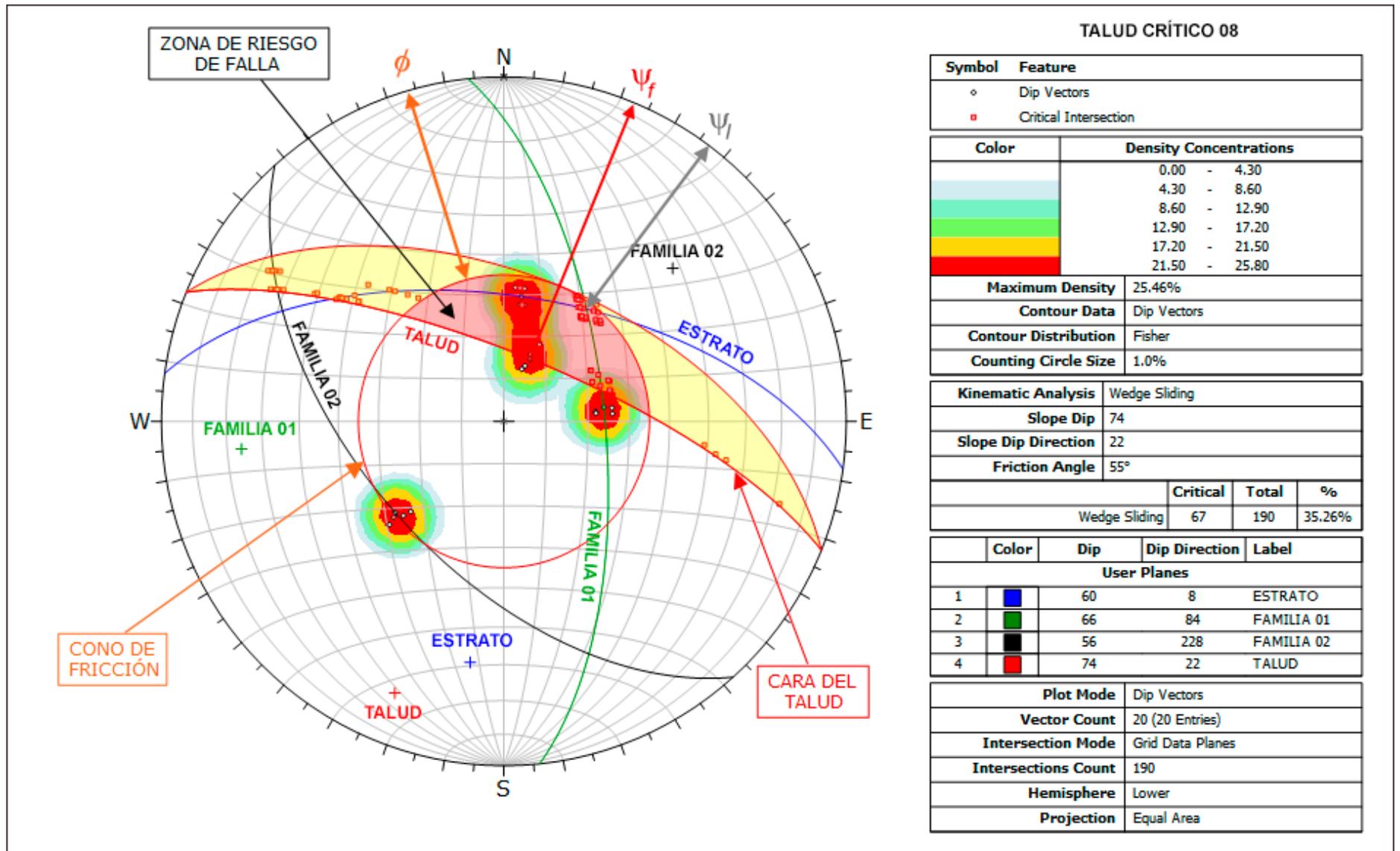


Figura 96: Análisis de proyección estereográfica, indican probabilidad de deslizamiento en cuña.

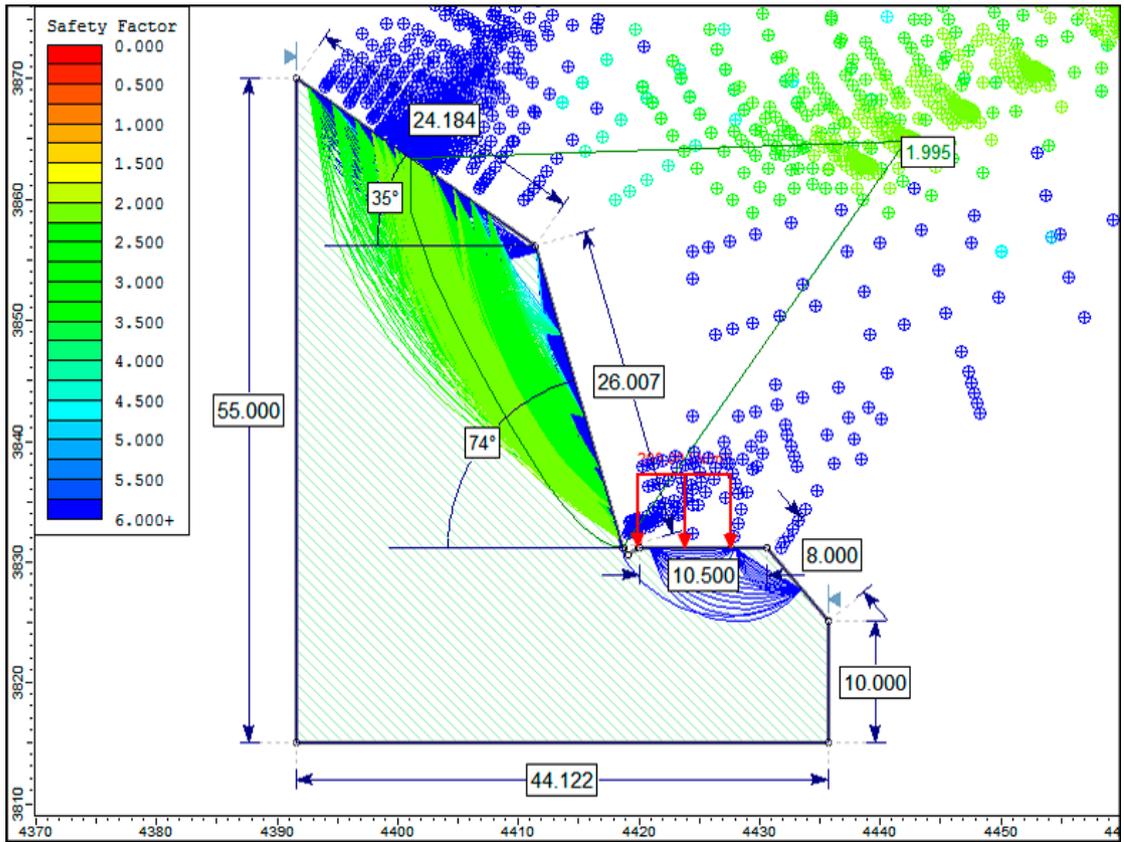


Figura 97: Análisis Slide en condiciones naturales.

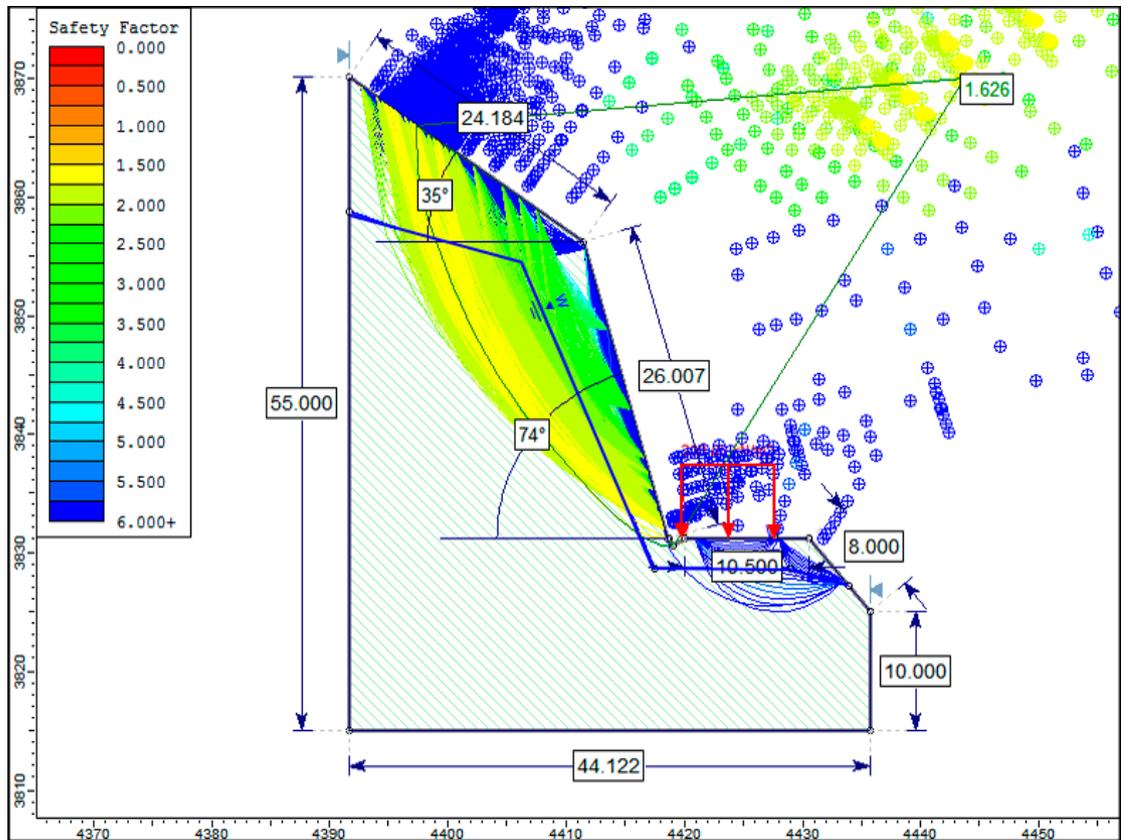


Figura 98: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial.

