

Caracterización geológica, geotécnica y geomorfológica para la sectorización por tramos homogéneos. Caso de estudio: 19,7 km de la carretera que comunica al municipio de Anorí con la vereda Alto De La primavera, Antioquia.

**CARLOS DANIEL MUÑOZ SANCHEZ
ANDREA PAOLA CORREDOR BRAVO**

**Trabajo de grado para optar al título de
Geólogos**

Director

EDGAR ALLAND SÁENZ MATEUS MSc

Coasesora

MARÍA ISABEL MARÍN CERON PhD

**UNIVERSIDAD EAFIT
FACULTAD DE CIENCIAS
MEDELLÍN**

AGRADECIMIENTOS.

A nuestros padres y hermanos por todo el esfuerzo y apoyo incondicional.

A nuestro asesor Edgar Sáenz Mateus por su tiempo, por su paciencia y por su acompañamiento.

A nuestra coasesora María Isabel Marín Cerón por su apoyo, consejos y recomendaciones.

A la universidad EAFIT por los servicios prestados.

A las empresas Explanan S.A, e IRYS S.A.S. por la confianza para la realización del trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	13
1.1 LOCALIZACION Y GENERALIDADES DEL CORREDOR.....	13
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.3 PREGUNTA DE INVESTIGACION.....	15
1.4 HIPÓTESIS.....	15
1.5 OBJETIVOS.....	16
1.5.1 <i>General</i>	16
1.5.2 <i>Específicos</i>	16
1.6 METODOLOGIA.....	16
1.6.1 <i>Primera etapa (pre-campo)</i>	16
1.6.2 <i>Segunda etapa (pre-campo)</i>	17
1.6.3 <i>Tercera etapa (campo)</i>	17
1.6.4 <i>Cuarta etapa (post-campo)</i>	17
1.6.5 <i>Quinta etapa (post-campo)</i>	17
1.6.6 <i>Sexta etapa (post-campo)</i>	17
2 GENERALIDADES	19
2.1 LOCALIZACIÓN Y VIAS DE ACCESO.....	19
2.2 HIDROGRAFÍA.....	20
2.2.1 <i>Acumulación de flujo</i>	22
2.2.2 <i>Dirección de flujo</i>	24
2.2.3 <i>Orden de drenaje según Strahler</i>	25
3 GEOLOGIA REGIONAL	27
3.1 UNIDADES LITOLÓGICAS.....	27
3.1.1 <i>Paleozoico</i>	27
3.1.1.1 <i>Jurásico</i>	28
3.1.2 <i>Cretácico</i>	29
3.1.3 <i>Cuaternario</i>	30
3.2 GEOLOGIA ESTRUCTURAL.....	30
3.2.1 <i>Fallas</i>	30
3.2.2 <i>Lineamientos</i>	30
3.2.3 <i>Foliación</i>	31
3.2.4 <i>Plegamientos</i>	31
4 GEOMORFOLOGIA	32
4.1 MORFOGENESIS.....	32
4.2 MORFOMETRIA.....	33
4.2.1 <i>Aspecto</i>	33
4.2.2 <i>Curvatura</i>	34
4.2.3 <i>Hillshade</i>	35

4.2.4	<i>Pendiente</i>	36
4.3	MORFODINAMICA	37
4.4	MORFOGRAFIA	44
4.4.1	<i>Geoformas de Origen Denudacional</i>	47
4.4.2	<i>Geoformas de origen estructural</i>	50
5	GEOLOGIA LOCAL	51
5.1	UNIDADES LITOLÓGICAS	52
5.2	GEOLOGIA ESTRUCTURAL	55
6	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA	82
6.1	EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO	82
6.2	ENSAYOS DE LABORATORIO	83
6.3	VARIACIONES DEL ENSAYO SPT	92
6.4	CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO	95
6.4.1	<i>Variación de la humedad</i>	96
6.4.2	<i>Variación del índice de plasticidad</i>	97
6.4.3	<i>Variación de la resistencia a la compresión simple (uniaxial)</i>	98
6.5	CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE LOS MACIZOS ROCOSOS	99
6.5.1	<i>RMR en estación geomecánica 1 abscisa km 14+822</i>	99
6.5.2	<i>RMR en estación geomecánica 2 abscisa km 15+100</i>	100
7	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES	101
7.1	METODOLOGÍA	101
7.1.1	<i>Factores de seguridad mínimos</i>	101
7.1.2	<i>Parámetros geotécnicos de los suelos</i>	102
7.2	TALUDES DE ANÁLISIS	103
7.2.1	<i>PERFIL TALUD 1 ABSCISA 00+200</i>	103
7.2.2	<i>PERFIL TALUDES 2 ABSCISA 01+990</i>	104
7.2.3	<i>PERFIL TALUD 3 ABSCISA 04+420</i>	106
7.2.4	<i>PERFIL TALUD 4 ABSCISA 04+410</i>	107
7.2.5	<i>PERFIL TALUD 5 ABSCISA 06+690</i>	109
7.2.6	<i>PERFIL TALUD 6 ABSCISA 09+000</i>	111
7.2.7	<i>PERFIL TALUD 7 ABSCISA 12+040</i>	112
7.2.8	<i>PERFIL TALUD 8 ABSCISA 15+400</i>	113
7.2.9	<i>PERFIL TALUD 9 ABSCISA 19+020</i>	114
7.2.10	<i>PERFIL TALUD 10 ABSCISA 14+000</i>	115
8	SECTORIZACIÓN GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA	116
8.1	SECTOR GEOLÓGICO 1 (KM 0+000 A KM 5+299)	117
8.2	SECTOR GEOLÓGICO 2 (KM 5+300 A KM 15+200)	119
8.3	SECTOR GEOLÓGICO 3 (KM 15+201 A KM 19+300)	124
9	DISCUSIÓN	127

10	IDENTIFICACIÓN DE ZODMES Y FUENTES DE MATERIALES.....	128
10.1	ZODMES (BOTADEROS).....	128
10.1.1	<i>Zodme 1</i>	128
10.1.2	<i>Zodme 2</i>	129
10.2	FUENTES DE MATERIALES.....	131
10.2.1	<i>Cantera La Ortiz</i>	131
10.2.2	<i>Fuente 1</i>	134
10.2.3	<i>Fuente 2</i>	136
11	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	138
12	BIBLIOGRAFIA.....	141
13	ANEXOS.....	143

LISTA DE FIGURAS

figura 1: Metodología a desarrollar para el proyecto de rectificación, ampliación y pavimentación de la carretera que comunica al municipio de Anorí con la vereda Alto De La Primavera.	18
figura 2: Localización del área de estudio.	20
figura 3: Quebradas y rios cercanos al área de estudio.	21
figura 4: Diferencia entre el tipo de drenaje en cercacia del area de estudio, el poligono amarillo indica que el tipo de drenaje es dendritico. El poligono azul indica que el tipo de drenaje es sub-paralelo.	22
figura 5: Celdas de acumulación de flujo. Tomado de (esri, 2016)	23
figura 6: Quebradas y rios cercanos al área de estudio que retienen la mayor acumulacion de flujo. En la parte lateral derecha se observa el rio Porce, en la parte lateral izquierda la quebrada La Soledad y en la parte centro superior el rio Anorí.	23
figura 7: codificación de la dirección de flujo. Tomado de (esri, 2016).....	24
figura 8: Dirección de flujo de las quebradas y rios cercanos al área de estudio. La mayor dirección de flujo es en sentido Este y en sentido Oeste, representado con los colores azul oscuro y verde claro.	25
figura 9: Método de clasificación de drenajes según strahler. Tomado de (esri, 2016) 26	26
figura 10: Orden de los drenajes según Strahler cercanos al área de estudio. El orden de los drenjes van del 1 al 12, predominando el orden 1-2-3.....	26
figura 11: Geología regional. Kv: Rocas volcánicas, basaltos, y lodolitas negras intercaladas con limolitas, arenitas y conglomerados. Kqd: Batolito antioqueño. K-Pm: Rocas volcánicas félsicas e intermedias al Este de la falla de Otu. T-Mbg3: Rocas metamórficas de la cordillera central, grupo pelítico. T-Mmg3: Rocas metamórficas de la cordillera central, grupo cuarzoso T-Pf: Neis intrusivo N-Sc: Rocas sedimentarias, Conglomerados, y arenitas líticas conglomeráticas intercaladas con arcillolitas, limolitas y turbas.	27
figura 12. Geología estructural de la zona.....	31
figura 13: Mapa de aspecto en la zona de estudio.....	34
figura 14: Tomado de Desktop.arcgis.com., 2008.....	34
figura 15: Mapa de curvatura en la zona de estudio.	35
figura 16: Mapa Hillshade en la zona de estudio	36
figura 17: Mapa de pendiente en la zona de estudio.....	37
figura 18: Movimientos en masa cercanos a la vía de estudio.....	38
figura 19: Combinación de bandas 6-3-4. Se definieron tres unidades predominantes. Unidad A-B-C.	45

figura 20: Estaciones de campo geomorfológicas.....	46
figura 21: Mapa de unidades geomorfológicas mejorado de (SGC, 2012).....	46
figura 22: Planicie colinada.....	47
figura 23: Ladera escarpada con alta incisión.....	48
figura 24: Ladera erosiva con alta incisión.....	48
figura 25: Ladera abruptas con alta incisión.....	49
figura 26: Ladera abruptas con alta incisión.....	49
figura 27: Ladera abruptas con alta incisión.....	49
figura 28: Ladera escarpada.....	50
figura 29: Montículos.....	50
figura 30: Lomo de falla.....	51
figura 31: Sierra.....	51
figura 32: Estaciones de campo.....	52
figura 33: La Geología del corredor vial se corresponde a la formación rocas metamórficas de la Cordillera Central al oeste de la falla Otu, unidad T-Mbg3 que se compone de esquistos grafitosos cuarzosomoscovíticos.....	53
figura 34: Afloramiento compuesto de esquistos cuarzo-sericítico grafitoso.....	53
figura 35: Esquistos cuarzo-sericítico grafitoso.....	54
figura 36: Esquistos cuarzo-sericítico grafitoso.....	54
figura 37: Depósito aluvial.....	54
figura 38: Superposición del DEM 12.5 m sobre la geología del corredor vial, la línea negra punteada representa el lineamiento identificado y como una línea punteada rojo con blanco se ilustra la vía en estudio.....	55
figura 39: Mapa topográfico a escala 1:60.000 que ilustra el lineamiento del corredor vial (línea color negro) que puede estar ejerciendo control estructural sobre el río Anorí. Con una línea punteada rojo con blanco se ilustra la vía en estudio.....	56
figura 40: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 00+000 y la abscisa 01+400.....	58
figura 41: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 01+400 y la abscisa 02+697.....	59
figura 42: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 02+697 y la abscisa 04+032.....	60
figura 43: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 04+032 y la abscisa 05+637.....	61
figura 44: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 05+637 y la abscisa 07+060.....	62

figura 45: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 07+060 y la abscisa 07+642.	63
figura 46: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 07+642 y la abscisa 08+211.	64
figura 47: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 08+211 y la abscisa 08+789.	65
figura 48: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 08+789 y la abscisa 09+688.	66
figura 49: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 09+688 y la abscisa 10+025.	67
figura 50: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 10+025 y la abscisa 10+755.	68
figura 51: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 10+755 y la abscisa 11+350.	69
figura 52: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 11+350 y la abscisa 11+899.	70
figura 53: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 11+899 y la abscisa 12+590.	71
figura 54: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 12+590 y la abscisa 13+338.	72
figura 55: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 13+338 y la abscisa 15+675.	73
figura 56: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 15+675 y la abscisa 16+644.	74
figura 57: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 16+644 y la abscisa 17+030.	75
figura 58: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 17+030 y la abscisa 18+100.	76
figura 59: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 18+100 y la abscisa 18+756.	77
figura 60: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 18+756 y la abscisa 19+580.	78
figura 61: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 18+580 y la abscisa 19+700.	79
figura 62: Diagrama de contornos que representa los polos de los planos de foliación del corredor vial. Los tonos rojos indican la mayor densidad de polos y los tonos azules la menor densidad de polos. La dirección predominante es N60°E / 28°SE.	80

figura 63: Diagrama de contornos que representa los polos de los planos de diaclasamiento del corredor vial. Los tonos rojos indican la mayor densidad de polos y los tonos azules la menor densidad de polos.....	81
figura 64: Registros geológicos de exploración del subsuelo.....	82
figura 65: Correlación SPT-1. Integración de la relación de NSPT vs. Profundidad. ...	92
figura 66: Correlación SPT-2. Integración de la relación de NSPT vs. Profundidad. ...	92
figura 67: Correlación SPT-3. Integración de la relación de NSPT vs. Profundidad. ...	93
figura 68: Correlación SPT-4. Integración de la relación de NSPT vs. Profundidad. ...	93
figura 69: Correlación SPT-5. Integración de la relación de NSPT vs. Profundidad. ...	93
figura 70: Correlación SPT-6. Integración de la relación de NSPT vs. Profundidad. ...	94
figura 71: Correlación SPT-7. Integración de la relación de NSPT vs. Profundidad. ...	94
figura 72: Correlación SPT-8. Integración de la relación de NSPT vs. Profundidad. ...	94
figura 73: Correlación SPT-9. Integración de la relación de NSPT vs. Profundidad. ...	95
figura 74: Correlación SPT-10. Integración de la relación de NSPT vs. Profundidad. .	95
figura 75: Relación humedad vs. Profundidad en 9 perforaciones.	96
figura 76: Relación índice de plasticidad vs. Profundidad.	97
figura 77: Relación límite plástico vs. Profundidad.....	98
figura 78: Perfil talud 1 Abscisa 00+200.....	103
figura 79: Perfil talud 1 con el nivel freático saturado.....	104
figura 80: Perfil talud 2 margen izquierda Abscisa 01+990.	104
figura 81: Perfil talud 2 margen izquierda con el nivel freático saturado.	105
figura 82: Perfil talud 2 margen derecha Abscisa 01+990.....	105
figura 83: Perfil talud 2 margen derecha con el nivel freático saturado.....	106
figura 84: Perfil talud 3 Abscisa 04+420.....	107
figura 85: Perfil talud 3 con el nivel freático saturado.....	107
figura 86: Perfil talud 4 margen izquierda abscisa 04+410.	108
figura 87: Perfil talud 4 margen izquierda con el nivel freático saturado.	108
figura 88: Perfil talud 4 margen derecha Abscisa 04+410.....	109
figura 89: Perfil talud 4 margen derecha con el nivel freático saturado.....	109
figura 90: Perfil talud 5 Abscisa 06+690.....	110
figura 91: Perfil talud 5 con el nivel freático saturado.....	110
figura 92: Perfil talud 6 Abscisa 09+000.....	111
figura 93: Perfil talud 6 con el nivel freático saturado.....	111

figura 94: Perfil talud 7 Abscisa 12+040.....	112
figura 95: Perfil talud 7 con el nivel freático saturado.....	112
figura 96: Perfil talud 8 Abscisa 15+400.....	113
figura 97: Perfil talud 8 con el nivel freático saturado.....	113
figura 98: Perfil talud 9 Abscisa 19+020.....	114
figura 99: Perfil talud 9 con el nivel freático saturado.....	114
figura 100: Perfil talud 10 Abscisa 14+000.....	115
figura 101: Perfil talud 10 con el nivel freático saturado.....	115
figura 102: Localización sectores geológicos dentro del corredor vial.	116
figura 103: Afloramiento que evidencia la presencia del horizonte de saprolito y transición suelo-roca, característicos del sector 1.....	117
figura 104: Afloramiento que evidencia la presencia de suelo residual en el sector 1.	118
figura 105: Drenaje que cruza la vía en el sector 1.	118
figura 106: Laderas abruptas con alta incisión sector 1.	119
figura 107: Formación aluvial entre la abscisa 05+800 y la abscisa 05+950 sector 2.	120
figura 108: Formación aluvial entre la abscisa 06+800 y la abscisa 06+820 sector 2.	120
figura 109: Afloramiento que evidencia la presencia del horizonte de saprolito y transición suelo-roca, característicos del sector 2.....	121
figura 110: Afloramiento que evidencia la presencia de suelo residual en el sector 2.	122
figura 111: Drenajes que cruzan la vía en el sector 2.	122
figura 112: Macizo rocoso característico del sector 2.	123
figura 113: Afloramiento característico del sector 3 con presencia de dos horizontes.	124
figura 114: Afloramiento característico del sector 3 con presencia de suelo residual.	125
figura 115: Drenaje que cruza la vía en el sector 3.	125
figura 116: Drenaje que cruza la vía en el sector 3.	126
figura 117: Aspecto de la zona seleccionada para disponer de los materiales sobrantes de corte. Abscisa 04+400 a 04+800.....	129
figura 118: Botadero 1.....	129
figura 119: Aspecto de la zona seleccionada para disponer de los materiales sobrantes de corte. Abscisa 07+200 a 07+600.....	130

figura 120: Zodme 2. **131**

figura 121: La cantera La Ortiz se ubica a 2,8 km de la partida de la vía principal de la cabecera municipal del municipio de Anorí con el municipio de Campamento. El polígono amarillo representa la cantera la Ortiz, el polígono rosa la cabecera municipal de Anori, la línea punteada negra los senderos y la línea punteada roja con blanco vías tipo 4. **132**

figura 122: La cantera La Ortiz. El polígono amarillo representa la cantera la Ortiz. . **132**

figura 123: La fuente 1 se ubica en el kilómetro 4+400 de la vía principal de la cabecera municipal de Anorí. El polígono amarillo representa la fuente 1, el polígono rosa la cabecera municipal de Anorí y la línea punteada roja con blanco vías tipo 4. **134**

figura 124: Fuente 1. El polígono amarillo representa la fuente 1. **135**

figura 125: La fuente 2 se ubica en el kilómetro 6+800 de la vía principal de la cabecera municipal de Anorí. El polígono amarillo representa la fuente 2, el polígono rosa la cabecera municipal de Anorí y la línea punteada roja con blanco vías tipo 4. **136**

figura 126: Fuente 2. El polígono amarillo representa la fuente 2. **136**

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Resumen de los procesos morfodinámicos activos e inactivos.	39
Tabla 2: Descripción de imagen satelital SENTINEL 2.	44
Tabla 3: Jerarquización geomorfológica del Servicio Geológico Colombiano (Carvajal. 2012).	47
Tabla 4. Variaciones del espaciado, continuidad, abertura, relleno, infiltraciones y rugosidad en las familias de diaclasas.	81
Tabla 5: Ensayos de laboratorio para la perforación SPT-1.	83
Tabla 6: Ensayos de laboratorio para la perforación SPT-2.	85
Tabla 7: Ensayos de laboratorio para la perforación SPT-3.	86
Tabla 8: Ensayos de laboratorio para la perforación SPT-4.	86
Tabla 9: Ensayos de laboratorio para la perforación SPT-5.	87
Tabla 10: Ensayos de laboratorio para la perforación SPT- 6.	88
Tabla 11: Ensayos de laboratorio para la perforación SPT- 7.	89
Tabla 12: Ensayos de laboratorio para la perforación SPT- 8.	89
Tabla 13: Ensayos de laboratorio para la perforación SPT- 9.	90
Tabla 14: Ensayos de laboratorio para la perforación SPT-10.	91
Tabla 15. Tabla resumen de las variaciones de humedad, índice de plasticidad y resistencia a la compresión simple, respecto a cada estrato.	98
Tabla 16: Parámetros geomecánicos de los materiales.	102
Tabla 17. Sectores geológicos del corredor vial.	116
Tabla 18. Columna correspondiente a la Cantera La Ortiz.	133
Tabla 19. Datos de laboratorio del material preparado como base estabilizadora con emulsión asfáltica.	134
Tabla 20. Columna correspondiente a la fuente 1 de materiales.	135
Tabla 21. Columna correspondiente a la fuente 2 de materiales.	137