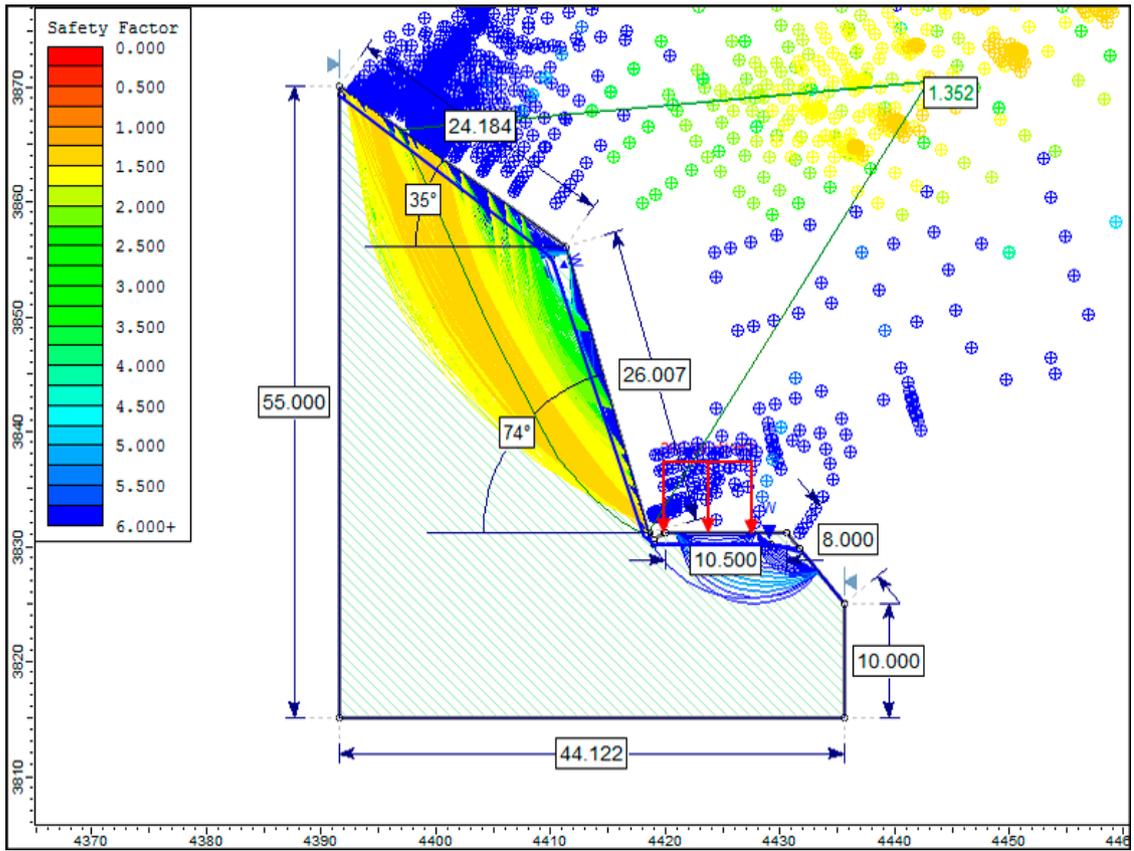


Figura 99: Análisis Slide en condiciones de saturación total.

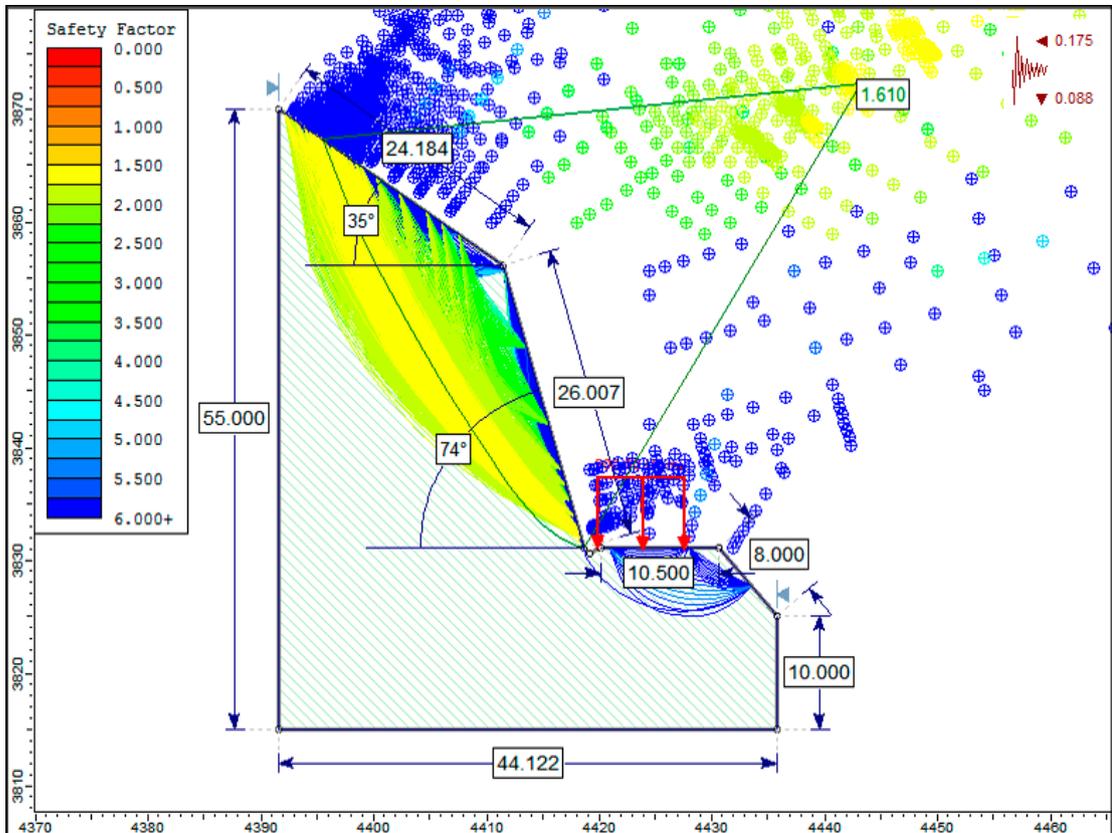


Figura 100: Análisis Slide en condiciones de sismicidad.

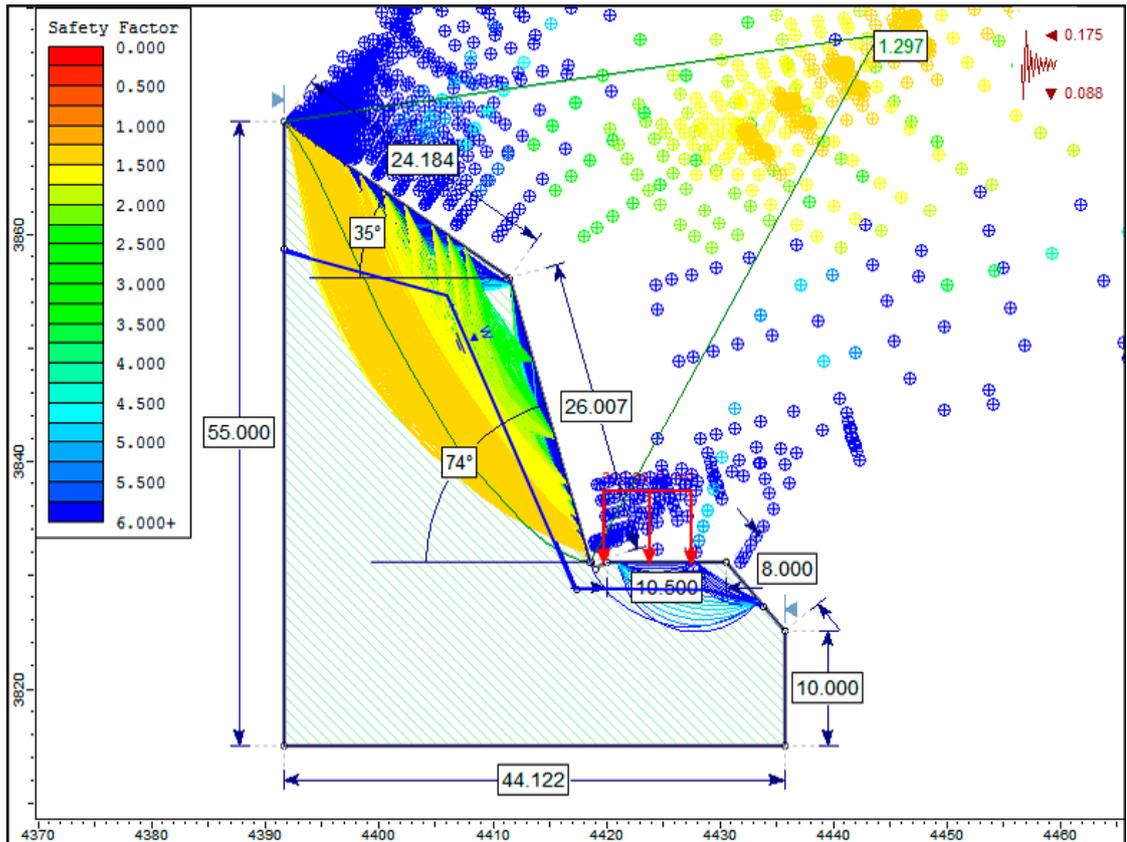


Figura 101: Análisis Slide en condiciones de saturación parcial y sismicidad.

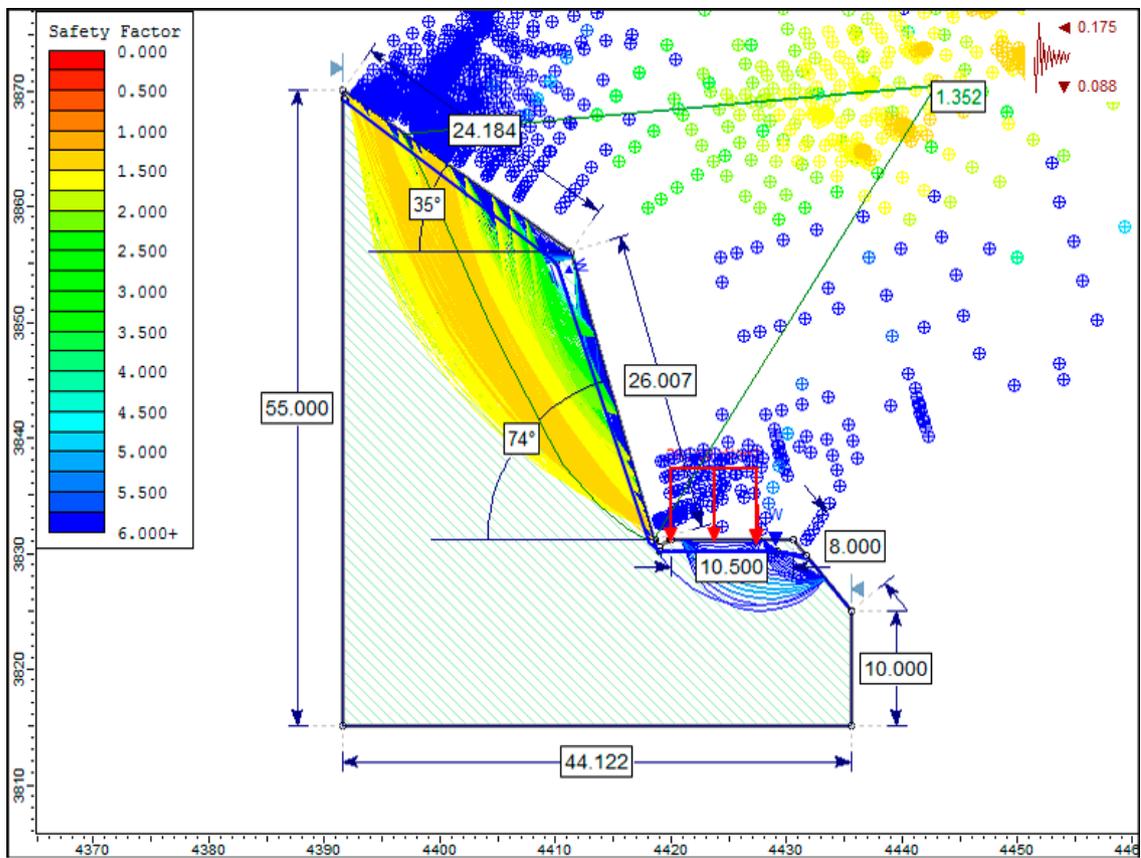


Figura 102: Análisis Slide en condiciones de saturación total y sismicidad.

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

#### **4.1 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS**

La geomorfología presente en el área de investigación, son el resultado de procesos tectónicos de compresión, sobreimpuestos por procesos geodinámicos, en la que se observan fallas inversas de alto ángulo, buzamientos mayores a 45°, con dirección SO-NE y plegamientos con dirección predominante NO-SE, lo que evidencia la estrecha relación que existe entre las fallas inversas y los pliegues; así mismo, la erosión y socavación por el drenaje del Río Chotano y los sedimentos aluviales transportados por los afluentes de este agente natural, luego depositados en extensiones restringidas de terreno, han dado la configuración topográfica actual. De acuerdo a la altura y la pendiente considerada en la clasificación de Rodríguez (2014), se reconocieron unidades geomorfológicas como planicies, lomadas, laderas y escarpas.

La geología está constituida por rocas de origen marino profundo, como es el caso del Grupo Crisnejas, y de origen marino somero del Grupo Pulluicana. Esta disposición se presenta en la Tabla 47 y se visualiza en el Plano N° 05 (ver Plano Geológico). La secuencia estratigráfica base de los afloramientos es la Formación Chúlec, compuesto de lutitas, margas y calizas nodulares, seguida en aparente concordancia, por las calizas estratificadas en lajas, intercaladas con lutitas negras y bituminosas de la Formación Pariatambo, la cual infrayace, en concordancia, con las calizas oscuras, margas y calizas arenosas estratificadas en capas medianas a gruesas del Grupo Pulluicana. Cubriendo las rocas mencionadas, en ambos márgenes de la carretera y en el cauce del Río Chotano, se encuentran depósitos Cuaternarios recientes de origen aluvial, fluvio-aluvial y fluvial, asociadas a problemas geodinámicos producto de las fuertes y continuas precipitaciones pluviales.

Tabla 47: Formaciones Geológicas de la zona de investigación

Eratema	Sistema	Serie	Piso	Unidad Estratigráfica	Simbología	
Cenozoico	Cuaternario	Reciente		Depósito fluvial	Q-fl	
				Depósito aluvial	Q-al	
Mesozoico	Cretácico	Superior	Cenomaniano	Gpo. Pulluicana	Ks-p	
		Inferior	Albiano	Gpo. Crisnejas	Fm. Pariatambo	Ki-pa
					Fm. Chúlec	Ki-ch

#### 4.1.1 Análisis de la Caracterización Geomecánica

Mediante la caracterización geomecánica se definieron propiedades físicas y mecánicas de los bloques de roca intacta y las propiedades de las discontinuidades que limitan los bloques individuales; para lo cual, se valió de metodologías para la caracterización del macizo rocoso; así como, del tratamiento y procesamiento de la información. La caracterización geomecánica incluye procedimientos y técnicas para evaluar la resistencia de un material bajo condiciones de esfuerzo que pudiesen provocar inestabilidad en un macizo rocoso.

La clasificación geomecánica de los taludes críticos en la zona de investigación, se realizó a partir de mapeo lineal realizado in situ, de los cuales se obtuvieron el índice **RQD** y los valores de las clasificaciones **RMR<sub>89</sub>** y **GSI**. Los resultados se visualizan en el Plano N° 06 (Geomecánico).

##### 4.1.1.1 Índice de Calidad de la Roca (RQD):

Para determinar el RQD se utilizó el criterio de Priest y Hudson (1976) presentada en la sección 2.2.1.1, cuyo sistema se basa en medir la frecuencia del número de fracturas naturales presentes en el macizo rocoso, en la dirección que se mide, mediante el mapeo lineal (línea de detalle). El RQD asigna un porcentaje de calificación al macizo rocoso, de 100% (el más competente) a 0% (el menos competente: condición suelo). La tabla resumen de los resultados obtenidos del RQD para cada talud crítico, se muestran en la Tabla 48.

Tabla 48: Índice de Calidad de la Roca (RQD) para cada Talud Crítico

Talud	$\lambda$	RQD	Calidad
Talud Crítico N°01	52 Disc./4m	62.7%	Regular
Talud Crítico N°02	46 Disc./4m	68.1%	Regular
Talud Crítico N°03	48 Disc./4m	66.3%	Regular
Talud Crítico N°04	55 Disc./4m	60%	Regular
Talud Crítico N°05	49 Disc./4m	65.4%	Regular
Talud Crítico N°06	51 Disc./4m	63.6%	Regular
Talud Crítico N°07	41 Disc./4m	72.7%	Regular
Talud Crítico N°08	39 Disc./4m	74.5%	Regular

De acuerdo al análisis del RQD, el grado de fracturamiento de los taludes críticos varían en el rango de 50 - 75%, obteniendo como resultado un tipo de roca de calidad regular; sin embargo, el RQD presenta algunas limitaciones, por ejemplo, no tiene en cuenta la resistencia al corte de las discontinuidades y puede ser muy sensible a la orientación de la línea de detalle con respecto a las estructuras, es por ello que el RQD debe considerarse como una estimación rápida y preliminar de las condiciones del macizo rocoso, que deberá ser complementada posteriormente con métodos de clasificación más sofisticados según sea necesario.

#### 4.1.1.2 Sistema de Valoración del Macizo Rcoso ( $RMR_{89}$ ):

El Sistema de Valoración del Macizo Rcoso ( $RMR_{89}$ ) desarrollada por Bieniawski en 1976 y actualizada en 1989, toma en cuenta aspectos que se relacionan más con el comportamiento del macizo, combinando el RQD con otras observaciones como la resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta, condición de las discontinuidades y presencia de agua. Dependiendo del estado de las características indicadas, se conseguirá una puntuación determinada y mediante la suma de dichas puntuaciones se obtendrá valores que se sitúan entre 0 y 100. Siendo 0 para roca muy mala y 100 para roca muy buena.

La caracterización del macizo rocoso se realizó mediante mapeos geomecánicos en los taludes críticos con el fin de determinar cualitativamente las características geomecánicas de los sistemas de discontinuidades (espaciamiento, abertura, relleno, rugosidad, persistencia y alteración), dándole su respectivo valor respecto a las condiciones observadas.

En campo se calculó la resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta, para lo cual se usó un martillo de geólogo y se golpeó la superficie de la roca, notándose que esta se rompe con más de un golpe de martillo. Si bien el valor obtenido con este ensayo es de menor precisión que un ensayo de laboratorio, se ejecutaron una gran cantidad de ensayos in-situ en los diferentes tipos de roca, con la finalidad de obtener un valor más representativo en cada uno de los taludes críticos. Los resultados obtenidos de la caracterización del macizo rocoso se presentan en la Tabla 49.