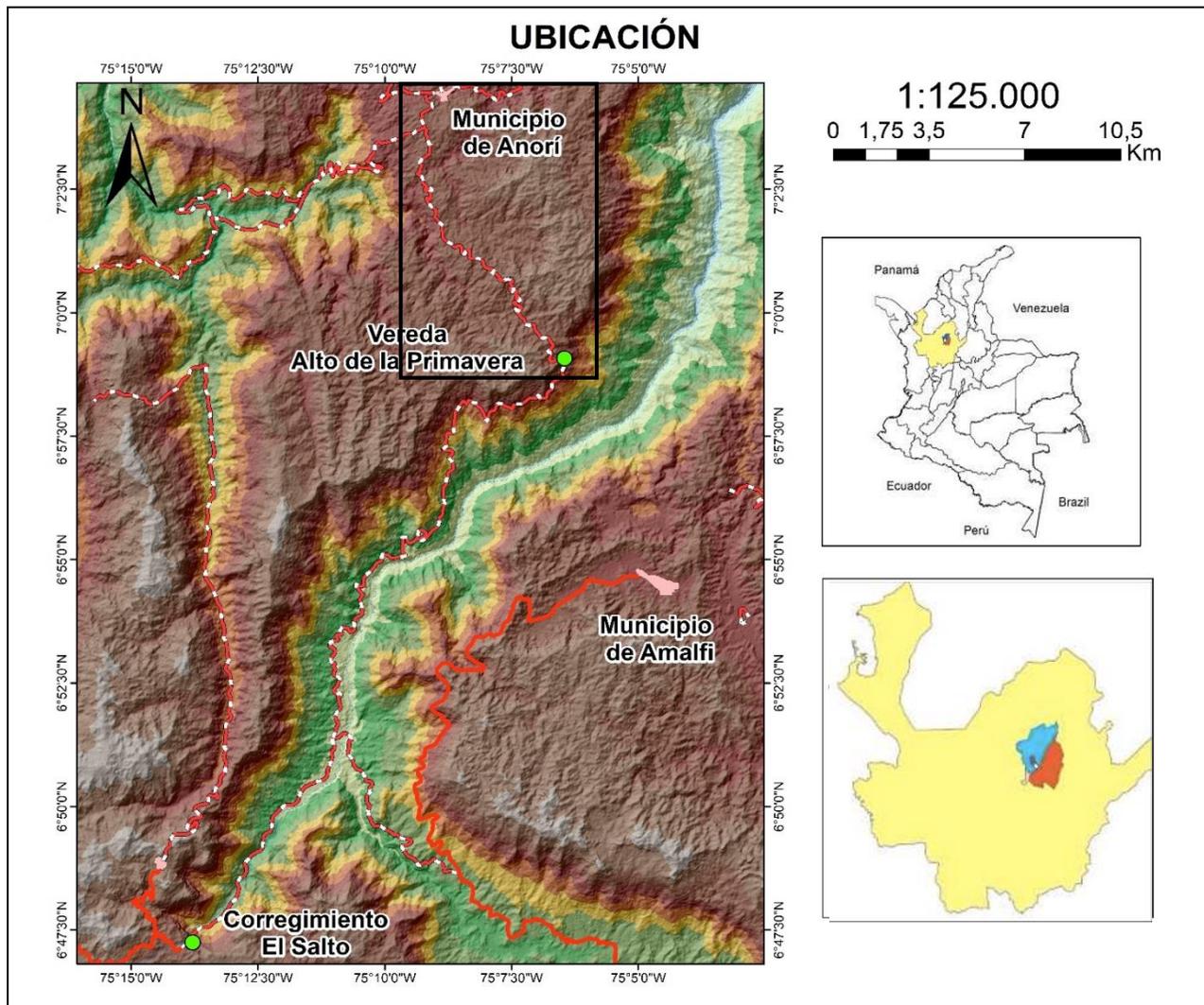
1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la gobernación de Antioquia se encuentra ejecutando el proyecto de rectificación, ampliación y pavimentación del corredor vial que comunica la cabecera municipal de Anorí con la vereda Alto De La Primavera, con una longitud de 19,7 kilómetros. El contratista es la firma Explanan S.A. y el diseñador geotécnico es la firma IRYS S.A.S. Dichas empresas pusieron a nuestra disposición la información, para desarrollar un ejercicio académico en el cual a partir de la zonificación geológica, geomorfológica y geotécnica, se proponga la sectorización del tramo vial anteriormente mencionado, en tamos homogéneos, que se conviertan en una herramienta a se para la definición de geometrías de cortes de taludes y tratamientos a analizar posteriormente por los ingenieros geotecnistas.

El estudio constó de cuatro etapas: (1) trabajo de campo para la verificación de los mapas geológicos, geomorfológicos y de zonificación por tramos homogéneos preliminares, en esta etapa se tomaron muestras (125) mediante perforaciones a percusión, distribuidas en los diferentes tramos e inspección de perfiles de los taludes existentes mediante trincheras. (2) Etapa de laboratorio: a partir de los núcleos de perforación, se seleccionaron muestras para análisis en el laboratorio (análisis de humedad, densidad, triaxial, compresión uniaxial, límite líquido, límite plástico, granulometría y clasificación S.U.C.S). (3) Etapa de modelamiento, en esta etapa se complementó la estratigrafía de cada lugar a modelar, con las características geotécnicas de cada perfil según los análisis de laboratorio. (4) Etapa de análisis de resultados, en esta etapa se proponen la geometría adecuada para los taludes por tramos homogéneos y se analizaron los sectores críticos en cada tramo. (5) Discusión y conclusiones. En esta etapa se discuten los resultados a la luz de cada tramo homogéneo y se analizan tres fuentes de materiales que cumplen con normas INVIAS y con un volumen adecuado para suplir las necesidades de la pavimentación del corredor vial. También, se propusieron dos botaderos que cumplen con los requerimientos ambientales.

1.1 LOCALIZACIÓN Y GENERALIDADES DEL CORREDOR

El municipio de Anorí está ubicado a 170,5 km al Noreste de Medellín, la capital del departamento de Antioquia. Según la clasificación de carreteras del IGAC, el corredor vial corresponde a una vía tipo cuatro por sus dimensiones de entre 2 y 5 metros de terciaria, al servir de comunicación entre municipios (Tabla 1)



Para poder realizar los trabajos de construcción de la vía, se deben hacer estudios de Geología para Ingeniería por mandato del INVIAS, pues son necesarios como insumo para llevar a cabo unos diseños geotécnicos que permitan estimar los criterios adecuados para la estabilidad de los taludes. Estos estudios deben llevar a una zonificación geotécnica, que permita reunir sectores del corredor vial con características lo más homogéneas posibles en cuanto a la conformación geológica, los niveles de meteorización, la geometría de los taludes de corte y la estabilidad en general. A partir de esta sectorización, los ingenieros geotecnistas propondrán una geometría de corte o, si es necesario, unos tratamientos para su estabilización.

Geológicamente, el corredor vial, está compuesto por rocas metamórficas del paleozoico con procesos de meteorización de moderado a intenso, donde se integran estructuras como foliaciones y diaclasas, las cuales influyen positiva o negativamente en la estabilidad del talud dependiendo de su ángulo de incidencia. Geomorfológicamente, se

caracteriza por situarse en dominios de colinas, montañas y montículos. Hidrológicamente, limita hacia el sur con el río Porce, hacia el este con el río Anorí y hacia el occidente con la quebrada La Soledad que drena sus aguas al río Nechí.

Con miras a conocer el subsuelo a intervenir, se realizaron un total de 10 perforaciones a percusión del subsuelo, de aproximadamente 7 metros de profundidad cada una, con el objetivo de definir los perfiles de meteorización existentes y tomar muestras para realizar ensayos de laboratorio; estos incluyeron análisis de humedad, densidad, triaxial, compresión uniaxial, límite líquido, límite plástico, granulometría y clasificación S.U.C.S. Así mismo, se hicieron trincheras en los taludes existentes para observar los materiales presentes.

Como parte de los estudios, se propusieron tres fuentes de materiales que cumplen con normas INVIAS y con un volumen adecuado para suplir las necesidades de la pavimentación del corredor vial. También, se propusieron dos botaderos que cumplen con los requerimientos ambientales.

Los resultados del análisis e integración de la información geológica y geotécnica obtenida de campo y en los análisis de oficina, permitieron proponer la geometría adecuada de los taludes de corte y hacer recomendaciones para el manejo de los sitios críticos.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La alta ocurrencia de movimientos en masa sobre el corredor vial y el mal estado de la carretera, impiden la comunicación de la cabecera municipal de Anorí con Medellín y municipios y corregimientos cercanos. Esta problemática recurrente genera accidentes y pérdidas económicas que impiden el desarrollo del municipio.

1.3 PREGUNTA DE INVESTIGACION

¿Con las variables geológicas, geotécnicas y geomorfológicas presentes en el corredor vial se puede zonificar y caracterizar por tramos homogéneos los 19.7 km que comunican al municipio de Anorí con la vereda Alto De La primavera, Antioquia?

1.4 HIPÓTESIS

Por medio de características del área de influencia del corredor vial como la geología, geomorfología y geotecnia, se puede sectorizar mediante tramos homogéneos para su intervención y posteriores estudios de diseño, además de sugerir el área fuente materiales y zonas de botaderos.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 General

Evaluar y valorar las variables geológicas, geomorfológicas y geotécnicas que actúan en el corredor vial con el fin de determinar zonas homogéneas.

1.5.2 Específicos

- Mapa general geológico-estructural a escala 1:1000
- Mapa general geomorfológico, morfodinámico y morfométrico en escala 1:1000
- Caracterización de los perfiles de meteorización del suelo y macizos rocosos
- Análisis de estabilidad de taludes estática.
- Tramos Homogéneos
- Discusión
- Recomendaciones y conclusiones

1.6 METODOLOGIA

Se adoptó la siguiente metodología para poder cumplir los objetivos citados en el proyecto (figura 1)

1.6.1 Primera etapa (pre-campo)

Compilación de publicaciones, archivos, información morfológica y morfométrica, mapas geológicos del servicio geológico, cartografía base del IGAC, imágenes satelitales del SENTINEL 2 del servicio geológico de Estados Unidos.

Revisión de información topográfica e informes generados en el 2010 y suministrados por el contratista Explanan S.A.

Los modelos digitales de elevación y del terreno fueron adquiridos de manera gratuita de la página Alaska Satellite Facility.

1.6.2 Segunda etapa (pre-campo)

Delimitación de unidades geológicas y geomorfológicas en el software ArcGIS versión 10.3, mediante la interpretación de imágenes emitidas por el satélite Sentinel-2, fotografías aéreas y DEM 12.5 metros.

La delimitación definió la existencia de procesos erosivos activos, unidades litológicas, geoformas en el relieve y controles estructurales de lineamientos.

Generación de una sectorización preliminar del corredor vial en tramos homogéneos

1.6.3 Tercera etapa (campo)

Reconocimiento de campo a lo largo de 20 días. Se corroboró la información adquirida en la etapa de precampo de unidades geológicas y geomorfológicas. Se estudiaron y evaluaron los procesos erosivos activos e inactivos sobre el corredor vial.

Generación la cartografía geológica y geomorfológica, levantamiento de perfiles de suelos, toma de datos de discontinuidades, clasificación geomecánica del macizo rocoso y ensayos SPT.

1.6.4 Cuarta etapa (post-campo)

Análisis de laboratorio de humedad, densidad, SPT, triaxial, uniaxial, límite líquido, límite plástico, granulometría y clasificación S.U.C.S. Realizado por MB perforaciones S.A.S. e Integral.

Elaboración de perfiles y modelos geotécnicos con el análisis de los ensayos de laboratorio, clasificación geomecánica e información de campo.

1.6.5 Quinta etapa (post-campo)

Análisis de estabilidad de taludes estáticos por equilibrio límite, saturados y sin saturar, haciendo uso del Software Slide de Rocscience. Sus insumos principales son la estratigrafía del subsuelo, y los parámetros geotécnicos de cohesión, ángulo de fricción y densidad.

1.6.6 Sexta etapa (post-campo)

Redefinición de sectores geológicos, geotécnicos y geomorfológicamente homogéneos, con base en la integración de la información secundaria, topografía, y toda la información recopilada en la de campo.

Recomendación de una posible fuente de materiales y botaderos.

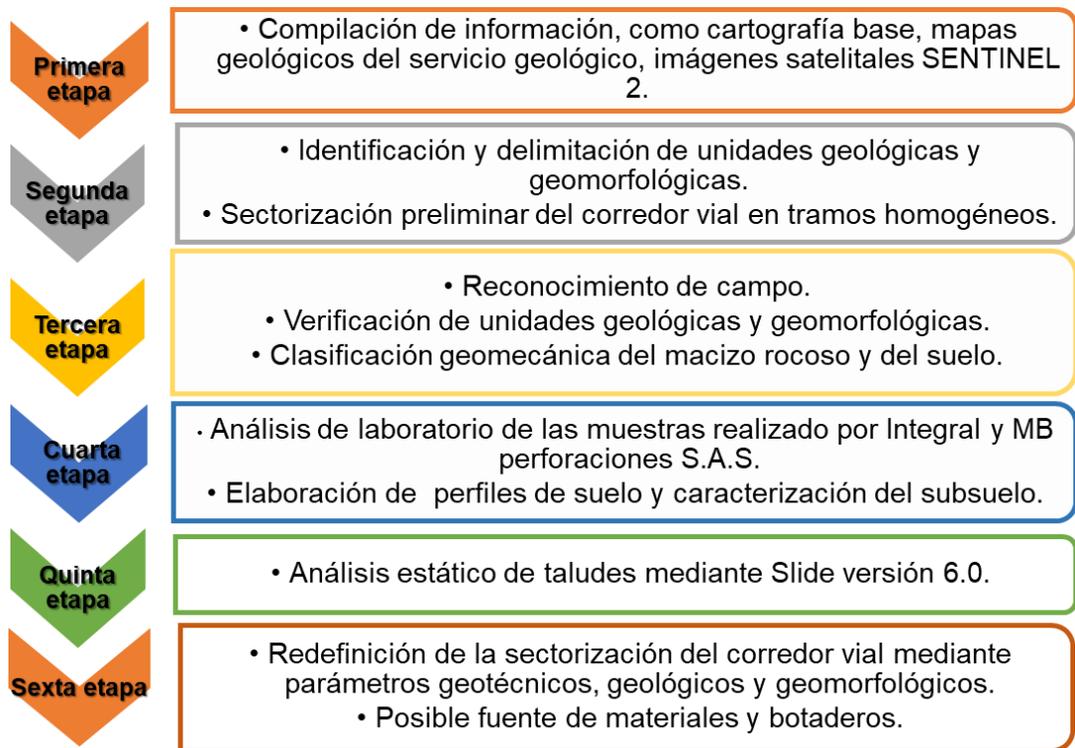


figura 1: Metodología a desarrollar para el proyecto de rectificación, ampliación y pavimentación de la carretera que comunica al municipio de Anorí con la vereda Alto De La Primavera.

2 GENERALIDADES

2.1 LOCALIZACIÓN Y VIAS DE ACCESO

La zona de estudio se localiza en el Nordeste antioqueño, sobre el flanco izquierdo de la Cordillera Central, entre la cabecera municipal del municipio de Anorí y la vereda Alto de la Primavera. El municipio de Anorí limita hacia el norte con los municipios de Tarazá, Cáceres y Zaragoza, hacia el este con los municipios de Amalfi y Segovia, hacia el sur con los municipios de Amalfi, Campamento y Angostura y hacia el oeste con el municipio de Valdivia y Tarazá. Fisiográficamente limita al Sureste por el cañón del río Porce, al oeste por los frentes de erosión de los ríos Nechí, la quebrada La Soledad y al este por el valle del río Anorí.

La extensión municipal es de 1.430 km², que corresponden al área urbana el 28% y al área rural el 72%, distribuidos en 51 veredas y un corregimiento; caracterizándose como una de las municipalidades con mayor extensión dentro del contexto departamental (Alcaldía de Anorí - Antioquia, s.f.).

La vereda Alto de la Primavera, se localiza al suroccidente del casco urbano de Anorí, sobre la vía que comunica a Anorí con la ciudad de Medellín. La zona de estudio corresponde a la plancha topográfica 1171C y 1171A, Medellín Noroccidental.

Como vía principal de acceso, se encuentra la vía Medellín- Anorí que comunica la cabecera municipal con la capital del departamento y municipios como Bello, Girardota, Barbosa, Porce, los Mangos, Puente Acacias. La distancia total en línea recta entre Anorí y Medellín es de 104,64 km y la distancia total en ruta es de 166 km. Como vías secundarias de acceso, se encuentran la vía Anorí- Yarumal-Medellín, con una distancia en ruta de 171,3 km, la vía Anorí-Amalfi con una distancia en ruta de 82,7 km y la vía Anorí-Campamento con una distancia en ruta de 27,6 km. (Alcaldía de Anorí - Antioquia, s.f.)