Tabla 49: Sistema de Valoración del Macizo Rocosos ( $RMR_{89}$ ) para cada Talud Crítico

Talud	$RMR_{89}$	Clase	Calidad
Talud Crítico N°01	48	III	Regular
Talud Crítico N°02	50	III	Regular
Talud Crítico N°03	50	III	Regular
Talud Crítico N°04	52	III	Regular
Talud Crítico N°05	48	III	Regular
Talud Crítico N°06	53	III	Regular
Talud Crítico N°07	53	III	Regular
Talud Crítico N°08	55	III	Regular

La caracterización geomecánica  $RMR_{89}$  realizada a los taludes críticos, arroja valores que varían en el rango 41 - 60, es decir, de calidad regular; esto debido a diversos factores, como la litología, compuesta de calizas compactas a otras muy fracturadas, moderadamente alteradas, con una resistencia a la compresión uniaxial y un RQD que varía entre los valores de 50 - 100 MPa y 50 - 75% respectivamente, y condición de agua subterránea ligeramente húmeda estimada por el relleno húmedo de las discontinuidades sin la presencia de goteo; además se evidencia tres familias principales, con espaciamiento que varía entre 0.2 - 0.6 m, mayormente rellenas con material suave compuesto de arcilla y planos ligeramente rugosos.

#### 4.1.1.3 Índice de Resistencia Geológica (GSI):

Para la estimación del GSI se utilizó el criterio de Hoek et al. (2013), los cuales presentan una propuesta de cuantificación del GSI en base a dos parámetros bien establecidos: condición de las discontinuidades (escala A) y el RQD (escala B), tal como se muestra en la Tabla 5. La escala A se define por  $1.5JCond_{89}$ , la escala B queda definida por  $RQD/2$  y el valor de la suma de estas dos escalas dan como resultado el GSI.

Ésta gráfica presenta algunas modificaciones menores al gráfico GSI publicado por Hoek y Marinos (2000), en la cual se utiliza dos escalas lineales simples, **JCond<sub>89</sub>** y **RQD**, para representar las condiciones de la superficie de las discontinuidades y la blocosidad del macizo rocoso. La relación entre los valores GSI estimados a partir de la suma de estas dos escalas y el GSI obtenido por el cartografiado son razonablemente cercanas a la relación ideal de 1:1. Los resultados obtenidos del GSI para cada talud crítico, se muestran en la Tabla 50.

Tabla 50: Índice de Resistencia Geológica (GSI) para cada Talud Crítico

<b>Talud</b>	<b>RQD/2</b>	<b>1. 5JCond<sub>89</sub></b>	<b>GSI</b>
Talud Crítico N°01	31.35	12	43.34
Talud Crítico N°02	34.05	15	49.04
Talud Crítico N°03	33.15	15	48.13
Talud Crítico N°04	30	18	48.02
Talud Crítico N°05	32.7	12	44.68
Talud Crítico N°06	31.8	16.5	48.28
Talud Crítico N°07	36.35	12	48.33
Talud Crítico N°08	37.25	15	52.25

Los valores obtenidos del GSI, mediante la estimación de la suma de estas dos escalas para cada talud crítico, muestran valores que varían en el rango de 43 - 52, evidenciando la blocosidad del macizo rocoso y las condiciones de la superficie de las discontinuidades observadas en campo, los cuales están definidos por bloques cúbicos formados por 3 familias de discontinuidades y presentan mayormente condiciones superficiales ligeramente rugosas y moderadamente meteorizadas.

Si bien, la cuantificación del GSI es un índice de práctica aplicación en campo y que satisface la necesidad de datos de entrada confiables relacionados con las propiedades del macizo rocoso para el análisis numérico, presenta dos deficiencias significativas; en primer lugar, esta clasificación se basa en la evaluación del grado de rugosidad y la alteración de la superficie de las discontinuidades, por lo que es cuestionable si estos parámetros pueden proporcionar una evaluación confiable de la resistencia al corte, siendo este un parámetro de control en el comportamiento del macizo rocoso, y en segundo lugar, las limitaciones mencionadas en la sección 4.1.1.1 respecto al RQD.

#### 4.1.1.4 Propiedades Físico - Mecánicas de la Roca:

Para determinar las propiedades físicas que están involucradas en el macizo rocoso en conjunto, se utilizó el software RocData v.4.0, el cual es un software práctico que contempla los criterios de resistencia del macizo rocoso como es el de Hook - Brown y Mohr - Coulomb; además, implementa la actualización más reciente (la edición de 2002) del criterio de Hook - Brown Generalizado. Las propiedades de resistencia del material determinadas mediante el software RocData, se puede usar como datos de entrada para programas de análisis numérico.

Los parámetros de entrada utilizados para el criterio de Hook - Brown Generalizado son; resistencia a la compresión uniaxial no confinada de la roca intacta ( $\sigma_{ci}$ ), calculada en campo mediante el uso del martillo de geólogo; el valor del GSI, estimada mediante el criterio de Hoek, Carter, & Diederichs (2013); la constante del material ( $mi$ ), la cual depende principalmente del tipo de roca, su textura y composición, estimado a partir de la tabla de valores de la constante  $mi$  para rocas intactas propuesta por Hoek & Brown (1997), incorporada en el software RocData; el parámetro ( $D$ ), que depende sobre todo del factor de alteración al que ha sido sometido el macizo rocoso, se considera el valor de 0.7, debido a que en estos taludes se realizó excavación mecánica; y el módulo de elasticidad de la roca intacta ( $E_i$ ), calculada mediante la ecuación presentada en la sección 2.2.1 de Hoek & Diederichs (2006), el valor de la relación modular ( $MR$ ) depende del tipo de roca y su textura, y su estimación se realizó mediante el software RocData, el cual incorpora la tabla de dichos valores propuestos por Deere (1968).

Otros parámetros de entrada son; la altura de la pendiente ( $H$ ) y la densidad de la roca intacta ( $\gamma$ ) de cada talud crítico, este último estimado a partir de valores medios de la densidad propuestas por González de Vallejo (2004) para algunas rocas, el rango de valores estimados para calizas es de 0.023 - 0.026  $MN/m^3$ , por lo que se optó tomar el valor medio de 0.0245  $MN/m^3$  para cada talud crítico. Los parámetros utilizados como entrada al software RocData v.4.0, se presentan en la Tabla 51.

Tabla 51: Parámetros de entrada al software RocData v.4.0 para cada Talud Crítico

Talud	$\sigma_{ci}$ (MPa)	GSI	$m_i$	D	MR	$E_i$ (MPa)	$\gamma$ (MN/m <sup>3</sup> )	H (m)
Talud Crítico N°01	80	43.34	8	0.7	550	44000	0.0245	25
Talud Crítico N°02	90	49.04	9	0.7	600	54000	0.0245	30
Talud Crítico N°03	100	48.13	10	0.7	650	65000	0.0245	25
Talud Crítico N°04	90	48.02	9	0.7	250	22500	0.0245	25
Talud Crítico N°05	85	44.68	8	0.7	550	46750	0.0245	15
Talud Crítico N°06	95	48.28	9	0.7	600	57000	0.0245	50
Talud Crítico N°07	100	48.33	15	0.7	275	27500	0.0245	35
Talud Crítico N°08	100	52.25	15	0.7	300	30000	0.0245	30

Los parámetros de salida del software RocData v.4.0 se presentan en la Tabla 52, los cuales son; el Rango de la Envolvente de Rotura ( $\sigma_{3max}$ ), calculado mediante la ecuación presentada en la sección 2.2.2, (Hoek & Brown 2002); los parámetros del criterio de rotura generalizado de Hoek & Brown ( $mb$ ,  $s$  y  $a$ ); calculadas a partir de las ecuaciones presentadas en la sección 2.2.2, (Hoek & Brown 2002); los parámetros de Mohr - Coulomb equivalente ( $c$  y  $\phi$ ), calculados mediante las ecuaciones presentadas en la sección 2.2.2, (Hoek & Brown 2002); y los parámetros del macizo rocoso ( $\sigma_t$ ,  $\sigma_c$ ,  $\sigma_{cm}$ ,  $E_{rm}$ ), calculadas a partir de las ecuaciones presentadas en la sección 2.2.2, (Hoek & Brown 2002).

Tabla 52: Parámetros de salida del software RocData v.4.0 para cada Talud Crítico

Talud	$\sigma_{3max}$ (MPa)	Parámetros del 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)
Talud Crítico N°01	0.5425	0.356	0.0003	0.509	0.268	46.40°	-0.061	1.224	6.119	3112.33
Talud Crítico N°02	0.6585	0.504	0.0005	0.507	0.377	48.70°	-0.089	1.908	8.340	4949.80
Talud Crítico N°03	0.5667	0.578	0.0005	0.507	0.390	51.63°	-0.094	2.220	9.947	6189.01
Talud Crítico N°04	0.5586	0.517	0.0005	0.507	0.363	50.02°	-0.093	1.981	8.470	2127.44
Talud Crítico N°05	0.3440	0.383	0.0003	0.508	0.252	50.50°	-0.073	1.444	6.778	3587.31
Talud Crítico N°06	1.0555	0.525	0.0006	0.506	0.492	45.97°	-0.101	2.133	9.014	5479.26
Talud Crítico N°07	0.7843	0.877	0.0006	0.506	0.450	53.00°	-0.064	2.254	12.25	2654.92
Talud Crítico N°08	0.6890	1.088	0.0010	0.505	0.500	55.35°	-0.091	3.038	13.79	3717.74

#### **4.1.2 Análisis Estereográfico – Cinemático**

El método de análisis cinemático empleado para determinar el mecanismo de rotura se basa en las pruebas de Markland (1972), Hocking (1976) y Goodman y Bray (1976) descritas en Hoek y Bray (1981). Al realizarse el análisis cinemático a cada talud, se comprobó la eficiencia y simplicidad sugerida por dichas pruebas para la identificación del mecanismo potencial de rotura. Para determinar si la rotura en cuña es directa o inversa, utilizó el criterio de Laín H., descritos en Ramírez y Alejano (2004). Estos análisis depende básicamente del número de datos obtenidos en campo, los cuales deben ser representativos del macizo rocoso debido a que las fracturas muestran una heterogeneidad en cuanto a las orientaciones que presentan, por lo cual al momento de hacer el conteo estadístico, la concentración máxima debe mostrar el patrón representativo a dichas discontinuidades.

Otro aspecto muy importante a considerar es la comparación del mecanismo de falla obtenido por el análisis estereográfico, con el mecanismo observado en campo. Ejemplo claro de esto fue el análisis hecho al Talud N° 04, donde inicialmente el mecanismo observado en campo fue el de cuña, pero al vaciar los datos se demostró que se tiene un deslizamiento planar como mecanismo dominante.

El análisis cinemático se realizó mediante la aplicación del software Dips v.6.0, el cual es muy práctico y confiable. Los resultados se muestran en la Tabla 53.

El análisis cinemático muestra que la zona de estudio se ve afectada por roturas del tipo planar y cuña directa principalmente, cuyas magnitudes se ven influenciadas por la orientación e inclinación del talud, además del ángulo de fricción de la discontinuidad. Esta metodología presenta ciertas limitantes ya que no considera presiones intersticiales de agua ni cohesión entre los planos, es por ello que el análisis de estabilidad es mediante relaciones geométricas y de las orientaciones de las discontinuidades en forma desfavorable al talud. Por lo cual, se debe considerar esta técnica para identificar el mecanismo de rotura, para posteriormente realizar un análisis de estabilidad considerando los factores antes descritos.

Tabla 53: Resultados obtenidos del software Dips v.6.0 para cada Talud Crítico

Talud	Litología	ID Familia	Orientación		Ángulo de Fricción ( $\phi$ )	Análisis Cinemático					
			Dip	Dip Direction		Rotura Planar	%	Rotura en Cuña	%	Rotura por Vuelco	%
Talud Crítico N°01	Caliza	Estrato	52°	47°	44°	Rotura Planar por Estrato	40.00	Rotura en Cuña entre Estrato y Familia 02	38.42	-	-
		Familia 01	62°	198°							
		Familia 02	68°	326°							
		Talud	70°	33°							
Talud Crítico N°02	Caliza	Estrato	48°	355°	35°	-	-	Rotura en Cuña entre Estrato y Familia 02	35.64	-	-
		Familia 01	42°	181°							
		Familia 02	66°	112°							
		Talud	74°	72°							
Talud Crítico N°03	Caliza	Estrato	68°	304°	38°	-	-	Rotura en Cuña entre Familia 01 y 02	41.58	-	-
		Familia 01	74°	42°							
		Familia 02	52°	148°							
		Talud	68°	78°							
Talud Crítico N°04	Caliza	Estrato	50°	87°	25°	Rotura Planar por Estrato	35.00	Rotura en Cuña entre Estrato y Familia 01	34.74	Rotura por Vuelco por Familia 02	25.00
		Familia 01	70°	352°							
		Familia 02	68°	262°							
		Talud	74°	70°							

Talud	Litología	ID Familia	Orientación		Ángulo de Fricción ( $\phi$ )	Análisis Cinemático					
			Dip	Dip Direction		Rotura Planar	%	Rotura en Cuña	%	Rotura por Vuelco	%
Talud Crítico N°05	Caliza	Estrato	52°	205°	39°	-	-	Rotura en Cuña entre Familia 01 y 02	33.16	-	-
		Familia 01	58°	4°							
		Familia 02	64°	82°							
		Talud	68°	45°							
Talud Crítico N°06	Caliza	Estrato	62°	33°	44°	Rotura Planar por Estrato	35.00	Rotura en Cuña entre Estrato y Familia 02	52.63	Rotura por Vuelco por Familia 01	25.00
		Familia 01	68°	192°							
		Familia 02	76°	264°							
		Talud	84°	26°							
Talud Crítico N°07	Caliza	Estrato	62°	12°	53°	Rotura Planar por Estrato	35.00	Rotura en Cuña entre Estrato y Familia 02	33.03	-	-
		Familia 01	64°	234°							
		Familia 02	72°	105°							
		Talud	74°	22°							
Talud Crítico N°08	Caliza	Estrato	60°	8°	55°	Rotura Planar por Estrato	35.00	Rotura en Cuña entre Estrato y Familia 02	35.26	-	-
		Familia 01	66°	84°							
		Familia 02	56°	228°							
		Talud	74°	22°							

### 4.1.3 Análisis de Estabilidad

El análisis de la estabilidad de los taludes de la zona de investigación, se realizó mediante el software Slide v.6.0; así mismo, se utilizaron los siguientes modelos de análisis dentro del método de Equilibrio Límite: Bishop Simplificado, LE/Morgenstern-Price y Spencer, en un tipo de superficie no circular, contenidos dentro del análisis interno del software Slide. Para el análisis se estableció las siguientes seis (6) condiciones que representan el estado actual y pronóstico del talud; Estado Natural, Estado de Saturación Parcial, Saturación Total, Sismicidad Máxima, Sismicidad Máxima con la Saturación Parcial y Sismicidad Máxima con la Saturación Total; cuyas características se resumen en la Tabla 14. Para la zonificación, se utiliza el rango de Factor de Seguridad recomendado por Hoek (2007) y se muestra en la Tabla 54.

Los parámetros de entrada se concentran en cuatro grupos; Geométricos, considerados de acuerdo a la sección de corte de cada talud analizado, Plano N° 07 (ver Perfiles de los Taludes Críticos), mediante la altura, pendiente y la dirección del talud; Geotécnicos, obtenidos a partir de la caracterización geomecánica; Sísmicos, los cuales basan su deducción en la Norma Técnica E.030 Diseño Sismo-resistente del Reglamento Nacional de Edificaciones; Hidrogeológicos, mediante el modelado del nivel freático el cual genera condiciones de saturación y cambios en las tensiones efectivas aumentando la posibilidad de falla, para lo cual se utilizó el valor de 24.5 **KN/m<sup>3</sup>** para la densidad seca de los macizos rocosos y 26 **KN/m<sup>3</sup>** para la densidad saturada (Rodrigo, 2017). Adicionalmente, se agregó una carga externa de 200 **KN/m<sup>2</sup>** a cada condición de análisis, que simula el peso que recibe el talud ante el paso de vehículos pesados. El resultado de los análisis del Equilibrio Límite en los seis (6) escenarios para cada talud se presentan en la Tabla 55 y se visualizan en los Planos N° 08 (ver Planos de Zonificación).

Tabla 54: Rangos de Factores de Seguridad recomendados por Hoek (2007).

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

Tabla 55: Análisis de los métodos de Equilibrio Límite en seis (6) escenarios, para cada Talud Crítico.

Talud	Escenario	Métodos de Equilibrio Límite – Factor de Seguridad			Factor de Seguridad Promedio	Condición de Estabilidad
		Bishop Simplificado	Spencer	LE/Morgenstern-Price		
Talud Crítico N°01	Estado Natural (EN)	1.554	1.620	1.618	1.597	Estable a largo plazo
	Saturación Parcial (SP)	1.226	1.297	1.278	1.267	Estable relativo
	Saturación Total (ST)	0.864	0.924	0.846	0.878	Inestable
	Sismicidad Máxima (SM)	1.235	1.292	1.245	1.257	Estable relativo
	Combinación SM y SP	1.075	1.088	1.041	1.068	Estable relativo
	Combinación SM y ST	0.665	0.649	0.614	0.643	Inestable
Talud Crítico N°02	Estado Natural (EN)	1.686	1.843	1.861	1.797	Estable a largo plazo
	Saturación Parcial (SP)	1.362	1.415	1.377	1.385	Estable a corto plazo
	Saturación Total (ST)	0.971	1.024	0.994	0.996	Inestable
	Sismicidad Máxima (SM)	1.361	1.438	1.335	1.378	Estable a corto plazo
	Combinación SM y SP	1.157	1.160	1.104	1.140	Estable relativo
	Combinación SM y ST	0.748	0.705	0.678	0.710	Inestable
Talud Crítico N°03	Estado Natural (EN)	1.837	1.892	1.900	1.876	Estable a largo plazo
	Saturación Parcial (SP)	1.387	1.446	1.416	1.416	Estable a corto plazo
	Saturación Total (ST)	1.164	1.177	1.148	1.163	Estable relativo
	Sismicidad Máxima (SM)	1.469	1.528	1.513	1.503	Estable a largo plazo
	Combinación SM y SP	1.110	1.167	1.117	1.131	Estable relativo
	Combinación SM y ST	0.916	0.996	0.897	0.936	Inestable
Talud Crítico N°04	Estado Natural (EN)	1.638	1.752	1.738	1.709	Estable a largo plazo
	Saturación Parcial (SP)	1.166	1.240	1.182	1.196	Estable relativo
	Saturación Total (ST)	0.969	0.968	0.987	0.975	Inestable
	Sismicidad Máxima (SM)	1.313	1.342	1.304	1.320	Estable a corto plazo
	Combinación SM y SP	0.932	0.995	0.948	0.958	Inestable
	Combinación SM y ST	0.738	0.685	0.673	0.699	Inestable