El crecimiento poblacional de la zona se da alrededor de las vías de acceso del municipio, se han consolidado de esta forma centros veredales que anteriormente solo se nombraban caseríos (Alcaldía de Anorí - Antioquia, s.f.).

En la figura 2 se observa en la parte lateral derecha de color amarillo el departamento de Antioquia, de color azul el municipio de Anorí y de color naranja el municipio de Amalfi. La vía en estudio está representada en el mapa con color negro y puntos blancos y se localiza dentro del municipio de Anorí, a unos kilómetros del límite con el municipio de Amalfi (en el mapa el límite entre estos dos municipios está representado con una línea roja). Esta vía consta de 19,7 km de longitud y es una carretera tipo 4, es decir; presenta de 2 a 5 metros de ancho sin pavimentar, según la clasificación de carreteras del IGAC. En el mapa los tonos rojos representan las mayores alturas (\pm 1700 msnm) y los tonos azul claro y blanco representan las menores alturas (\pm 1100 msnm).

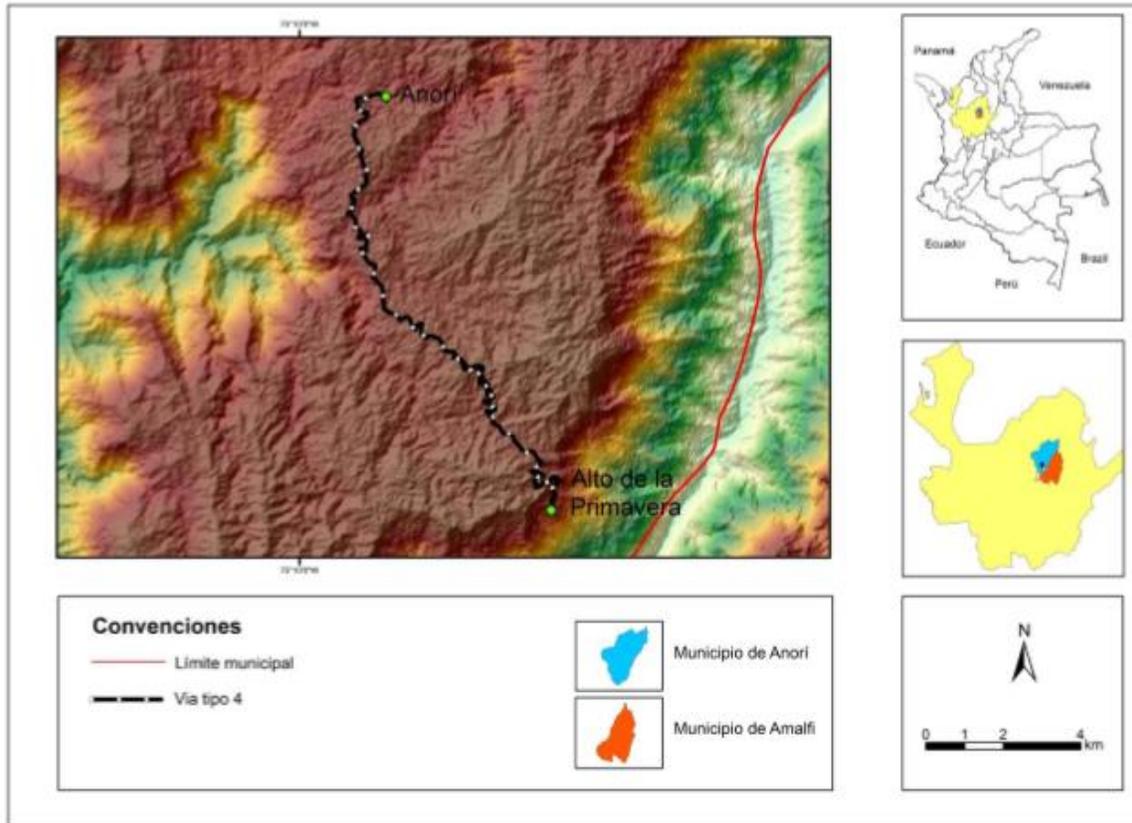


figura 2: Localización del área de estudio.

2.2 HIDROGRAFÍA

La zona oriental de la vía en estudio presenta drenajes subparalelos, paralelos y dendríticos, que descargan en el río Porce y en el río Anorí. La zona occidental de la vía presenta drenajes dendríticos que drenan hacia la quebrada La soledad y hacia el río Porce. El río Anorí descarga sus aguas al río Porce y la quebrada la Soledad al río Nechi.

El patrón de drenaje dendrítico está formado por una corriente principal con sus afluentes primarios y secundarios uniéndose libremente en todas direcciones. Esto indica que la pendiente del área es moderadamente inclinada y está compuesta de materiales uniformes. Son cursos pequeños, cortos e irregulares, que andan en todas las direcciones, cubren áreas amplias y llegan al río principal formando cualquier ángulo. En el patrón de drenaje paralelo, los canales tienen una dirección definida por la pendiente regional del terreno, cuando mayor es la pendiente en una dirección, mayor y más paralelos son los canales, es dominado por altas elevaciones e inclinaciones. En el patrón de drenaje subparalelo los cursos tributarios se ramifican formando ángulos agudos con el cauce principal o tributario de mayor orden, en algunos casos las pendientes no son lo suficientemente paralelas, lo cual influye en que los drenajes se tornen casi paralelos al cauce al cual confluyen (Farfan, 2008)

En la figura 3 se ilustran las quebradas y ríos cercanos al área de estudio correspondiente al corredor vial.

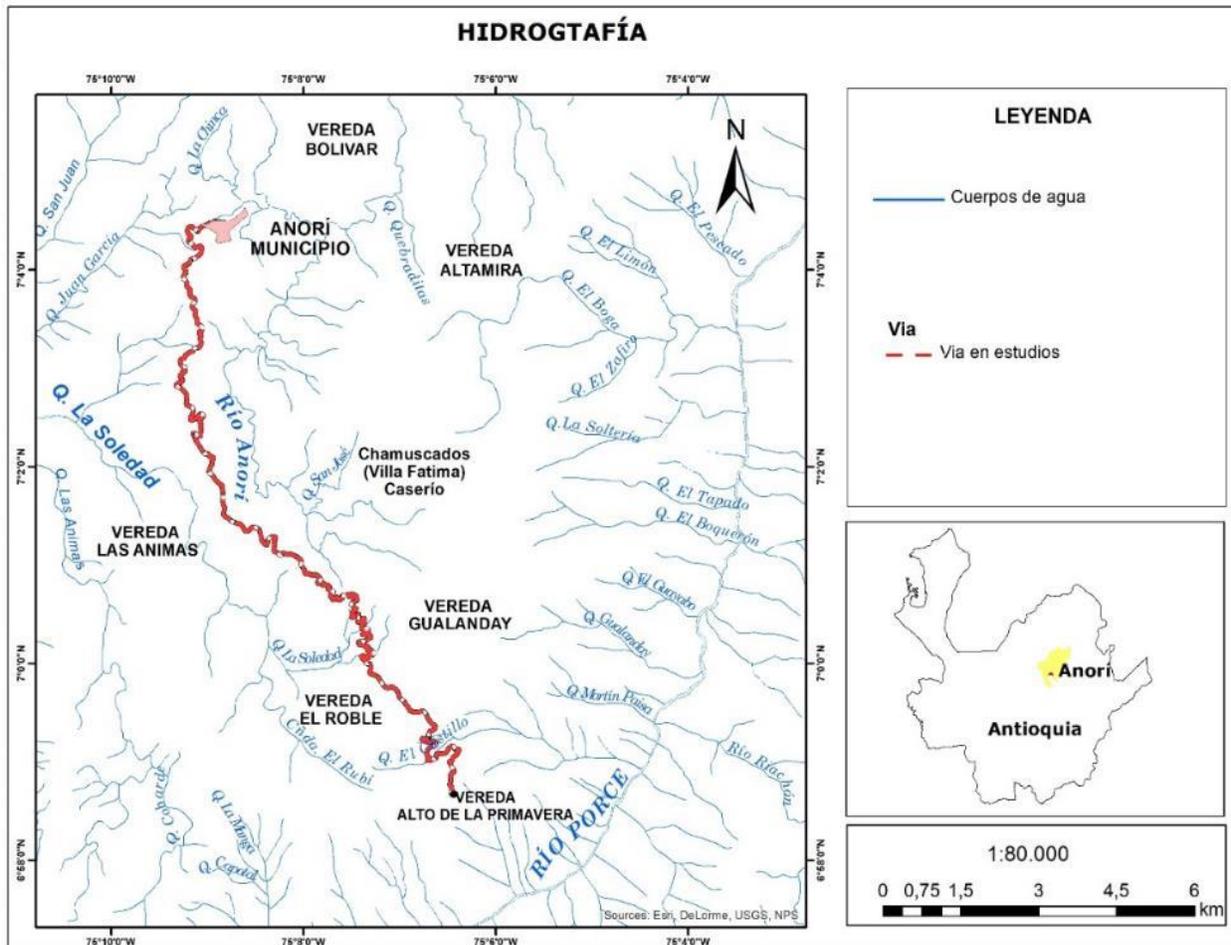


figura 3: Quebradas y ríos cercanos al área de estudio.

Los drenajes paralelos y subparalelos están influenciados por las altas pendientes que dominan el valle del río Porce, por el contrario, los drenajes dendríticos están influenciados por pendientes moderadas, y se unen libremente en diferentes direcciones hacia el río Anorí y la quebrada La Soledad figura 4.

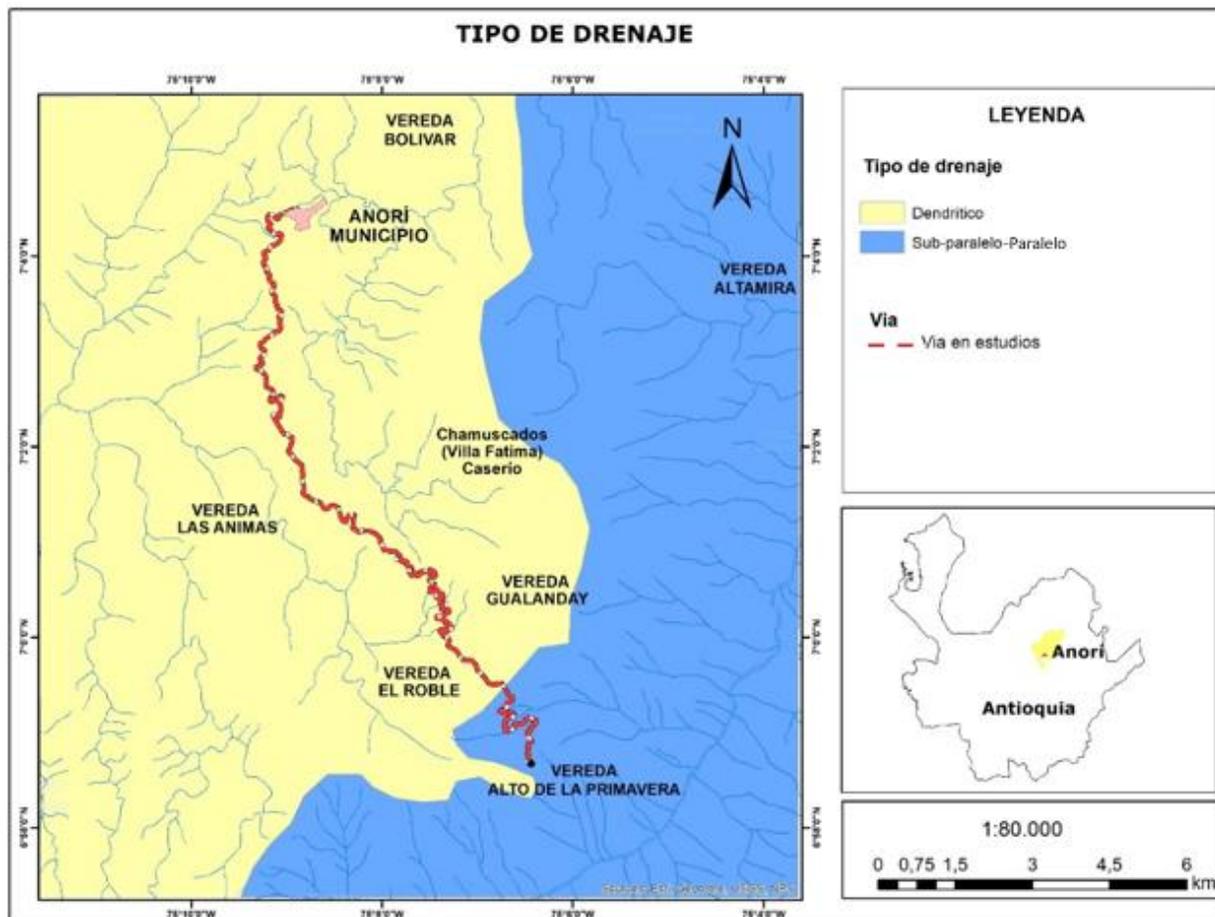


figura 4: Diferencia entre el tipo de drenaje en cercacia del area de estudio, el poligono amarillo indica que el tipo de drenaje es dendritico. El poligono azul indica que el tipo de drenaje es sub-paralelo.

2.2.1 Acumulación de flujo.

La herramienta acumulación de flujo calcula el flujo acumulado como el peso acumulado de todas las celdas que fluyen en cada celda de pendiente descendente en el ráster de salida.

Las celdas con una acumulación de flujo alta son áreas de flujo concentrado y pueden ser útiles para identificar canales de arroyos. Las celdas con una acumulación de flujo de 0 son alturas topográficas locales y se pueden utilizar para identificar crestas, ver figura 5 (esri, 2016).

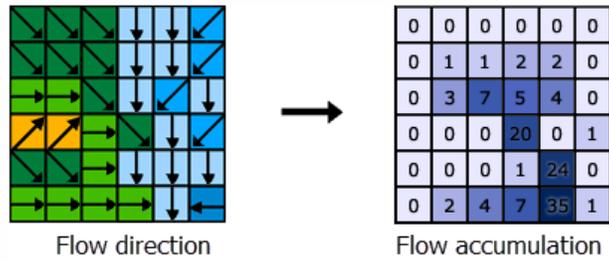


figura 5: Celdas de acumulación de flujo. Tomado de (esri, 2016)

En el mapa de acumulación de flujo de Anorí pueden identificarse de color blanco los drenajes que tiene mayor acumulación en el área de estudio, siendo estos el río Porce, la quebrada La soledad y el río Anorí (figura 6)

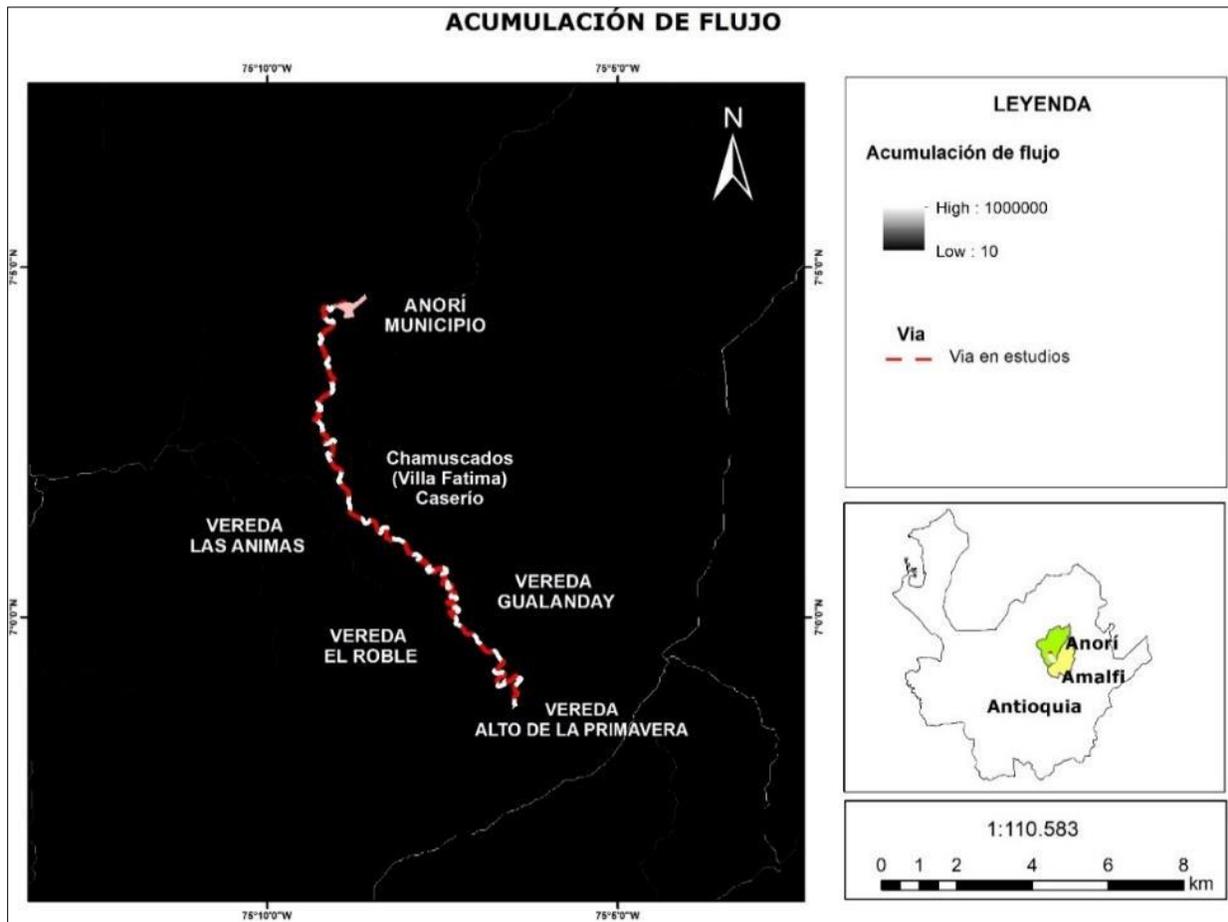


figura 6: Quebradas y rios cercanos al área de estudio que retienen la mayor acumulación de flujo. En la parte lateral derecha se observa el río Porce, en la parte lateral izquierda la quebrada La Soledad y en la parte centro superior el río Anorí.

2.2.2 Dirección de flujo.

La dirección de flujo está determinada por la dirección del descenso más empinado, o la caída máxima, desde cada celda.

Se toma una superficie como entrada y este proporciona como salida un ráster que muestra la dirección del flujo que sale de cada celda.

Existen ocho direcciones de salida válidas que se relacionan con las ocho celdas adyacentes hacia donde puede ir el flujo. Este enfoque comúnmente se denomina el modelo de flujo de ocho direcciones (D8) (esri, 2016)

En la figura 7 se muestra la codificación de la dirección de flujo.

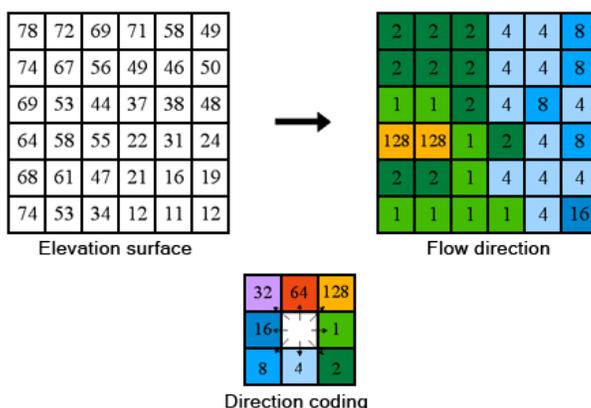


figura 7: codificación de la dirección de flujo. Tomado de (esri, 2016)

En el mapa de dirección de flujo de la figura 8, pueden identificarse ocho colores que representan las direcciones por donde drena el flujo del área de estudio, estos colores son: naranja para el norte, amarillo para el noreste, verde claro para el este, verde oscuro para el sureste, azul claro para el sur, azul intermedio para el suroeste, azul oscuro para el oeste y rosa para el noroeste. Los colores predominantes en el área son el azul oscuro y verde claro, lo cual indica que las direcciones preferenciales por donde drena el flujo son en sentido Este y Oeste.

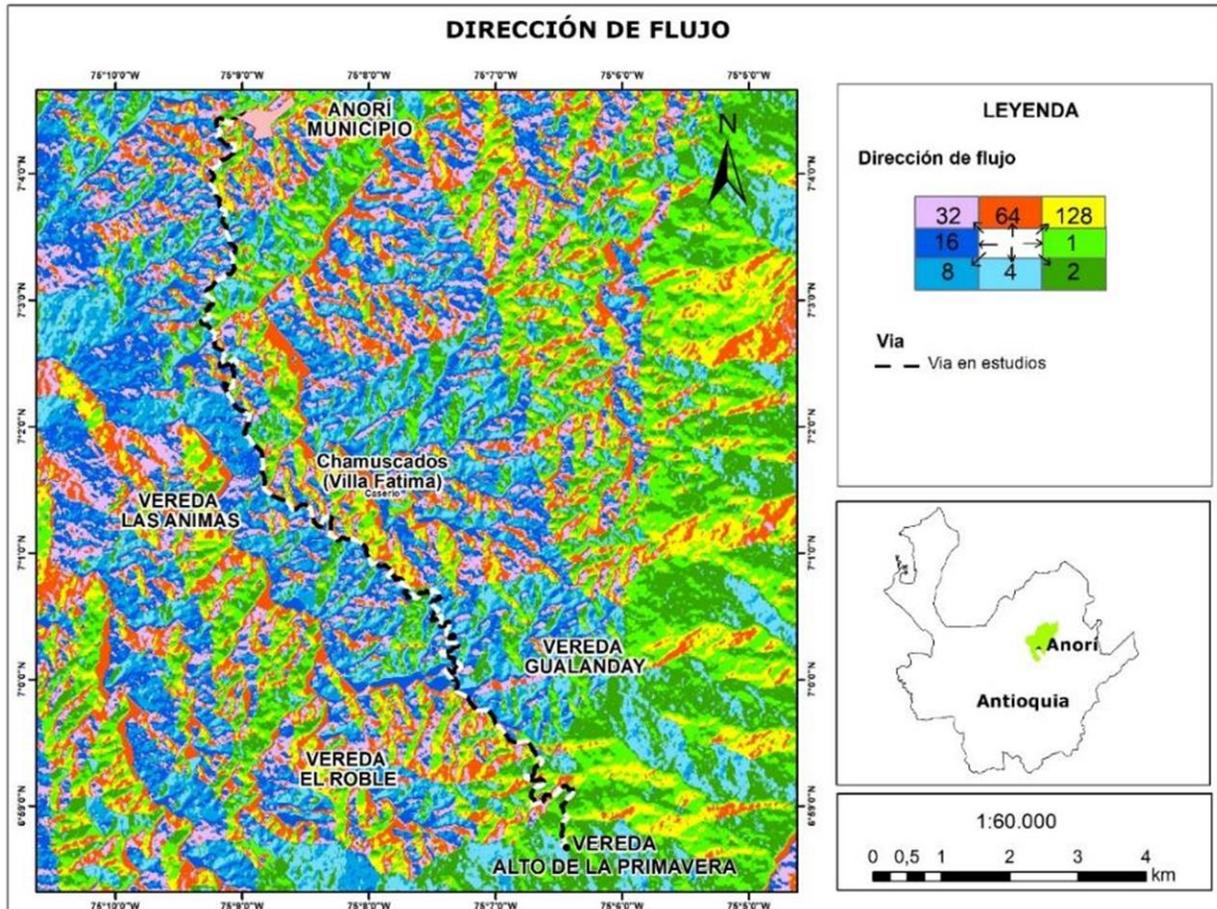


figura 8: Dirección de flujo de las quebradas y ríos cercanos al área de estudio. La mayor dirección de flujo es en sentido Este y en sentido Oeste, representado con los colores azul oscuro y verde claro.

2.2.3 Orden de drenaje según Strahler.

La clasificación de drenajes es un método que asigna un orden numérico a una red de drenajes. Este orden es un método para identificar y clasificar los tipos de drenajes basado en la cantidad de afluentes. Se pueden inferir algunas características de los arroyos simplemente al conocer el orden (esri, 2016).

Dicha clasificación puede llevarse a cabo por medio de dos métodos un método propuesto por shreve en 1966 y el otro método que fue el utilizado fue propuesto por strahler en 1957. A continuación, en la figura 9 se muestra el método de clasificación según strahler.

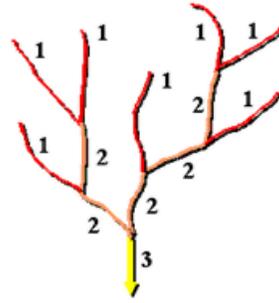


figura 9: Método de clasificación de drenajes según strahler. Tomado de (esri, 2016)

El mapa de orden de drenajes según Strahler de la figura 10 señala que hay presentes en el área de estudio órdenes de afluentes clasificados de 1 a 12 respectivamente, lo cual indica que hay drenajes dominados por altas concentraciones de flujo aguas arriba. Son sobresalientes en la zona los órdenes 1-2 y 3 representados con color lila, verde claro y rojo, lo cual apunta que la acumulación de drenajes aguas arriba es nula o baja.

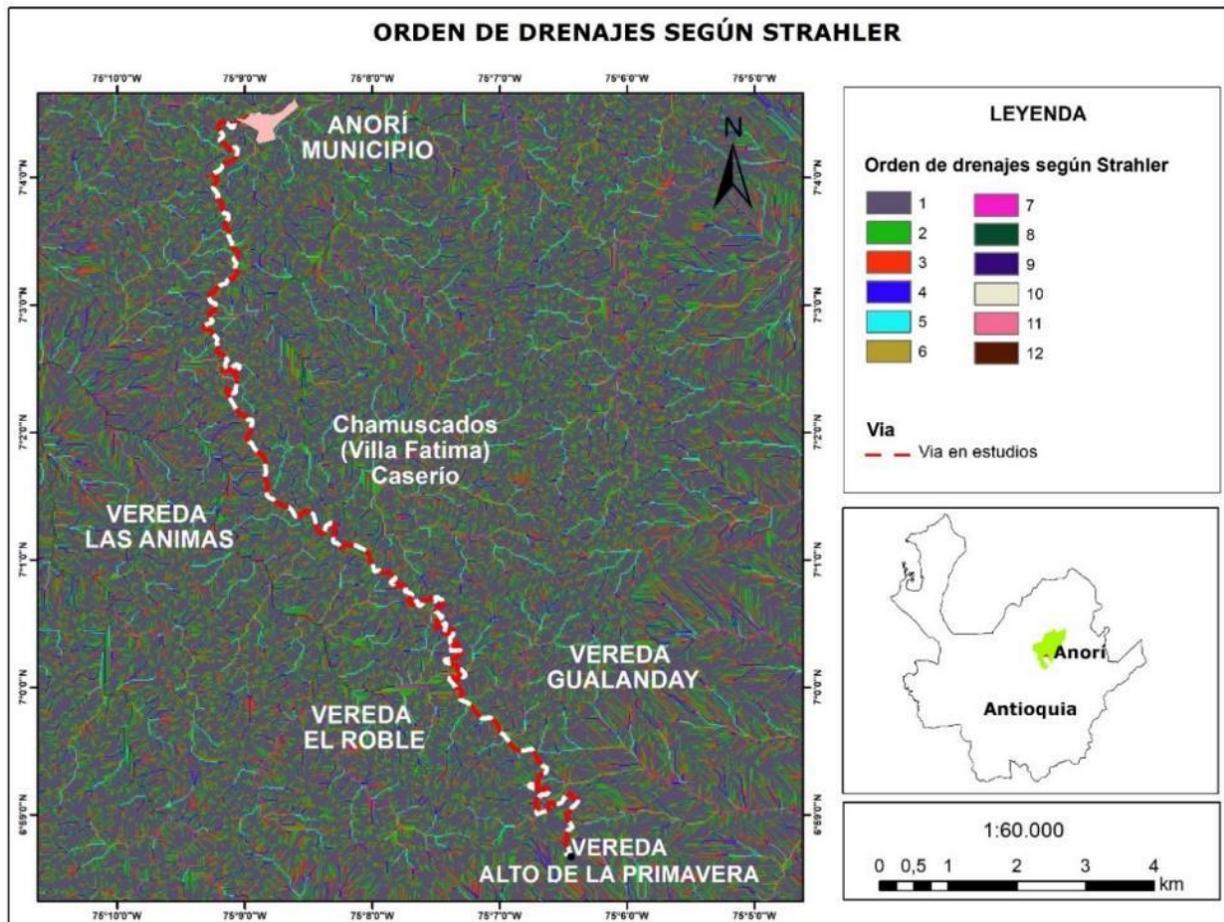


figura 10: Orden de los drenajes según Strahler cercanos al área de estudio. El orden de los drenajes van del 1 al 12, predominando el orden 1-2-3.

3 GEOLOGÍA REGIONAL

3.1 UNIDADES LITOLÓGICAS

Las unidades litológicas regionales se representan en la figura 11.

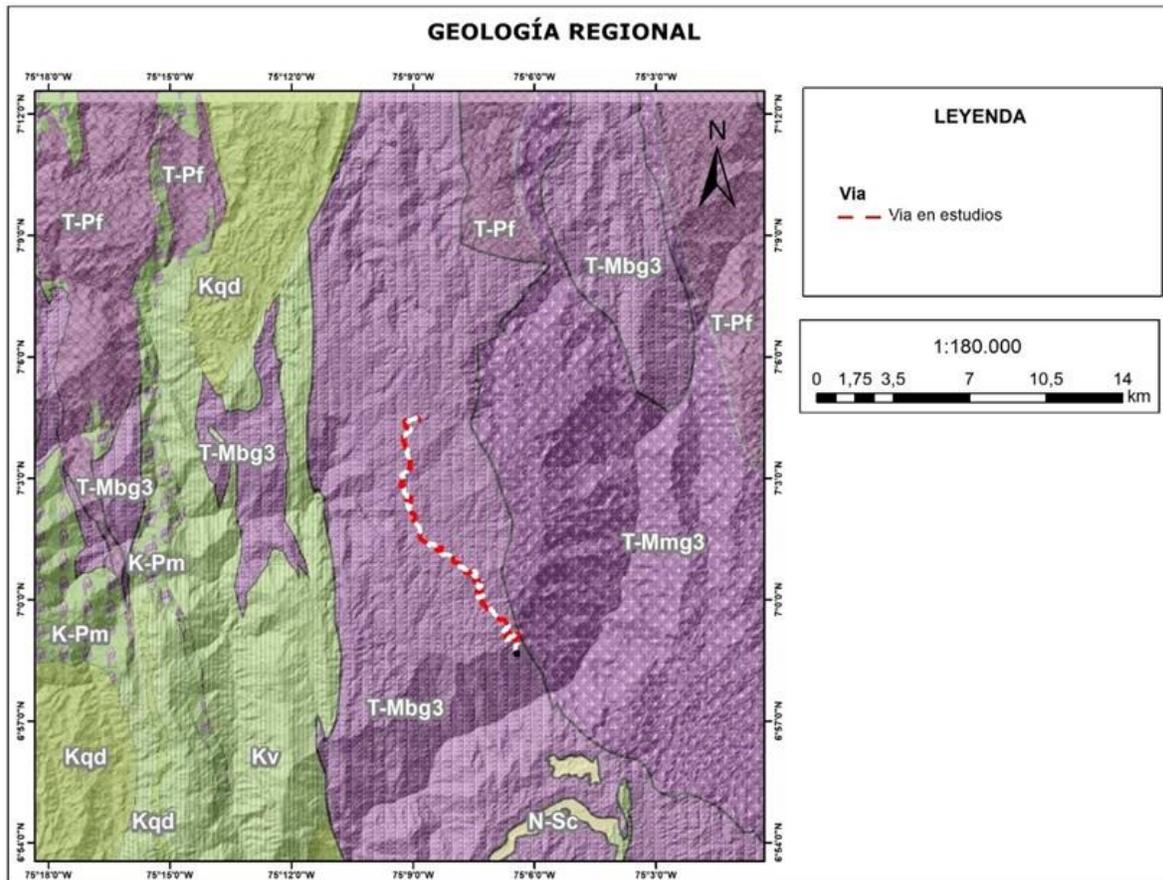


figura 11: Geología regional. Kv: Rocas volcánicas, basaltos, y lodolitas negras intercaladas con limolitas, arenitas y conglomerados. Kqd: Batolito antioqueño. K-Pm: Rocas volcánicas félsicas e intermedias al Este de la falla de Otu. T-Mbg3: Rocas metamórficas de la cordillera central, grupo pelítico. T-Mmg3: Rocas metamórficas de la cordillera central, grupo cuarzoso T-Pf: Neis intrusivo N-Sc: Rocas sedimentarias, Conglomerados, y arenitas líticas conglomeráticas intercaladas con arcillolitas, limolitas y turbas.

3.1.1 Paleozoico.

3.1.1.1 Rocas metamórficas de la cordillera central.

Fueron descritos cuatro grupos, grupo pelítico, grupo cuarzoso, grupo calcáreo y grupo máfico (Ingeominas, 1970)

- Grupo pelítico (T-Mbg3): Esquistos sericíticos, neises feldespáticos y alumínicos y parte de los neises hornblendíticos. En este cuerpo se encuentra emplazado el proyecto en estudio.
- Grupo cuarzoso (T-Mmg3): Cuarzitas, cuarcitas biotíticas de color oscuro y neises cuarzosos.

3.1.1.2 3Neis intrusivo (T-Pf)

Neis cuarzo-feldespático leucocrático de grano fino a grueso y de color gris claro a rosado. Presentan normalmente lineación en forma de lápiz de 3 a 5 mm de diámetro y de 5 a 10 cm de longitud de cuarzo ahumado en una matriz de feldespato granular u orientación representado por láminas de biotita. En algunos casos, la lineación se debe al paralelismo de los ejes de los pliegues menores (Ingeominas, 1970)

El feldespato y el cuarzo constituyen más del 85% del neis en la mayoría de los afloramientos. El feldespato potásico es ortoclasa y microclina, generalmente se encuentra fresco con textura peritítica y con evidencias de deformación mecánica. La plagioclasa varía de oligoclasa a andesina, débilmente maclada. Es común encontrar micas como biotita o moscovita, son de grano fino (Ingeominas, 1970).

3.1.1. Jurásico.

Pertencen a este las rocas volcánicas félsicas e intermedias al Este de la falla de Otu (K-Pm). Son rocas intensamente fracturadas que afloran pobremente al este de la falla Otu cerca a Puerto Berrio. Estas rocas se han subdividido provisionalmente en dos unidades: una porfirítica y otra afanítica separada por fallas de rumbo norte a noreste, quedando la unidad porfirítica hacia el oeste (Ingeominas, 1970).

La unidad porfirítica son rocas finogranulares de color gris crema y con menos de 1% hasta 30% de fenocristales. El tamaño de los fenocristales varía entre 1 y 8 mm, hay presencia de feldespatos subhedrales, biotita y hornblenda. La roca es masiva a laminada. La laminación es similar a la estructura de flujo en las lavas (Ingeominas, 1970).

La unidad Afanítica está conformada por rocas afaníticas a fino granulares, masivas, de color gris claro, gris verdoso y negro. En unos pocos lugares las rocas son porfiríticas con un 1% de fenocristales de feldespato, por lo general menores a 1 mm de diámetro. Localmente presentan una débil laminación (Ingeominas, 1970).