Talud	Escenario	Métodos de Equilibrio Límite – Factor de Seguridad			Factor de Seguridad Promedio	Condición de Estabilidad
		Bishop Simplificado	Spencer	LE/Morgenstern-Price		
Talud Crítico N°05	Estado Natural (EN)	1.606	1.656	1.632	1.631	Estable a largo plazo
	Saturación Parcial (SP)	1.311	1.372	1.340	1.341	Estable a corto plazo
	Saturación Total (ST)	1.141	1.192	1.137	1.157	Estable relativo
	Sismicidad Máxima (SM)	1.268	1.337	1.279	1.295	Estable relativo
	Combinación SM y SP	1.127	1.296	1.139	1.187	Estable relativo
	Combinación SM y ST	0.941	1.020	0.919	0.960	Inestable
Talud Crítico N°06	Estado Natural (EN)	1.808	2.149	2.158	2.038	Estable a largo plazo
	Saturación Parcial (SP)	1.648	1.883	1.874	1.802	Estable a largo plazo
	Saturación Total (ST)	1.277	1.306	1.308	1.297	Estable relativo
	Sismicidad Máxima (SM)	1.533	1.547	1.551	1.544	Estable a largo plazo
	Combinación SM y SP	1.354	1.438	1.376	1.389	Estable a corto plazo
	Combinación SM y ST	1.036	0.997	1.030	1.021	Estable relativo
Talud Crítico N°07	Estado Natural (EN)	1.883	2.084	2.087	2.018	Estable a largo plazo
	Saturación Parcial (SP)	1.539	1.673	1.563	1.592	Estable a largo plazo
	Saturación Total (ST)	1.120	1.126	1.098	1.115	Estable relativo
	Sismicidad Máxima (SM)	1.509	1.524	1.642	1.558	Estable a largo plazo
	Combinación SM y SP	1.214	1.292	1.250	1.252	Estable relativo
	Combinación SM y ST	0.855	0.828	0.854	0.846	Inestable
Talud Crítico N°08	Estado Natural (EN)	1.995	2.254	2.301	2.183	Estable a largo plazo
	Saturación Parcial (SP)	1.626	1.666	1.642	1.645	Estable a largo plazo
	Saturación Total (ST)	1.352	1.372	1.377	1.367	Estable a corto plazo
	Sismicidad Máxima (SM)	1.610	1.672	1.605	1.629	Estable a largo plazo
	Combinación SM y SP	1.297	1.344	1.285	1.309	Estable a corto plazo
	Combinación SM y ST	1.168	1.136	1.096	1.133	Estable relativo

Los resultados obtenidos en Condiciones Normales, comprende taludes que se encuentran estables a largo plazo, debido a que el Factor de Seguridad es superior a 1.5 (Figura 102). Los taludes 01, 02, 03, 04 y 05 corresponden litológicamente a calizas de la Formación Chúlec y Pariatambo los cuales presentan menor rango de Factor de Seguridad, influenciadas principalmente por factores geométricos; así como, por evidenciar estructuras muy blocosas con espaciamientos que varían en el rango de 02 - 06 m y superficies moderadamente meteorizadas. Los taludes 06, 07 y 08 están compuestos por calizas del Grupo Pulluicana, presentan espaciados más amplios que varían en rango de 06 – 2 m por lo que las estructuras son menos blocosas con superficies ligeramente meteorizadas, lo que les otorga un rango de Factor de Seguridad mayor a 2.

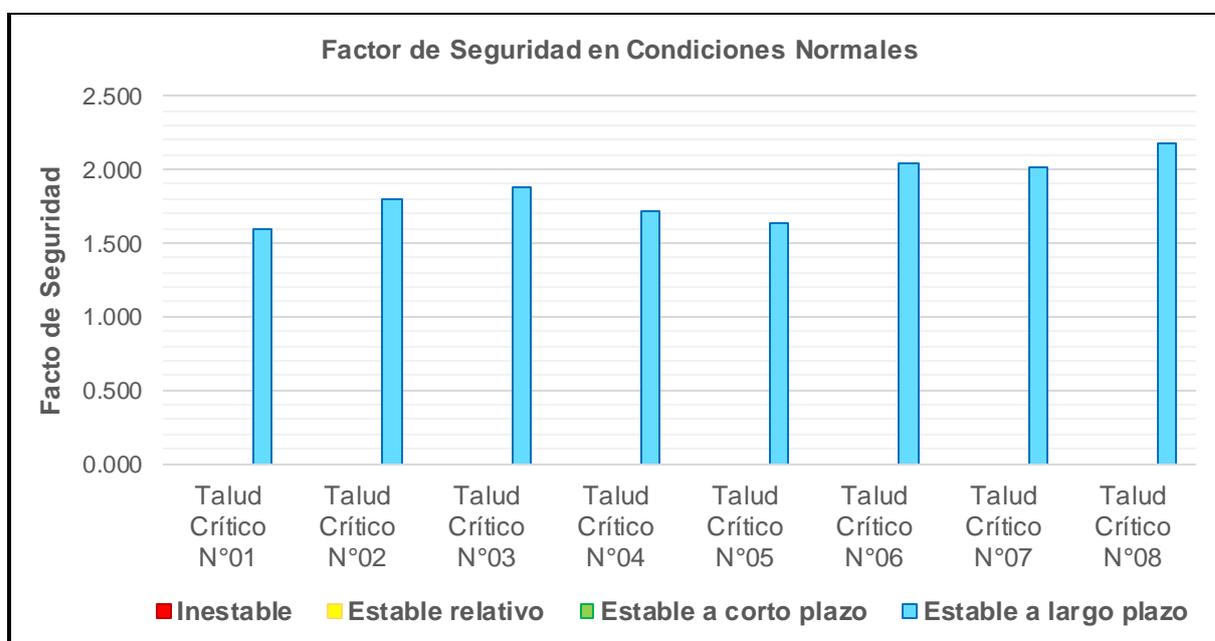


Figura 103: Factor de Seguridad para cada talud crítico en condiciones normales.

En Condiciones de Saturación Parcial, los Taludes Críticos 01 y 04 presentan estabilidad relativa al encontrarse en el rango de 1.0 - 1.3, los Taludes Críticos 02, 03 y 05 son estables a corto plazo, se encuentran en el rango de 1.3 - 1.5 y los Taludes Críticos 06, 07 y 08 son estables a largo plazo con rango mayor a 1.5 de Factor de Seguridad (Figura 103). El agua subterránea influye en la estabilidad de los taludes, disminuyendo la resistencia a la compresión, resistencia al corte y aumentando su densidad; por lo tanto, aumentan los esfuerzos que provocan el deslizamiento; sin embargo, en la zona de investigación, los taludes mantienen la estabilidad.

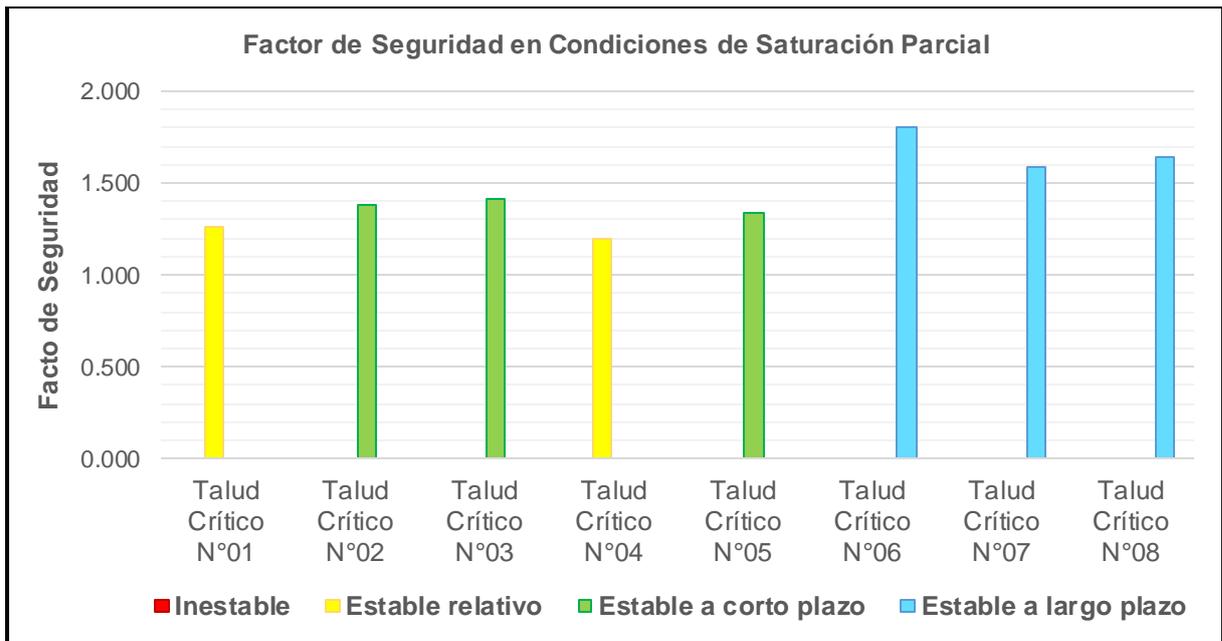


Figura 104: Factor de Seguridad para cada talud crítico en condiciones de saturación parcial.

Los resultados obtenidos en Condiciones de Saturación Total, muestran a los Taludes Críticos 01, 02 y 04 con un alto grado de inestabilidad por debajo de 1.0 en Factor de Seguridad (Figura 104). El incremento de la densidad, la fuerza de infiltración del agua, la presión de poros y la reducción de la resistencia a la cortante al disminuir considerablemente la cohesión, son los principales factores que influyen en la inestabilidad de los taludes.