3.1.2 Cretácico.

3.1.2.1 Rocas sedimentarias y volcánicas.

Se definieron tres unidades: dos sedimentarias (shale, conglomerados) y una esencialmente volcánica (Ingeominas, 1970)

- Shale: Predomina un Shale orgánico de color negro, pero en algunos sectores producto de la meteorización toma un color gris, se encuentra interestratificado con chert, limolitas, areniscas grawaticas, conglomerados intraformacionales con fragmentos principalmente de shale negro, con cantos de conglomerado cuarzoso y lodolitas. El shale se encuentra intensamente plegado y fracturado (Ingeominas, 1970)
- Conglomerados (N-Sc): Interestratificados con areniscas silíceas. Presenta estratos de espesor variable de menos de un metro hasta cerca de 100 m, La mayor parte de estos conglomerados están formados por cantos, aproximadamente esféricos de cuarzo lechoso en una matriz cuarzo arenosa. El tamaño de los cantos varía entre menos de 1 cm y más de 10 cm de diámetro (Ingeominas, 1970)
- Rocas volcánicas (Kv): Son gris claras verdosas, masivas a filíticas, finogranulares a afáníticas y por lo general cizalladas, fracturadas y alteradas. Su composición es probablemente andesítica o dacítica, los minerales están alterados a clorita, y saussurita (Ingeominas, 1970)

3.1.2.2 Batolito Antioqueño (Kqd)

Este cuerpo plutónico cubre unos 8000 km en la zona septentrional de la Cordillera Central. Presenta un drenaje dendrítico típico a dendrítico subangular, revelando un débil a fuerte diaclasamiento; el cauce de los arroyos es sinuoso y amplio, los tributarios son cortos y rectos. La morfología expuesta es suavemente ondulada y redondeada debido al carácter homogéneo de la roca. El drenaje, los rasgos estructurales y texturales, así como las características erosionales (cubiertas extensas de sedimentos cuaternarios cerca a los cauces principales) (Ingeominas, 1970)

Los contactos con las rocas encajantes son fallados, son intrusivos con desarrollo de migmatitas, con gruesas bandas de cuarzo y plagioclasas entre los planos de foliación. Cerca de los contactos, dentro del Batolito Antioqueño es común encontrar rasgos de la roca encajante, mostrando características diferentes según el tipo de roca que se intruye así: son muy escasos los xenolitos de rocas metapelíticas, los cuales han sufrido un efecto granitizante por la asimilación del batolito, pero muestran algunas veces bandeamiento reliquia, visible por el enriquecimiento en biotita. El contacto con rocas básicas, que difícilmente admiten asimilación, se encuentra amplias zonas de xenolitos o gabarros en los cuales se ha producido cornubianas de grano muy fino o

recristalización con formación de cristales de hasta 5 cm de hornblenda y plagioclasa euhedrales (Ingeominas, 1970)

3.1.3 Cuaternario.

Corresponden a aluviones no consolidados que forman terrenos relativamente planos en los valles de las tierras altas o extensas planicies. Estos depósitos son una mezcla de material aluvial y coluvial y están compuesto por material meteorizado, mal seleccionado y poco estratificado. Los depósitos tienen generalmente no más de 100 m de ancho.

3.2 GEOLOGIA ESTRUCTURAL.

Las estructuras dominantes cercanas al corredor vial se representan en la figura 12.

3.2.1 Fallas.

Las características estructurales dominantes de carácter regional son las fallas, algunas con más de 100 km de longitud.

3.2.1.1 Fallas normales.

Fallamiento normal en las rocas sedimentarias cretácicas, conforman un semigraben. Los neises precámbricos, las rocas volcánicas y las dioritas están cortadas por numerosas fallas normales, principalmente en el área limitada por las fallas el Bagre, Palestina y Cimitarra (Ingeominas, 1970).

3.2.1.2 Fallas de rumbo.

Estas fallas están confinadas a la parte este del batolito antioqueño, Presentan varios ramales de ángulo bajo (estructuras de cola de caballo) como las de Palestina, Cocorná Sur, El Mulato y Jetudo (Ingeominas, 1970).

3.2.2 Lineamientos.

Características topográficas lineales, principalmente valles, son abundantes sobre gran parte del Batolito Antioqueño. Algunos alineamientos son el producto de la meteorización diferencial (Ingeominas, 1970).

3.2.3 Foliación.

La foliación más común es la esquistosidad definida por el lineamiento paralelo o casi paralelo de las micas en esquistos y neises. En los esquistos sericiticos, láminas de mica de solo una fracción de milímetro, tienden a concentrarse en capas con exclusión de otros minerales. En las rocas de grano grueso, de mayor grado de metamorfismo, las láminas de micas tienen varios milímetros y están interpenetradas con otros minerales no micáceos como cuarzo, feldespato o aluminosilicatos (Ingeominas, 1970). La foliación es la estructura dominante en el comportamiento de los macizos de la zona estudiada.

3.2.4 Plegamientos.

Pocos pliegues regionales se encontraron en las rocas. Esto es debido a los desplazamientos ocasionados por grandes fallas de rumbo y a los neises intrusivos de área. Mayormente, hay presentes pliegues sinclinales y anticlinales en las rocas metamórficas al Oeste de la falla Otu (Ingeominas, 1970).

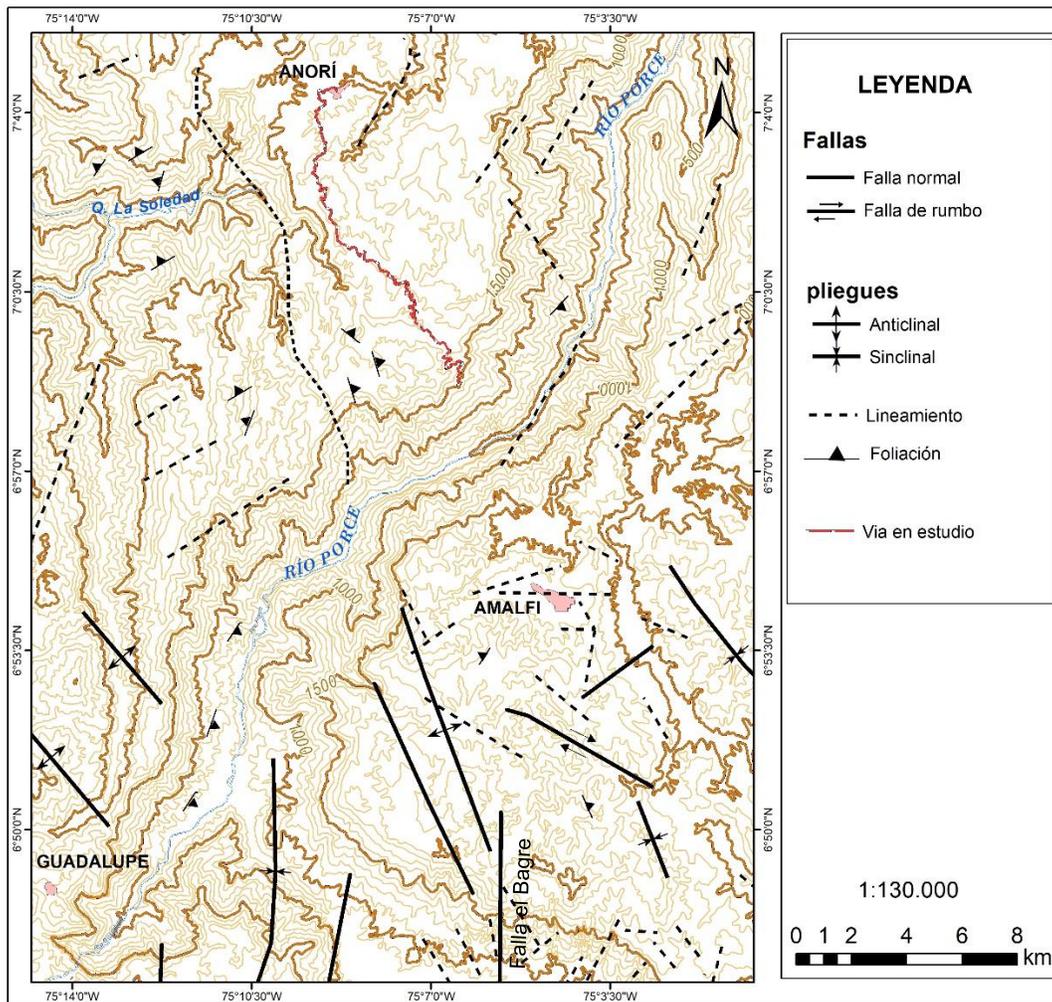


figura 12. Geología estructural de la zona.

4 GEOMORFOLOGIA.

La zona en estudio está caracterizada por unidades pertenecientes a dos ambientes morfogénicos: Ambiente estructural y Ambiente denudacional; dentro del ambiente denudacional, domina una topografía que combina relieves de montículos, colinas y montañas, fuertemente disectadas en sectores cercanos al río Anorí y al río Porce. Los valles que generan estos dos ríos alcanzan profundidades entre 50 m y 1000 m.

Las principales estructuras que dominan el ambiente estructural son lomos de falla y sierras, estructuras localizadas en el cañón del río Porce.

Las elevaciones del sector oscilan entre los 1740 m.s.n.m. y los 1377 m.s.n.m. Las mayores elevaciones se encuentran en los alrededores del caserío de Villa Fátima y las menores se encuentran hacia el descenso hacia el cañón del río Porce.

4.1 MORFOGENESIS

La morfogénesis de las unidades geomorfológicas se diferencia por los procesos internos o externos que han sufrido a lo largo de su historia los terrenos y que las clasifican en dos: ambiente estructural y ambiente denudacional.

Las geoformas denudacionales presentes en el relieve de la zona de estudio, son evidencias de rocas expuestas por largos periodos de tiempo a la inclemencia del clima como la temperatura, las precipitaciones, y el viento, y la acción de las aguas de escurrimiento y la vegetación abundante. Estos agentes equivalen a una fuerte meteorización química, mayormente expresada en hidrólisis y oxidación, que ha generado la alteración y desintegración de las rocas metamórficas, lo cual es evidente en la zona por la expresión de grandes espesores de suelo residual y saprolito de hasta 10 metros, colinas con cimas redondeadas y convexas planas con alta incisión, montículos con crestas redondeadas y convexas amplias y zonas de montaña con cimas redondeadas.

Las geoformas estructurales en la zona de estudio, se generan por el resultado de la interacción de procesos endógenos que actúan como creador de unidades producto de movimientos tectónicos como fallas normales que actúan sobre las rocas sedimentarias del cretácico y que conforman un semigraben, fallas relacionadas al emplazamiento del batolito antioqueño que crean enormes zonas de cizalladura, fallas de rumbo como las de Palestina, Cocorná Sur, El mulato y Jetudo que generan fuertes movimientos horizontales. La interacción de la energía endógena sobre las unidades del corredor vial se expresa mediante la generación de sierras y lomos de fallas.

4.2 MORFOMETRIA

Para el análisis morfométrico de la zona en estudio, se tomó como base un Dem 12,5 m del año 2018 descargado de la página del [Alaska Satellite Facility \(https://vertex.daac.asf.alaska.edu/\)](https://vertex.daac.asf.alaska.edu/).

Se generó una totalidad de 4 mapas morfométricos, dentro de ellos, mapas de; aspecto, curvatura, hillshade y pendientes, todo ello con miras a desarrollar un análisis en la zona de estudio de predominancia de dirección de pendientes, tipo de curvatura de las laderas, es decir; cóncavas o convexas, rango de sombras y de iluminación del relieve y la inclinación de las pendientes expresada en porcentajes.

4.2.1 Aspecto.

El mapa de aspecto resalta la dirección en grados azimut de la pendiente del terreno. Las categorías utilizadas para simbolizar la dirección de pendientes son tonos de diferentes colores (esri, 2016).

En el mapa Aspecto – Anorí el mayor porcentaje de las pendientes van en el sentido Sureste (112.5-157.5 grados azimut), Sur (157.5-202.5 grados azimut) y Oeste (247.5-292.5 grados azimut) representadas en el mapa con colores azul oscuro, azul celeste y verde. En menor porcentaje las zonas con dirección Norte (337.5-360 grados azimut), Este (67.5-112.5 grados azimut) y Noroeste (292.5-337.5 grados azimut) representadas en el mapa con colores rosado, rojo y amarillo. Por último y en menor porcentaje la zona con direccione hacia el Noreste (22.5-67.5 grados azimut) y Suroeste (202.5-247.5 grados azimut) representada en el mapa con colores naranja y azul intermedio (figura 13).

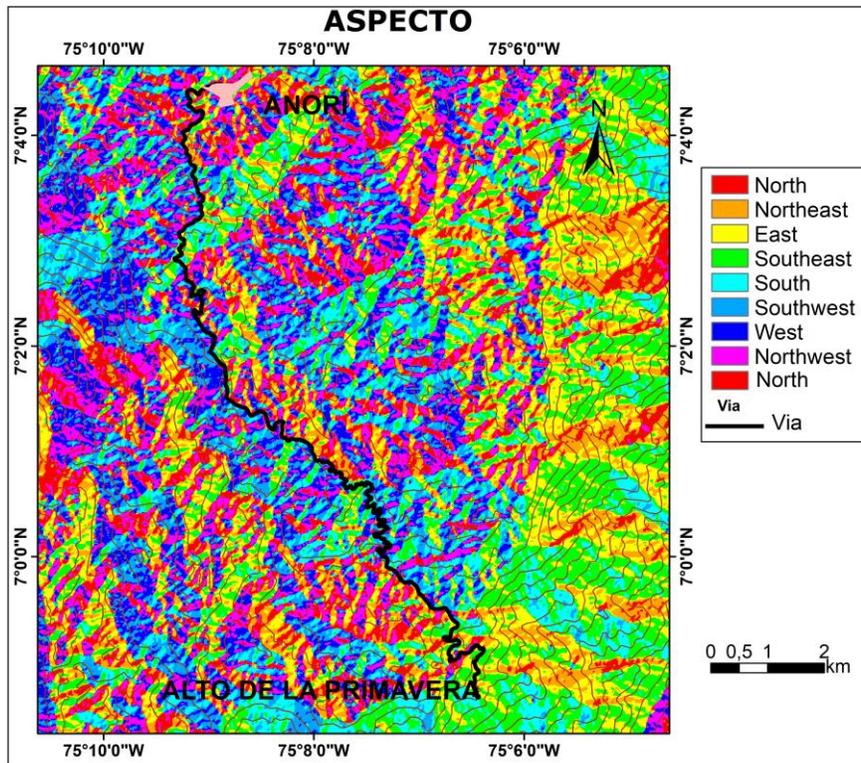


figura 13: Mapa de aspecto en la zona de estudio.

4.2.2 Curvatura.

Con la función curvatura, puede visualizarse la forma o la curvatura de la pendiente, donde, una parte de la superficie puede ser cóncava o convexa.

Un valor negativo (A) indica que la superficie es convexa hacia arriba en esa celda. Un perfil positivo (B) indica que la superficie es cóncava arriba en esa celda. Un valor de cero indica que la superficie es lineal (C). (figura 14) (esri, 2016)

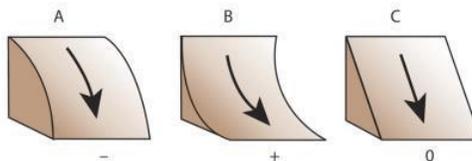


figura 14: Tomado de Desktop.arcgis.com., 2008.

En el mapa de Curvatura - Anorí (figura 15) se evidencia la predominancia de valores cercanos a cero "0" con tonalidades grises, indicando que la superficie no presenta curvas, pues las laderas tienden a ser lineales o planas, en menor proporción hay valores que tienden a 120,96 con tonalidades blancas, indicando superficies cóncavas donde las corrientes suelen acelerar. Por último, en menor proporción, se encuentran zonas con

valores cercanos a -78,8 con tonalidades negras, indicando superficies convexas y donde las corrientes desaceleran.

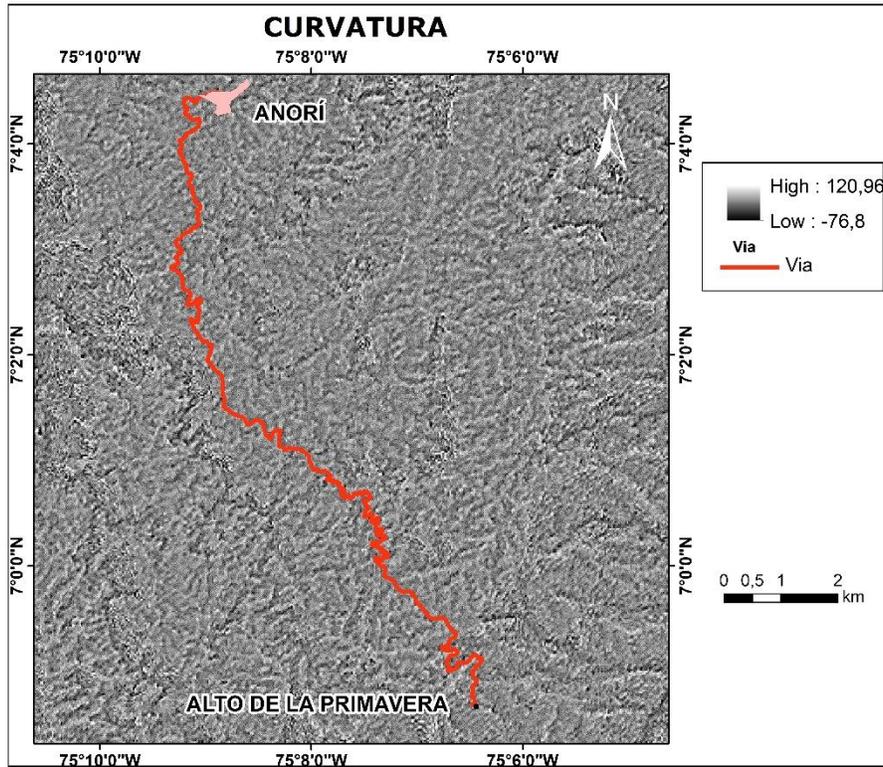


figura 15: Mapa de curvatura en la zona de estudio.

4.2.3 Hillshade.

La herramienta "Sombreado" genera una iluminación hipotética de una superficie en la que se le determinan valores de iluminación a cada celda de un ráster. Para esto, se configura la posición de una fuente de luz hipotética y se calculan los valores de iluminación de cada celda respecto de las celdas vecinas. El acimut es de 315 grados y la altitud es de 45 grados (esri, 2016).

En el mapa de Hillshade – Anorí, de la figura 16, se evidencia que el rango de sombras se ubica entre 0 y 254, siendo 0 las áreas donde en el día la luz solar no llega y permanece en sombra debido a que las celdas que están a la sombra de otra celda están codificadas en 0, todas las demás celdas están codificadas con números enteros del 1 al 254 en este caso particular. En el área de estudio prevalecen los valores que se encuentran entre 1 y 254 y en muy poco porcentaje se alcanzan a observar zonas donde los valores son de 0.

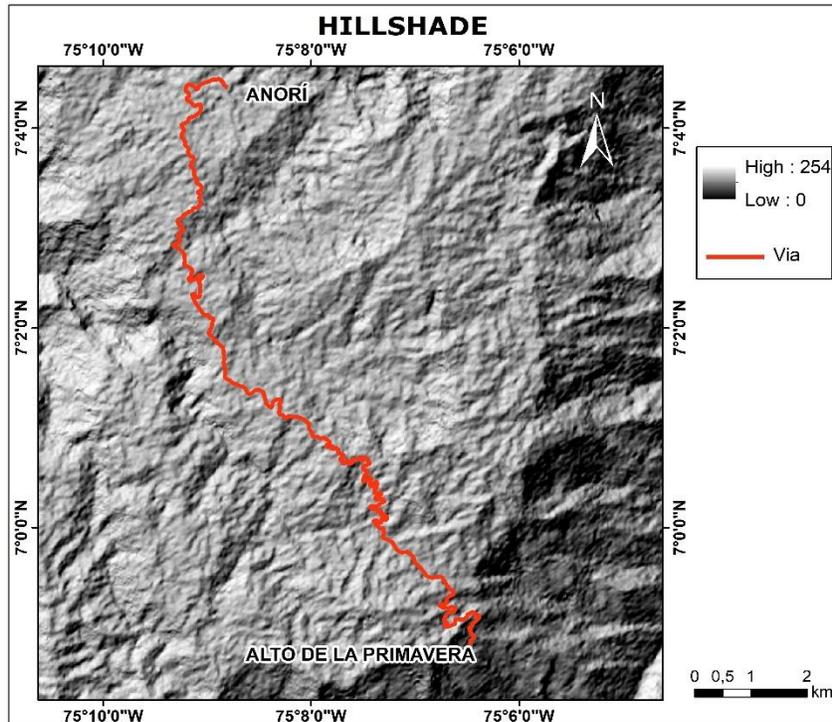


figura 16: Mapa Hillshade en la zona de estudio

4.2.4 Pendiente.

La función pendiente, calcula la tasa máxima de cambio del valor de esa celda a sus vecinas, en otras palabras, el cambio máximo en la elevación sobre la distancia entre la celda y sus ocho vecinas identifica el descenso cuesta abajo más empinado desde la celda. El ráster de pendiente de salida se calcula en porcentajes (esri, 2016).

En la figura 17 Las pendientes más empinadas están sombreadas con tono rojo (>100%), las pendientes moderadas con tonos naranjas (40%-100%), en amarillo se ilustran las pendientes intermedias (10%-40%) y con tonos verdes las zonas de pendiente más bajas (0%-10%). En el área de estudio, dominan los tonos amarillos y verde claro sobre los otros colores, lo cual indica que las pendientes se ubican entre 3% y 40%.

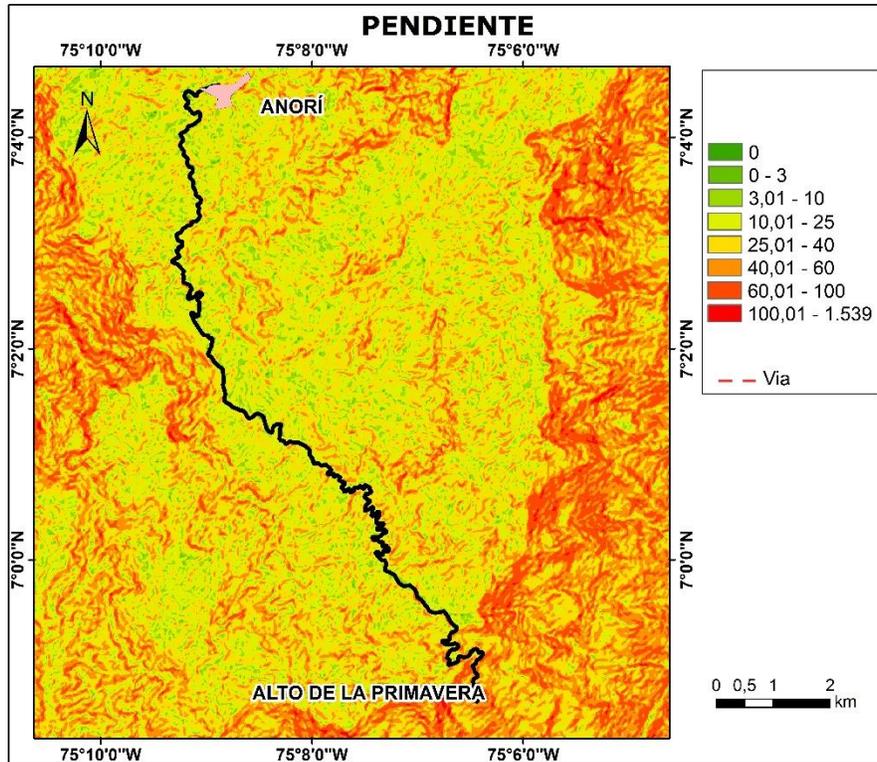


figura 17: Mapa de pendiente en la zona de estudio.

4.3 MORFODINAMICA

La dinámica exógena modificadora de geformas preexistentes en el área de estudio está relacionada con la interacción de agentes como el agua, la gravedad y la acción biológica, lo cual desarrolla cambios físicos, químicos y biológicos que incluye meteorización, erosión y depositación. Estos agentes han modelado la superficie con gran intensidad.

Por efecto de la meteorización y erosión, en la zona predominan las cimas redondeadas y convexas amplias, laderas rectilíneas regularmente y en algunos casos laderas cóncavas y movimientos en masa de tipo deslizamientos de detritos, bloques y en algunos casos rotacional.

El material desprendido del relieve montañoso es removido por el agua y la gravedad y es depositado en la parte baja de las laderas o es transportado por efecto de la corriente de las quebradas.

En la figura 18 se muestran los movimientos en masa alrededor de la zona de estudio, principalmente se evidenciaron deslizamiento de detritos en la parte media y baja de las laderas y reptación en la parte superficial de las laderas. El factor antrópico ha influido en la generación de movimientos por el sobrepastoreo y el desarrollo de zonas de cultivos.

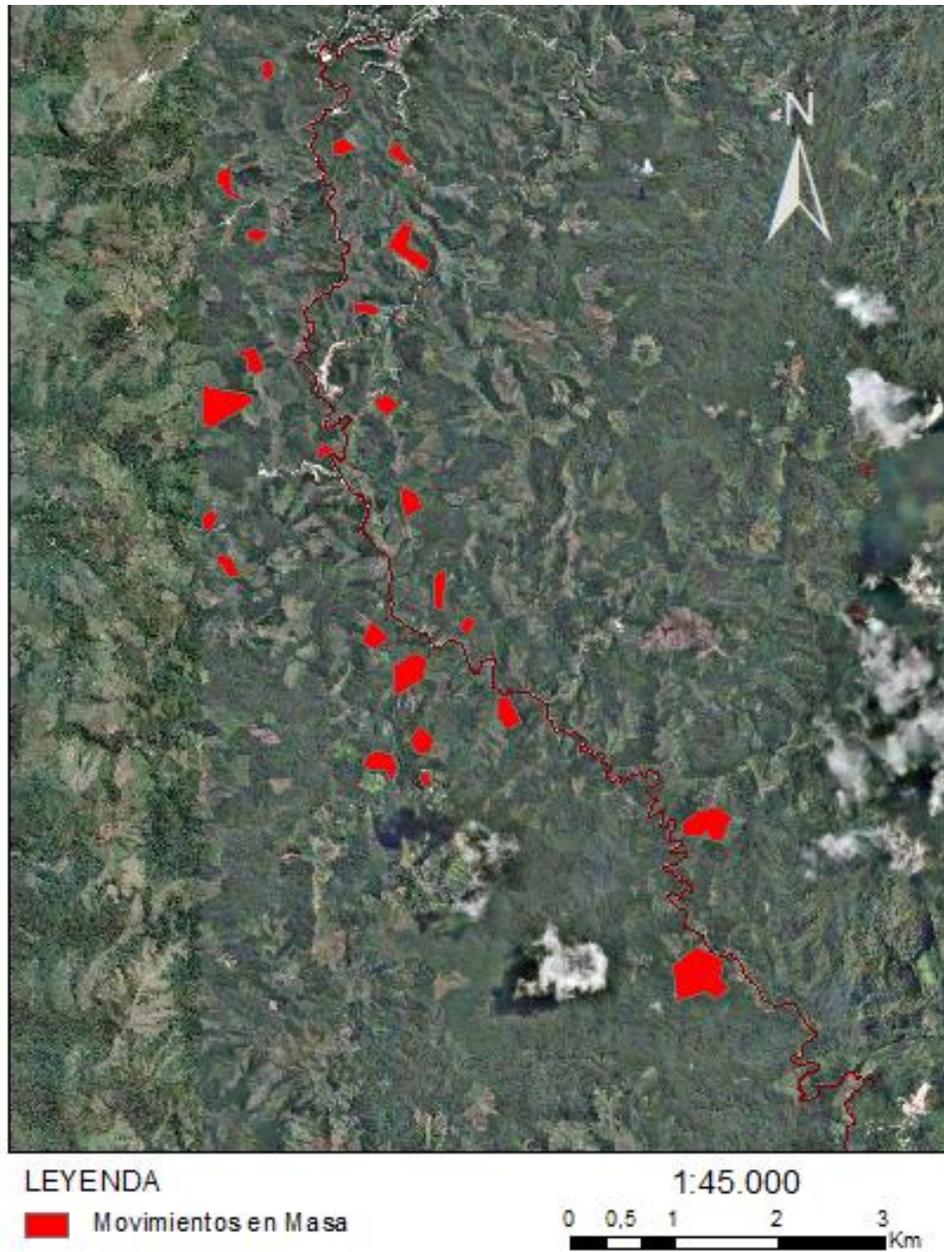


figura 18: Movimientos en masa cercanos a la vía de estudio.

En la Tabla 1 se resume los procesos morfodinámicos activos e inactivos a lo largo del corredor vial.

Tabla 1: Resumen de los procesos morfodinámicos activos e inactivos.

ABSCISA	IMAGEN		DESCRIPCIÓN
00+011 00+015			Deslizamiento de detritos en la base del talud.
00+153 00+160			Reptación en el talud superior.
00+690			Deslizamiento de detritos
02+763			Deslizamiento rotacional en la parte media e inferior del talud.
05+300			Deslizamiento de detritos en la parte superior del talud.
05+610			Reptación en la ladera superior

ABSCISA	IMAGEN	DESCRIPCIÓN
05+650		Deslizamiento de detritos desde la parte superior de la ladera.
05+834		Deslizamiento de detritos en toda la ladera.
05+992		Reptación en el talud inferior.
06+181 06+376		Deslizamiento de detritos en el talud inferior.
8+144		Hundimiento.

ABSCISA	IMAGEN		DESCRIPCIÓN
8+200			Hundimientos y agrietamientos.
9+120			Deslizamiento de detritos en el talud medio e inferior.
10+770			Antiguo deslizamiento, presenta vegetación actualmente.
10+810			Deslizamiento de detritos a lo largo del talud.
11+820 11+845			Deslizamiento de detritos a lo largo del talud.
12+093			Deslizamiento de bloques.

ABSCISA	IMAGEN		DESCRIPCIÓN
15+305			Deslizamiento de detritos en el talud centro e inferior.
15+321			Deslizamiento de detritos en el talud inferior.
15+437			Deslizamiento de detritos en el talud inferior.
15+579			Deslizamiento de detritos a lo largo de toda la ladera.
15+958			Potencial caída detritos en el talud inferior.

ABSCISA	IMAGEN	DESCRIPCIÓN
16+410		Hundimientos y agrietamientos.
17+110		Deslizamiento de detritos en el talud inferior.
17+132		Deslizamiento de detritos en el talud inferior.
17+394		Reptación en la ladera superior.
18+150		Deslizamiento antiguo en la ladera inferior.

ABSCISA	IMAGEN	DESCRIPCIÓN
19+320		Deslizamiento de detritos.
19+374		Deslizamiento detritos y bloques.
19+452		Deslizamiento de detritos en el talud centro e inferior.

4.4 MORFOGRAFIA

Con el propósito de sectorizar zonas geomorfológicamente homogéneas en el área de estudio, se elaboró el análisis de una imagen multiespectral del satélite SENTINEL 2.

La imagen analizada, presenta total cobertura de la zona, baja nubosidad y fue capturada por el satélite en el año 2018. Se adquirió desde la página <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

La descripción de la imagen satelital SENTINEL 2 seleccionada para su análisis, se exhibe en la Tabla 2.

Tabla 2: Descripción de imagen satelital SENTINEL 2.

Nombre	Fuente	Fecha de adquisición
T18NZJ_20180210T151701_TCI	Copernicus	2018

Con el software ArcGis versión 10.3, se realizó combinación de tres bandas con el fin de detectar la composición que representa el mayor contraste de heterogeneidades, la combinación de bandas adoptada fue 6-3-4 que presentan una resolución espacial de 20 y 10 metros (figura 19)

Se clasificaron tres grandes unidades teniendo en cuenta contrastes de tonalidades, unidad A, unidad B y unidad C, estas representan cambios en el tipo de vegetación y posiblemente cambios en alturas y geformas (figura 19)

Unidad A: Tonalidad rosa asociado posiblemente a vegetación baja, zona de cultivos, o áreas deforestadas, representa zonas bajas, posiblemente montículos o lomas.

Unidad B: Tonalidad rojo oscuro asociado posiblemente a bosques primarios, representa el área de mayor elevación, posiblemente se compone de colinas o montañas.

Unidad C: Tonalidad naranja rojiza asociado posiblemente a bosques en galería alrededor de los drenajes que fluyen al río Porce, posiblemente se compone de pendientes muy abruptas a escarpadas que conforman el cañón del río Porce.

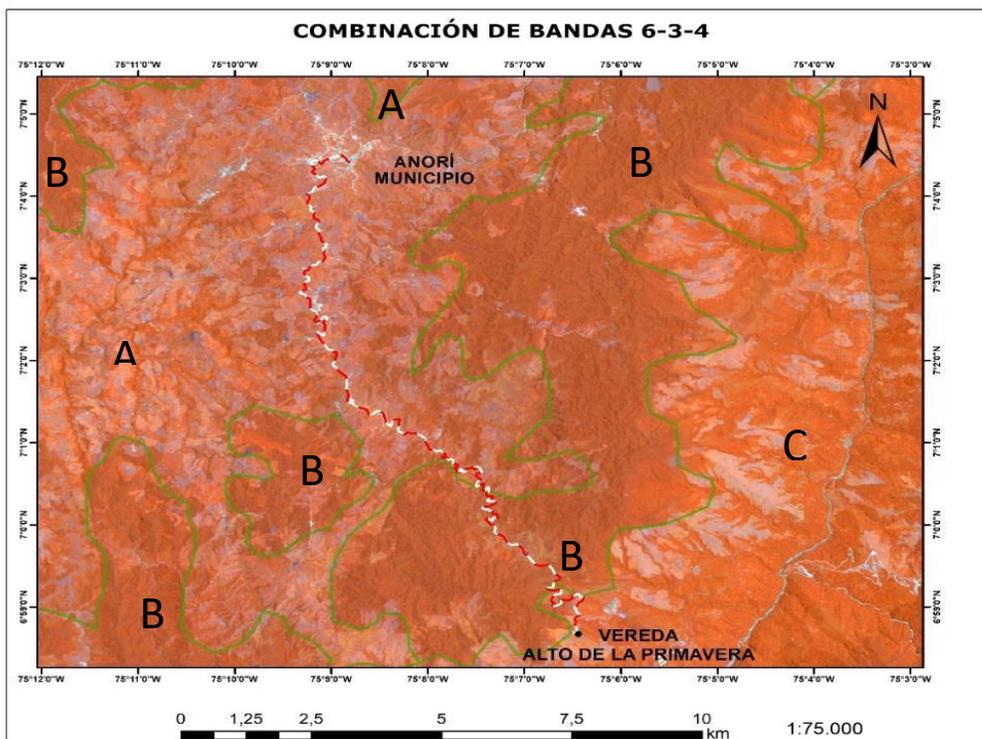


figura 19: Combinación de bandas 6-3-4. Se definieron tres unidades predominantes. Unidad A-B-C.

La delimitación de unidades geomorfológicas homogéneas se determinó con base en análisis de modelos de elevación y del terreno, cartografía base, fotografías aéreas y estaciones de campo (figura 20). Se tuvieron en cuenta aspectos importantes como la pendiente, las alturas, la vegetación y el tipo de drenaje.

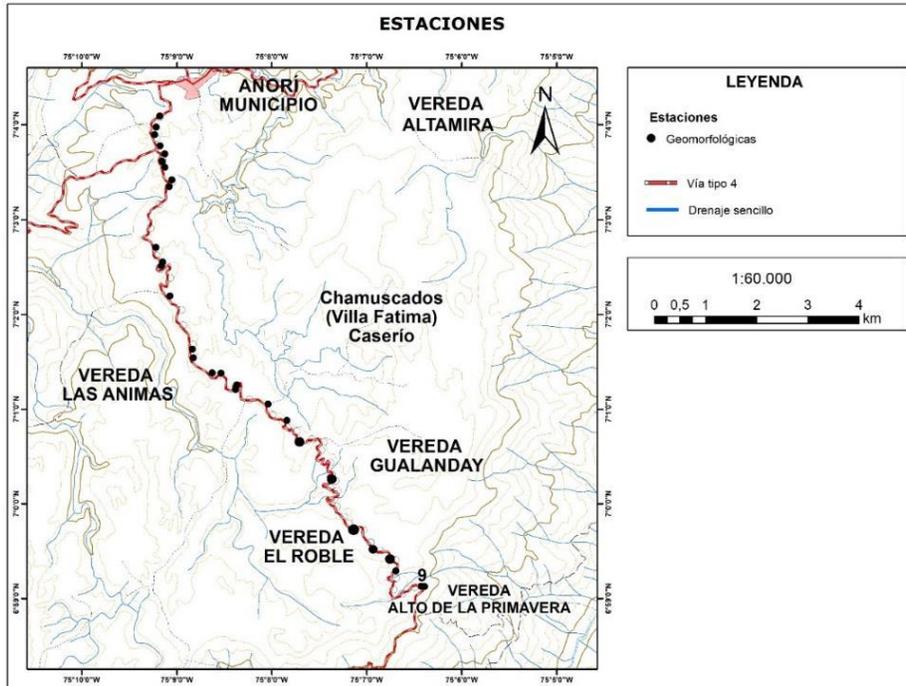


figura 20: Estaciones de campo geomorfológicas.