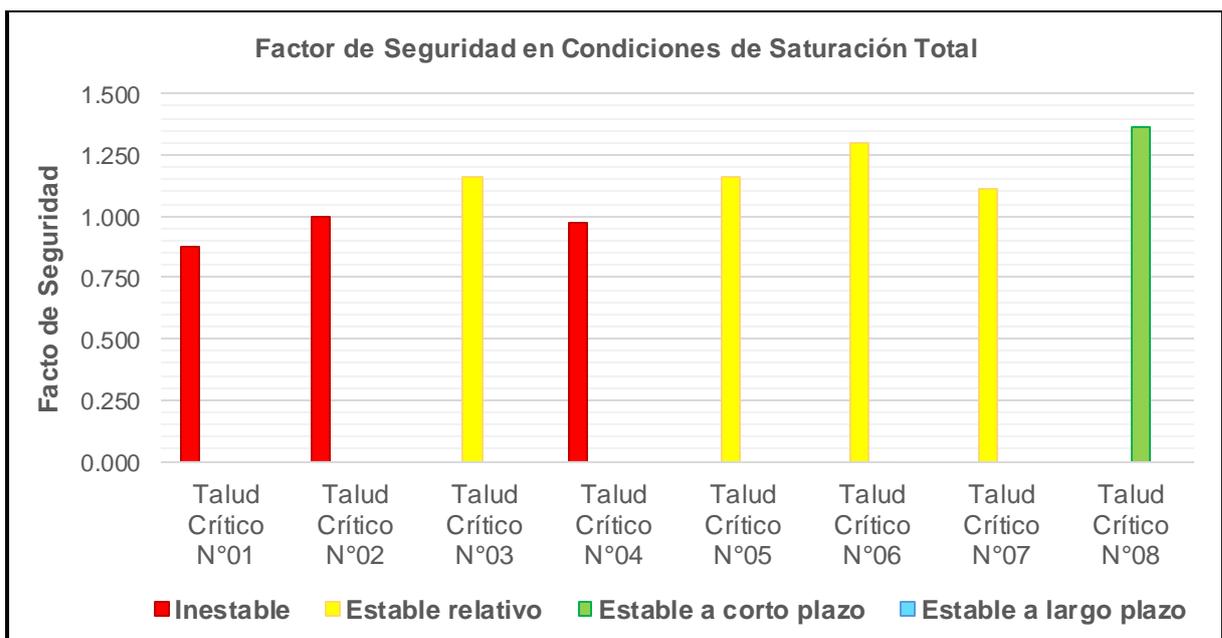


Figura 105: Factor de Seguridad para cada talud crítico en condiciones de saturación total.

En Condiciones de Sismicidad Máxima, se agregó el coeficiente sísmico en sus componentes horizontal (0.175) y vertical (0.088), aumentando los esfuerzos y reduciendo la resistencia de los taludes generando la falla progresiva. Los Taludes Críticos 01 y 05, presentan estabilidad relativa, los Taludes Críticos 02 y 04, estabilidad a corto plazo y los Taludes Críticos 03, 06, 07 y 08, estabilidad a largo plazo (Figura 105). Siendo los parámetros geométricos y la reducción de la cohesión y el ángulo de fricción, los factores que influyen con mayor incidencia en la inestabilidad de los taludes.

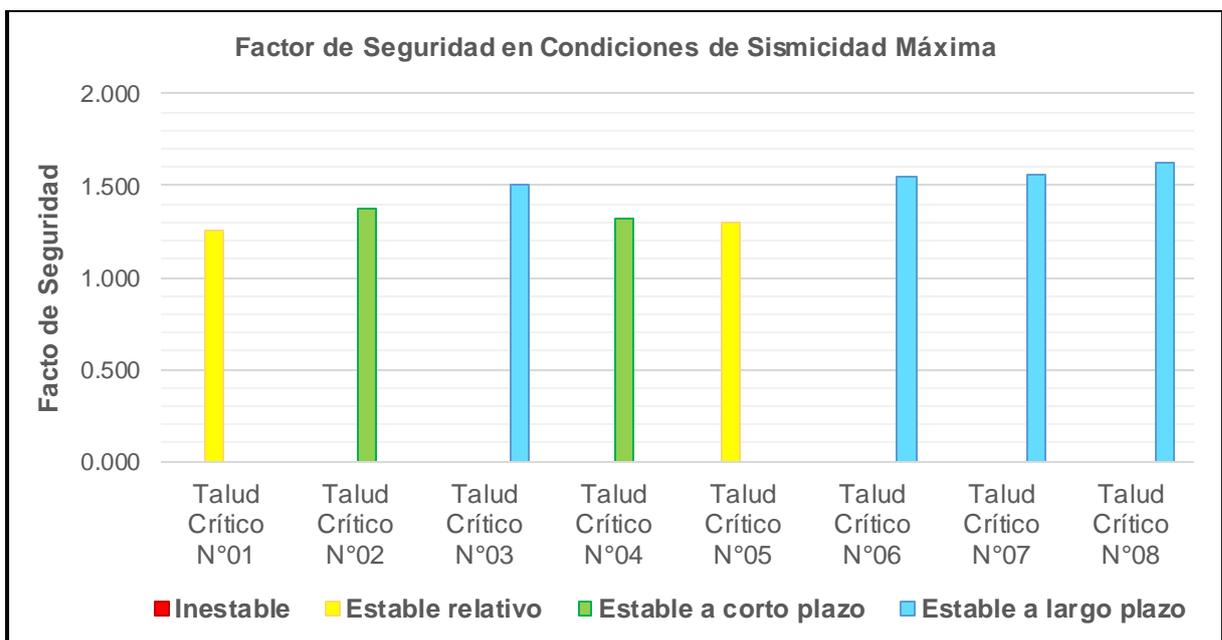


Figura 106: Factor de Seguridad para cada talud crítico en condiciones de sismicidad máxima.

La actividad sísmica y la presencia de agua como variables detonantes en la Condición de Saturación Parcial y Sismicidad Máxima, muestran resultados variables del Factor de Seguridad en cada talud debido a la saturación con la consecuente disminución de la resistencia al corte y el incremento de la presión de poros. La fracturación del macizo rocoso, se presenta como un efecto directo de los esfuerzos inducidos por la actividad sísmica y en temporadas lluviosas la escorrentía puede infiltrarse por las grietas, produciendo presión de poros y erosión en las fracturas. Es así que, taludes con mayor blocosidad presentan alto grado de inestabilidad en esta condición, tal es el caso del Talud Crítico 04 (Figura 106). El proceso de disminución en la resistencia al corte debido a los cambios de contenido de agua es un proceso de alta complejidad, que no fue considerado en el desarrollo de esta investigación.

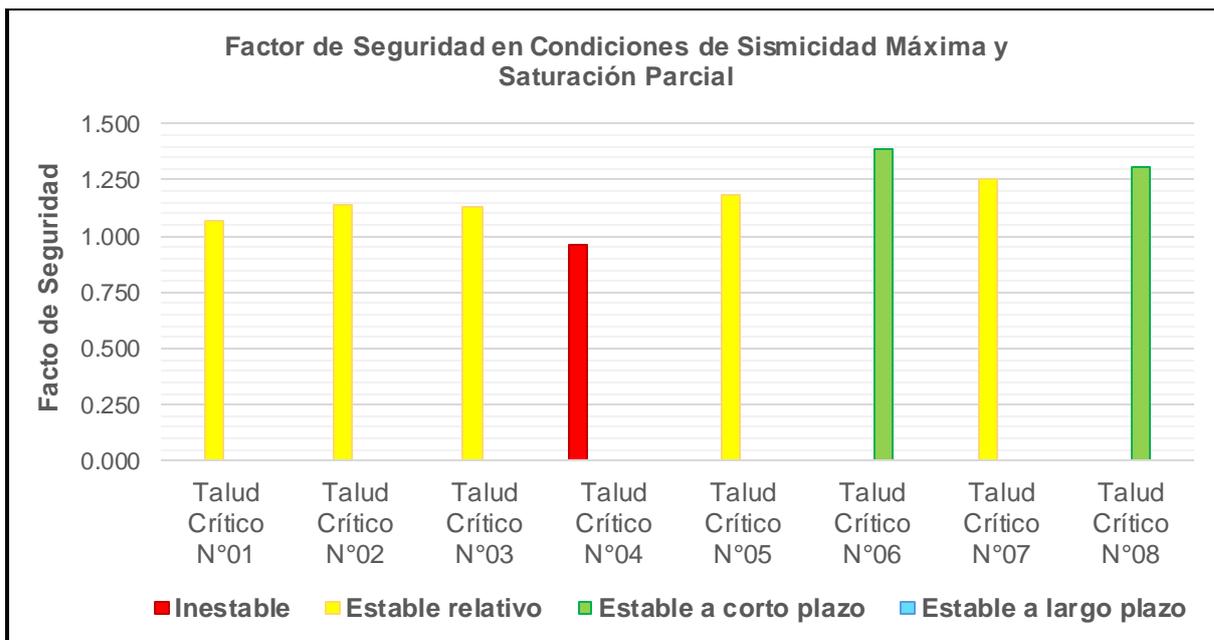


Figura 107: Factor de Seguridad para cada talud crítico en condiciones de sismicidad máxima y saturación parcial.

En Condiciones de Saturación Total y Sismicidad Máxima, los Taludes Críticos 06 y 08 presentan estabilidad relativa y los Taludes Críticos 01, 02, 03, 04, 05 y 07 son inestables con Factores de Seguridad menores a 1 (Figura 107), debido a la actividad sísmica y al aumento de la saturación por condiciones de lluvias intensas.

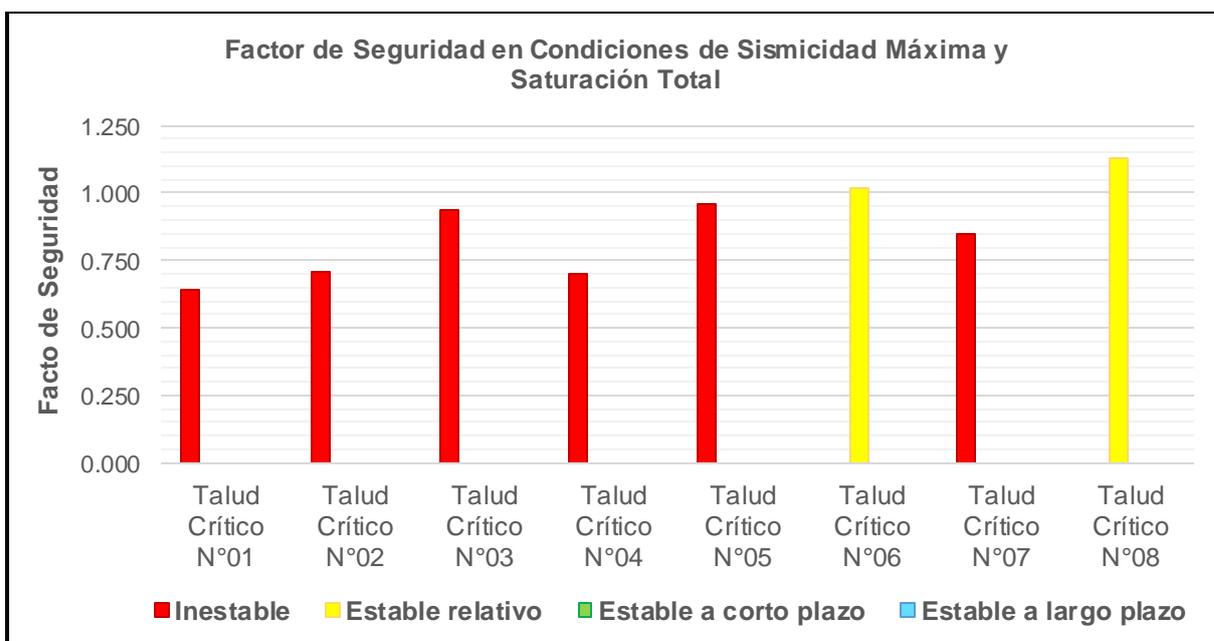


Figura 108: Factor de Seguridad para cada talud crítico en condiciones de sismicidad máxima y saturación total.

## 4.2 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Mediante la investigación realizada en la carretera El Tayal – Santa Isolina Bajo, se contrasta la hipótesis inicialmente planteada, el cual afirma que la evaluación geomecánica - geotécnica de los taludes críticos se encuentra condicionada por factores litomorfoestructurales (calizas con un grado de fracturamiento de calidad regular con condiciones superficiales ligeramente rugosas y moderadamente meteorizadas determinadas en campo a partir de las clasificaciones geomecánicas: RQD, RMR, GSI; los cuales configuran rasgos geomorfológicos que son el resultado de procesos tectónicos de compresión, y la presencia de fallas inversas de alto ángulo, sobreimpuestos por procesos geodinámicos), la sismicidad (los esfuerzos inducidos por la actividad sísmica representan un efecto directo de la fracturación del macizo rocoso, y en temporadas de lluvias, la escorrentía puede infiltrarse por las grietas, produciendo presión de poros y erosión en las fracturas) y la infiltración de agua (la presencia de agua como variable detonante, producto de las fuertes y continuas precipitaciones pluviales, incrementa la saturación disminuyendo la resistencia al corte, he incrementa la presión de poros); así mismo, los factores geométricos (altas pendientes, y cortas dimensiones del pie del talud), los cuales dan como resultado la inestabilidad de los taludes desencadenando desprendimientos y deslizamientos de rocas. Por lo cual, se verifica que se entra en una zona geotécnicamente inestable.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

La geología del área de investigación se caracteriza por presentar cuatro unidades geomorfológicas predominando la tipo Ladera con pendientes que varían de 20° a 50°, constituidas por rocas de la Formación Chúlec, Formación Pariatambo y del Grupo Pulluicana; así como Depósitos Cuaternarios recientes de origen aluvial, fluvio-aluvial y fluvial, asociadas en parte a problemas geodinámicos producto de las fuertes precipitaciones.

El comportamiento litomorfoestructural se caracteriza por presentar una secuencia calcárea y una morfología con superficies ligeramente onduladas a fuertemente empinadas, siendo el resultado de procesos tectónicos de compresión, con plegamientos de dirección predominante NO-SE y fallas inversas de alto ángulo con dirección SO-NE, lo que ha dado lugar a zonas críticas con un alto grado de fracturamiento, cuya orientación respecto al corte de los taludes se ve afectada principalmente por roturas del tipo cuña directa, seguida de roturas de tipo planar, influenciadas por el ángulo de fricción y por la orientación e inclinación del talud.

La caracterización geomecánica está definida por macizos rocosos con grado de fracturamiento de calidad regular (50 - 75%) respecto al **RQD**. De acuerdo al **RMR<sub>89</sub>**, los macizos rocosos son de Tipo III, de calidad regular, la resistencia a la compresión uniaxial varía de 50 -100 Mpa, con planos moderadamente meteorizados, ligeramente húmedos, rellenos de arcilla y ligeramente rugosos. De acuerdo al **GSI**, varían en el rango 41 - 60, definidos por bloques cúbicos formados por 3 familias de discontinuidades y presentan mayormente condiciones superficiales ligeramente rugosas y moderadamente meteorizadas.

El comportamiento geotécnico de los taludes críticos está influenciado por factores geomecánicos, los cuales determinan el comportamiento físico - mecánico de los macizos rocosos; factores geométricos, como la altura, pendiente y dirección del talud; factores litomorfoestructurales y variables desencadenantes de la filtración del agua y la sismicidad, los cuales representan un efecto directo de la fracturación del macizo rocoso y la disminución de la resistencia al corte por el incremento de la saturación.

La zonificación en estado de Saturación Total muestra inestabilidad en los Taludes Críticos 01, 02 y 04 con  $FS < 1$ . En estado de Saturación Parcial los Taludes Críticos 01 y 04 presentan estabilidad relativa, de igual manera los Taludes Críticos 01 y 05 en estado de Sismicidad Máxima presentan estabilidad relativa con  $FS$  entre 1 y 1.3. El Talud Crítico 04 en estado de Saturación Parcial y Sismicidad Máxima muestra inestabilidad, al igual que los Taludes Críticos 01, 02, 03, 04, 05, 07 en estado de Saturación Total y Sismicidad con  $FS < 1$ .

## **5.2 RECOMENDACIONES**

Ensayos triaxiales para obtener mayor precisión en la determinación de las propiedades de los macizos rocosos.

Realizar un estudio hidrogeológico detallado con el fin de evaluar el proceso de disminución en la resistencia al corte debido a los cambios de contenido de agua en los macizos rocosos, el cual no fue considerado en el desarrollo de esta investigación.

Al Instituto Vial Provincial de Chota, proponer obras de control y saneamiento a lo largo de la carretera durante los meses de ausencia de lluvias; así como, un mantenimiento periódico de las estructuras de drenajes y taludes con la finalidad de determinar y direccionar el drenaje.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- González de Vallejo, LI; Mercedes, F; Ortuño, L; Oteo, C. (2002). Ingeniería Geológica. 1 ed. Madrid, España, Pearson Education. p. 117-262, 430-469.
- Goodman, R; Bray, J. (1976). Toppling of Rock Slopes. Proceedings of the Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes. 2:201-234.
- Hoek, E. (1994). Strength of Rock and Rock Masses. ISRM News Journal 2(2):4-10.
- Hoek, E. (2007). Practical Rock Engineering (en línea, sitio web). s. n. t. 341 p. Consultado 13 jun. 2018. Disponible en <https://www.rocscience.com/learning/hoek-corner/course-notes-books>.
- Hoek, E; Bray, J. (1981). Rock Slope Engineering. 3 ed. Londres, Inglaterra, The Institution of Mining and Metallurgy. p. 22 - 45.
- Hoek, E; Brown, ET. (1997). Practical Estimates of Rock Mass Strength. International Journal Rock Mechanics Mining Science 34(8):1165-1186.
- Hoek, E; Brown, ET. (1980). Excavaciones Subterráneas en Roca. Dely, R (trad.). 1 ed. Londres, Inglaterra, McGraw-Hill Book. p. 21-35.
- Hoek, E et al. (2002). Hoek - Brown Failure Criterion - 2002 Edition. NARMS-TAC 2002: Mining and Tunnelling Innovation and Opportunity. 7-10 July 2002. 267-273.

- Hoek, E; Carter, TG; Diederichs, MS. (2013). Quantification of the Geological Strength Index Chart. Ed. rev. San Francisco, CA, USA, ARMA. 9 p. Prepared For Presentation at 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium.
- Hoek, E; Diederichs, MS. (2006). Empirical Estimation of Rock Mass Modulus. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 43(2): 203-215.
- 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. 19-24 nov. 2000. 1422-1446.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2006). Modificatoria Decreto Supremo N°003-2016-VIVIENDA. Norma E.030 Diseño Sismorresistente. s. n. t. Lima, Perú. 22 ene. p. 6-13.
- Ramírez, P; Alejano, L. (2004). Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes. Madrid, España, Universidad Politécnica de Madrid. p. 286-328.
- Rodrigo, LR. (2017). Análisis de estabilidad de taludes en la carretera Lajas - Ajipampa. Tesis de Pregrado Universidad Nacional de Cajamarca. 62 p.
- 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.
- Suárez, J. (2009). Deslizamiento: Análisis Geotécnico. 1 ed. Bucaramanga, Colombia, Universidad Industrial de Santander. p. 127-157.
- Zavala, B; Barrantes, R. (2007). Zonas Críticas por Peligros Geológicos y Geohidrológicos en la Región Cajamarca. 1 ed. Lima, Perú, INGEMMET. p. 12-20. Primer Reporte. Dirección de Geología Ambiental.

## ANEXOS

### A. **NORMATIVAS:**

**EUROCÓDIGO EN 1998-1:2004. EUROCODE 8, PARTE 1.**

**EUROCÓDIGO EN 1998-5:2004. EUROCODE 8, PARTE 5.**

**O.P.C.M. 3274 (ORDENANZA DEL PRESIDENTE DEL CONSEJO DE MINISTROS).**

### B. **TABLA RESUMEN DEL REGISTRO GEOMECÁNICO - GEOTÉCNICO**

### C. **PLANOS**

**01. Plano de Ubicación.**

**02. Plano de Accesibilidad.**

**03. Plano MDE (Modelo Digital de Elevación).**

**04. Plano de Unidades Geomofométricas.**

**05. Plano Geológico.**

**06. Plano Geomecánico.**

**07. Plano Perfiles de los Taludes Críticos.**

**08. Planos de Zonificación:**

**08-1. Condiciones Normales.**

**08-2. Condiciones De Saturación Parcial.**

**08-3. Condiciones De Saturación Total.**

**08-4. Condiciones De Sismicidad Máxima.**

**08-5. Condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad Máxima.**

**08-6. Condiciones de Saturación Total y Sismicidad Máxima.**