En el área de estudio se encuentran principalmente dos ambientes morfológicos, el ambiente estructural y el ambiente denudacional, las cuales se clasificaron en la Tabla 3 y figura 21 de acuerdo con la jerarquización geomorfológica del Servicio Geológico Colombiano (Carvajal. 2012).

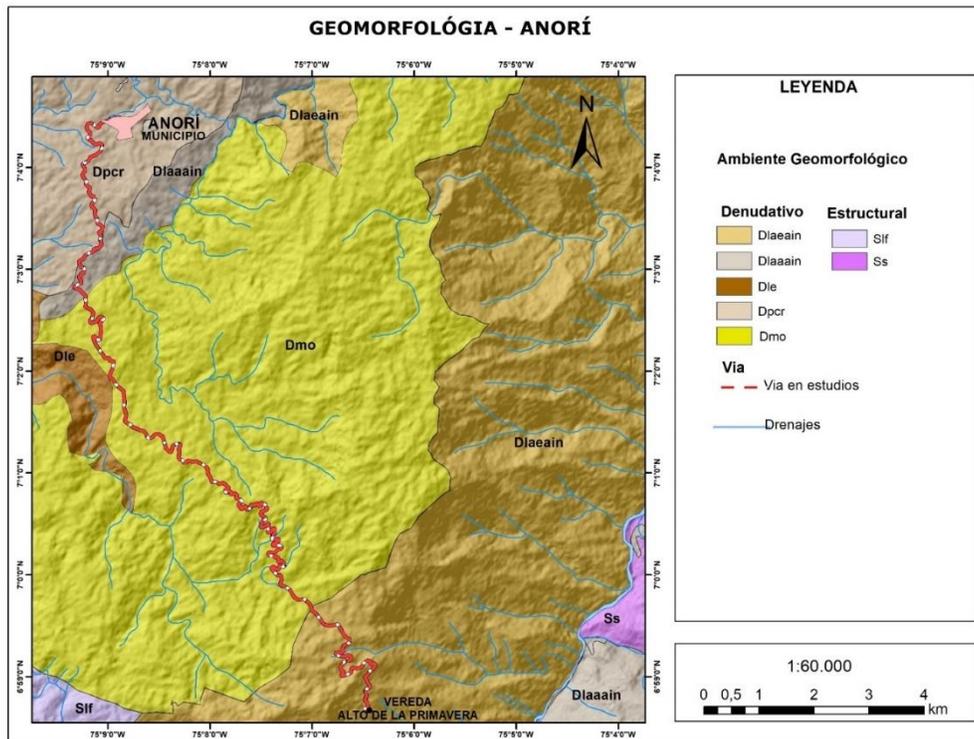


figura 21: Mapa de unidades geomorfológicas mejorado de (SGC, 2012)

Tabla 3: Jerarquización geomorfológica del Servicio Geológico Colombiano (Carvajal. 2012).

MORFOESTRUCTURA	PROVINCIA	REGIÓN	UNIDAD
SISTEMA OROGENICO ANDINO	CORDILLERA CENTRAL	Ambiente Denudacional	Planicie Colinada Residual
			Ladera Escarpada
			Ladera Abrupta con alta incision
			Ladera Escarpada con alta incision
			Montículo
		Ambiente Estructural	Sierras
			Lomos de falla

4.4.1 Geformas de Origen Denudacional.

4.4.1.1 Planicie colinada residual (Dp_{cr})

Áreas extensas y planas a suavemente inclinadas; asociadas a rocas muy duras a duras, con morfología ondulada a colinada; desarrolladas en suelos residuales muy espesos, generados a partir de la meteorización de rocas metamórficas del paleozoico, estas áreas se ubican a una altura de 1400 a 1500 m.s.n.m. En esta unidad se desarrollan procesos erosivos como erosión concentrada surcos y cárcavas (SGC, 2012).

Con elevaciones entre 201- 499 m, la forma de las crestas son redondeadas y convexas planas. Las laderas tienen forma recta a convexas, son abruptas a muy abruptas de baja incisión con inclinaciones que van entre 16°-30 ° y longitudes largas entre 501- 1000 m, medias entre 251-500 m y bajas entre 51-250 m (figura 22).



figura 22: Planicie colinada.

4.4.1.2 Laderas escarpadas con alta incisión (Dlae_{ain})

Con elevaciones mayores a 500 m, la forma de las crestas es redondeada, con formas convexas planas y agudas. Las laderas presentan características como forma recta e

irregular, escarpadas a muy escarpadas con inclinaciones entre 31° - $>45^{\circ}$ y longitudes largas entre 501- 1000 m, medias entre 251-500 m y bajas entre 51-250 m. Desarrollados en rocas duras, asociadas a zonas de alta incisión por el Rio Porce, sus tributarios presentan un patrón de drenaje paralelo (figura 23, figura 24).



figura 23: Ladera escarpada con alta incisión.



figura 24: Ladera erosiva con alta incisión.

4.4.1.3 Laderas abruptas con alta incisión (Dlaaain)

Laderas de longitud muy larga, con elevaciones entre 201- 499 m, de pendientes abrupta, recta a convexas, la forma de las crestas son redondeadas y convexas planas, asociadas a zonas de alta incisión generada por el Rio Anorí (figura 25, figura 26 y figura 27)



figura 25: Ladera abruptas con alta incisión.



figura 26: Ladera abruptas con alta incisión.



figura 27: Ladera abruptas con alta incisión.

4.4.1.4 Laderas escarpadas (Dle)

Laderas de longitud larga a muy larga, de pendientes escarpadas con elevaciones mayores a 500 m, con crestas redondeadas, convexas planas y agudas. Las laderas presentan características como forma recta e irregular, escarpadas con inclinaciones mayores a 45° y longitudes largas entre 501-2500 m, desarrolladas en rocas duras. Hacia

la parte media e inferior de la ladera ha cambiado el uso, pues, se ha talado el bosque natural y se ha establecido pastos para la producción pecuaria (SGC, 2012).

Desarrolla patrones de drenaje dendrítico, tiende a desarrollar procesos erosivos intensos como movimientos en masa y pequeños flujos (figura 28).



figura 28: Ladera escarpada.

4.4.1.5 Montículo (Dmo)

Elevación del terreno con alturas menores de 50 metros sobre su nivel de base local, con una morfología colinada, la forma de las crestas es redondeada y plana. Las laderas presentan características de forma recta, muy inclinadas a abruptas con inclinaciones entre 11° - 20° y longitudes largas entre 51- 250 m.

Su origen se relaciona a procesos de meteorización y erosión intensa sobre rocas duras y en sedimentos no consolidados (figura 29)



figura 29: Montículos.

4.4.2 Geformas de origen estructural

4.4.2.1 Lomos de falla (Slf)

Estructuras paralelas a un sistema de falla, con laderas convexas, cortas a muy cortas de pendiente muy abrupta a escarpada, crestas subredondeadas; su origen se debe al truncamiento y desplazamiento vertical o lateral por procesos de fallamiento intenso, con

dirección preferencial es NNE, se presentan en rocas extremadamente duras a duras y los procesos de meteorización intensos generan suelos residuales de espesores considerables que pueden superar los 30 m (SGC, 2012).

Las pendientes varían de muy inclinada a muy abrupta en dirección, se identifican claramente a lo largo de la superficie de la llanura aluvial donde parecen estar alineados a lo largo de la zona de deformación. Las longitudes de las laderas son cortas con laderas de forma convexas y pendientes inclinadas a muy abruptas (figura 30).



figura 30: Lomo de falla.

4.4.2.2 Sierra (Ss)

Sierra simétrica o ligeramente simétrica a elongada de crestas onduladas de morfología montañosa de cimas subredondeadas, con laderas largas a muy largas, rectas y convexas, pendiente escarpadas, asociadas a esquistos, originadas por metamorfismo intensos asociados localmente a fallamiento, con patrón de drenaje paralelo a subparalelo. Presentan una disposición estructural NNE, y se observan efectos locales de procesos coluviales (SGC, 2012)

Definida por rocas metamórficas con pendiente ($> 45^\circ$) originadas por metamorfismo intensos asociados localmente con fallamiento. Presentan efectos locales de procesos coluviales (figura 31).



figura 31: Sierra.

5 GEOLOGIA LOCAL.

Para la elaboración de la geología local se realizaron 41 estaciones de campo, como lo muestra la figura 32, para así poder determinar la geología de la vía y tratar de encontrar algún cambio litológico.

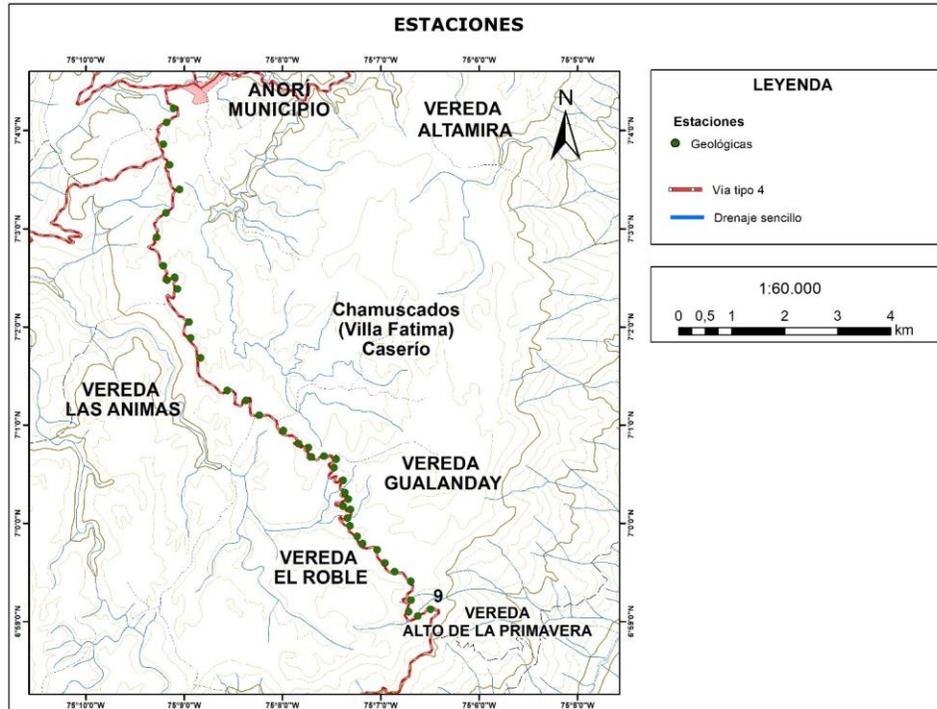


figura 32: Estaciones de campo.

5.1 UNIDADES LITOLÓGICAS.

La litología predominante identificada en la zona de estudio pertenece a la formación rocas metamórficas de la Cordillera Central al oeste de la falla Otu (Paleozoico), unidad T-Mbg3, y está compuesta por esquisto cuarzo-sericítico grafitoso. Presentan color gris verdoso oscuro (5G 4/1) y rojo moderado (5R 5/4) producto de la oxidación de minerales con contenido en hierro, presenta laminación compuesto por sericita, cuarzo, biotita y grafito como minerales principales y como accesorios: clorita, plagioclasa. El porcentaje de sericita es mayor que el de cuarzo (figura 33).

Las láminas tienen un espesor de 1 a 4 mm. El grafito por lo general es mayor del 5%. Presenta múltiples venas rellenas de material arcilloso con tonalidad amarillenta a blanca (N9), ver figura 35 y figura 36. Fueron formados por metamorfismo regional de bajo grado de limolitas y shales. El origen sedimentario es más claro en las rocas menos metamorfoseadas donde se observa aun la textura clástica. La laminación de muchos de los esquistos deriva de la estratificación rítmica fina de los sedimentos originales.

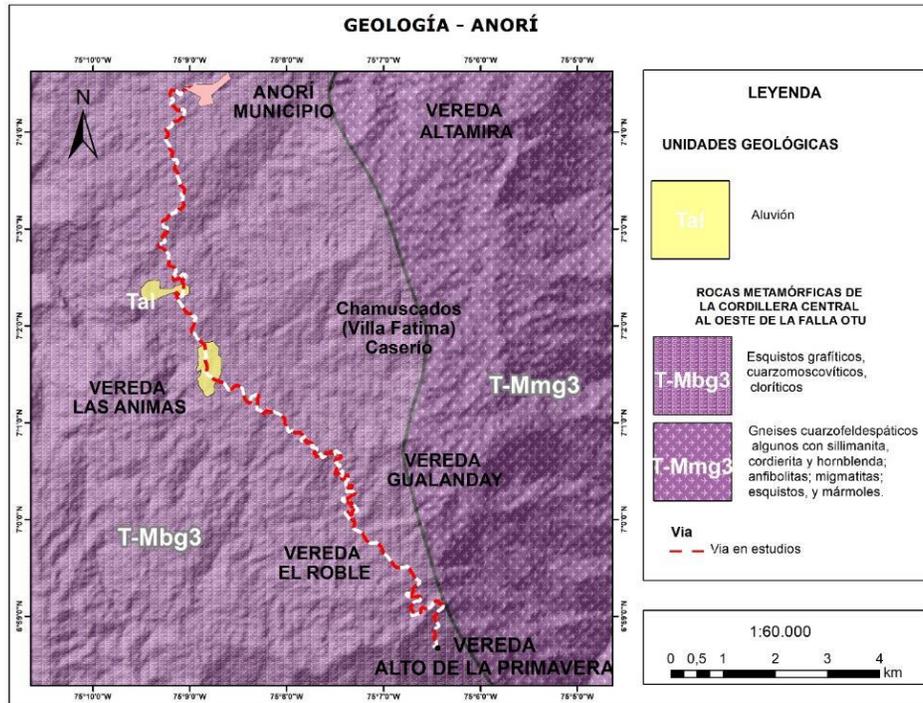


figura 33: La Geología del corredor vial se corresponde a la formación rocas metamórficas de la Cordillera Central al oeste de la falla Otu, unidad T-Mbg3 que se compone de esquistos grafitosos cuarzomoscovíticos.

Predomina la foliación en sentido SE. Las venas presentan una dirección predominante en sentido NE.

Se encuentra fuertemente meteorizada, presenta hasta tres niveles de meteorización que van de transición roca suelo hasta suelo residual (figura 34)

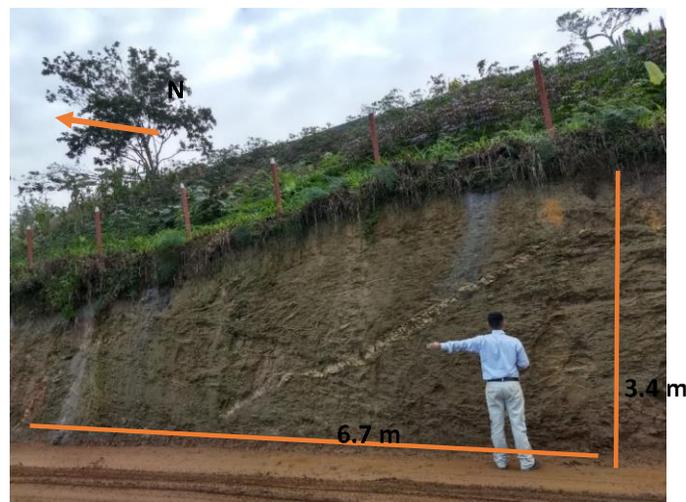


figura 34: Afloramiento compuesto de esquistos cuarzo-sericítico grafitoso.



figura 35: Esquisto cuarzo-sericítico grafitoso.



figura 36: Esquisto cuarzo-sericítico grafitoso.

La litología secundaria identificada en la zona de estudio corresponde a aluviales (Tal) y son acumulaciones de materiales transportadas por un medio acuoso y está conformado por bloques que varían su entre 4 y 6 cm de diámetro, compuestos en su mayoría por esquistos, filitas y cuarcitas. Adicionalmente, hay material tamaño arena, limo y arcilla (figura 37).

El uso potencial de esta unidad como fuente de materiales en la obra de pavimentación, ampliación y rectificación de la vía en estudio por su cercanía al proyecto, no es viable, pues su espesor es muy reducido y podría no cumplir con los requerimientos del proyecto.



figura 37: Depósito aluvial.

5.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.

A partir de estudio realizado, se encontró que la vía no tiene afectaciones por fallas. Solo se pudo apreciar que en el km 04+218 hay evidencia de un lineamiento en dirección N50°E que tiene aproximadamente 4,2 km de longitud y genera control estructural sobre aproximadamente 3,8 km del cauce del río Anorí. La traza del rasgo estructural se indica con una línea negra punteada en el mapa geológico de la figura 38 y en el mapa topográfico de la figura 39.

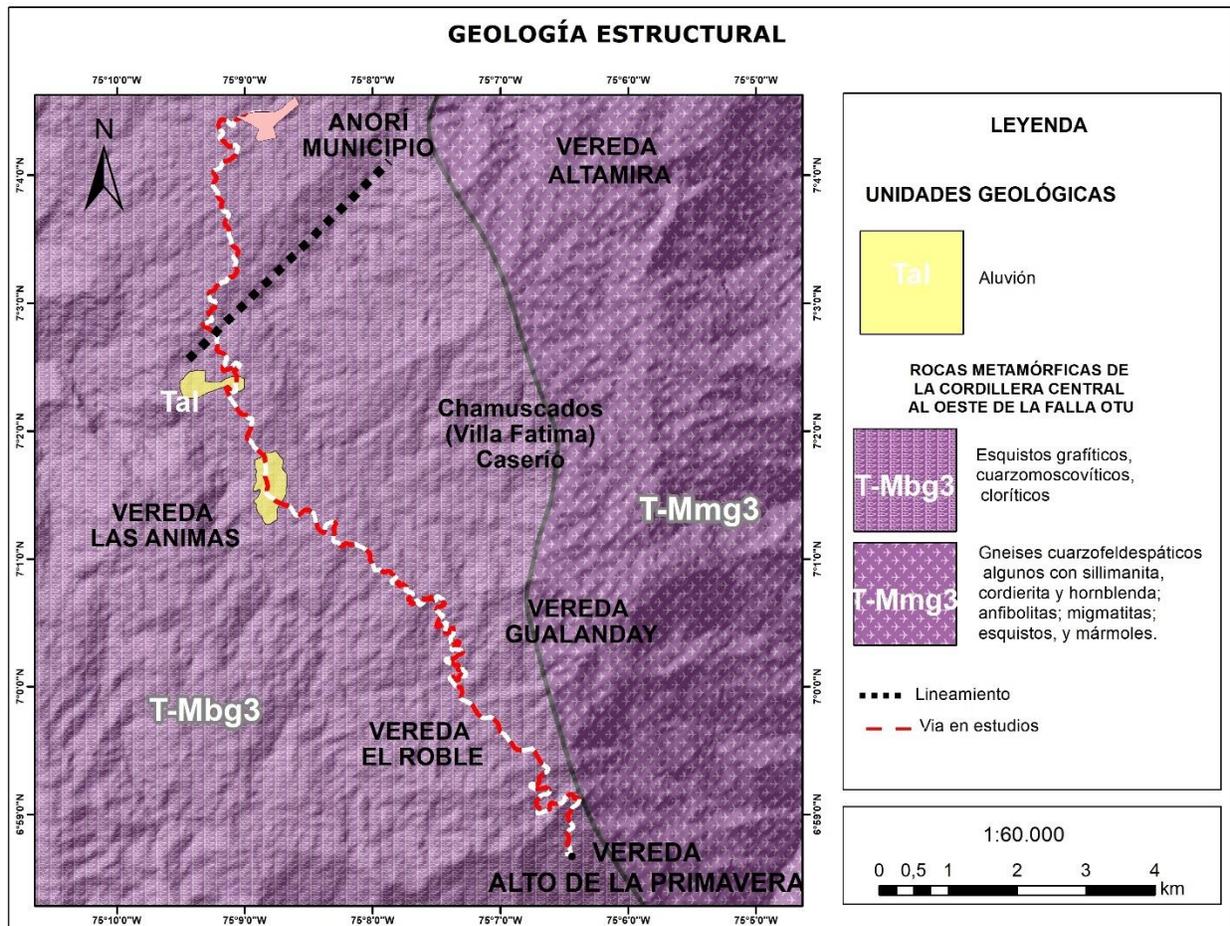


figura 38: Superposición del DEM 12.5 m sobre la geología del corredor vial, la línea negra punteada representa el lineamiento identificado y como una línea punteada rojo con blanco se ilustra la vía en estudio.

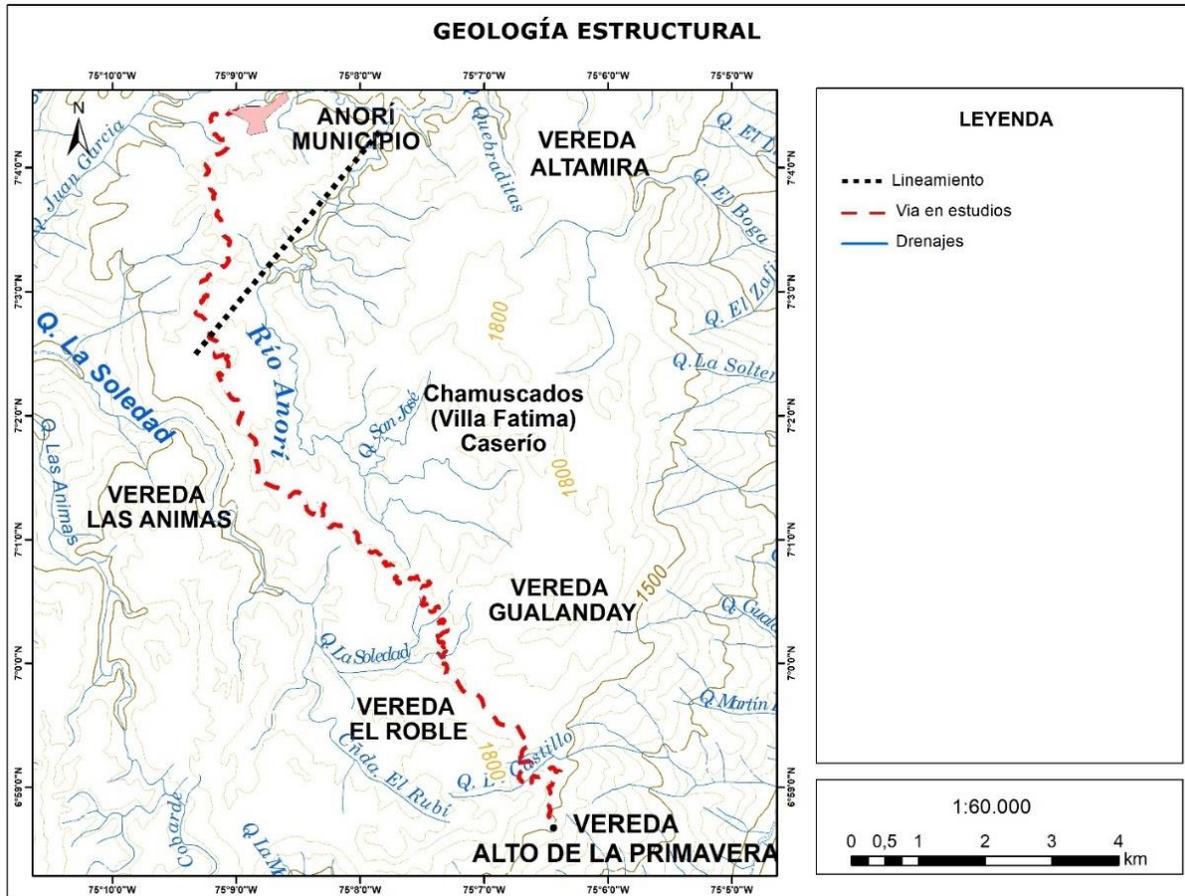


figura 39: Mapa topográfico a escala 1:60.000 que ilustra el lineamiento del corredor vial (línea color negro) que puede estar ejerciendo control estructural sobre el rio Anorí. Con una línea punteada rojo con blanco se ilustra la vía en estudio.

La mayoría de los taludes presentes y que serán cortados con el proyecto, corresponden a suelos residuales; en los pocos afloramientos de roca y en algunos sitios donde se tienen estructuras heredadas a los saprolitos, se tomaron datos estructurales de foliaciones y diaclasas (presentados en el anexo 1), con el fin de valorar el grado de influencia de las discontinuidades sobre la estabilidad del talud. Según el análisis generado, las posibles superficies de ruptura o mecanismos potenciales de movimientos en masa relacionados con la disposición estructural son de tipo planar y en cuña.

La ruptura planar es un deslizamiento generado a favor de una discontinuidad preexistente, se produce cuando la discontinuidad tiene un grado de buzamiento menor al del talud y cuando su dirección de buzamiento es $\leq 20^\circ$ a la del talud. La ruptura en cuña es un deslizamiento de un bloque formado por dos planos de discontinuidad a favor de su línea de intersección, se produce cuando el ángulo de buzamiento del talud es mayor que el que forma dicha intersección.

De la figura 40 a la figura 61, se integran los datos de foliación (negro), diaclasas (rojo) y orientación del talud (amarillo), mediante redes estereográficas con el fin de ilustrar la aptitud de las discontinuidades con respecto al terreno. En la zona de estudio, predominan los afloramientos de suelo sobre los rocosos, por lo tanto, no en todos los afloramientos hay diaclasas, pero si persiste la foliación como una estructura heredada. El chaflán se representa mediante el color rojo, las curvas de nivel mediante el color marrón y la vía en estudio mediante el negro.

En los planos del anexo 4 (figura 40 a la figura 61) se ilustran los datos estructurales como foliación y diaclasamiento en su respectiva abscisa, con una figura de arcos y el análisis de la posible presencia de potenciales deslizamientos planares a partir de la orientación.

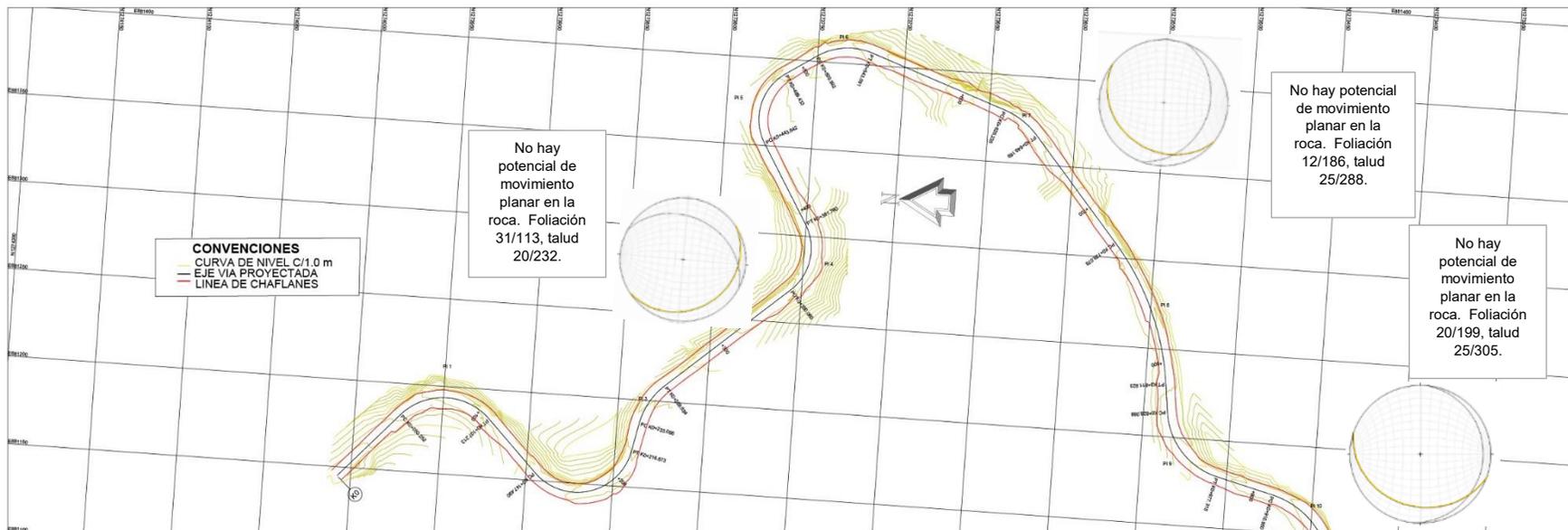


figura 40: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 00+000 y la abscisa 01+400.

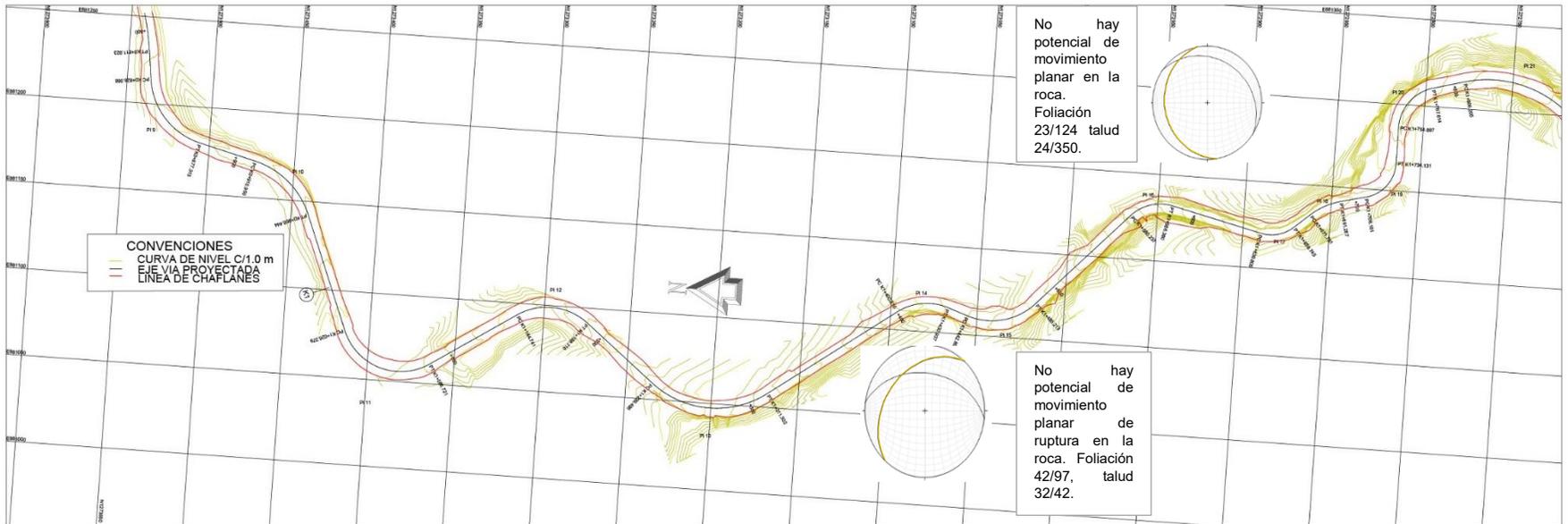


figura 41: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 01+400 y la abscisa 02+697.

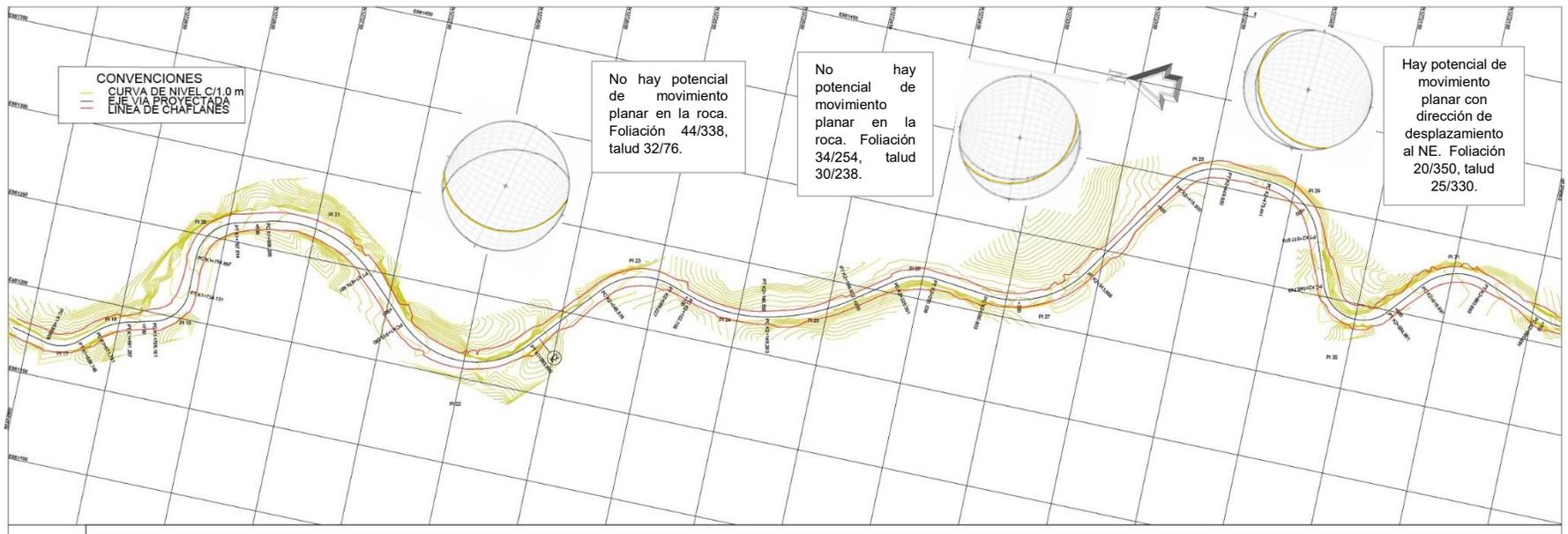


figura 42: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 02+697 y la abscisa 04+032.

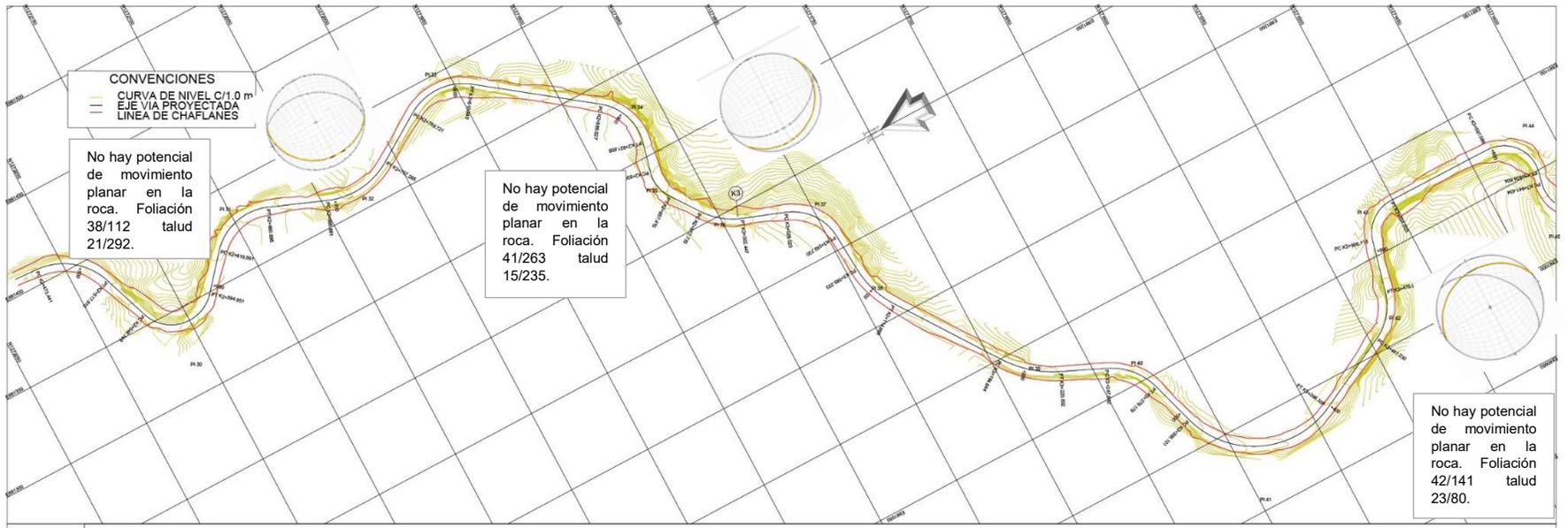


figura 43: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 04+032 y la abscisa 05+637.

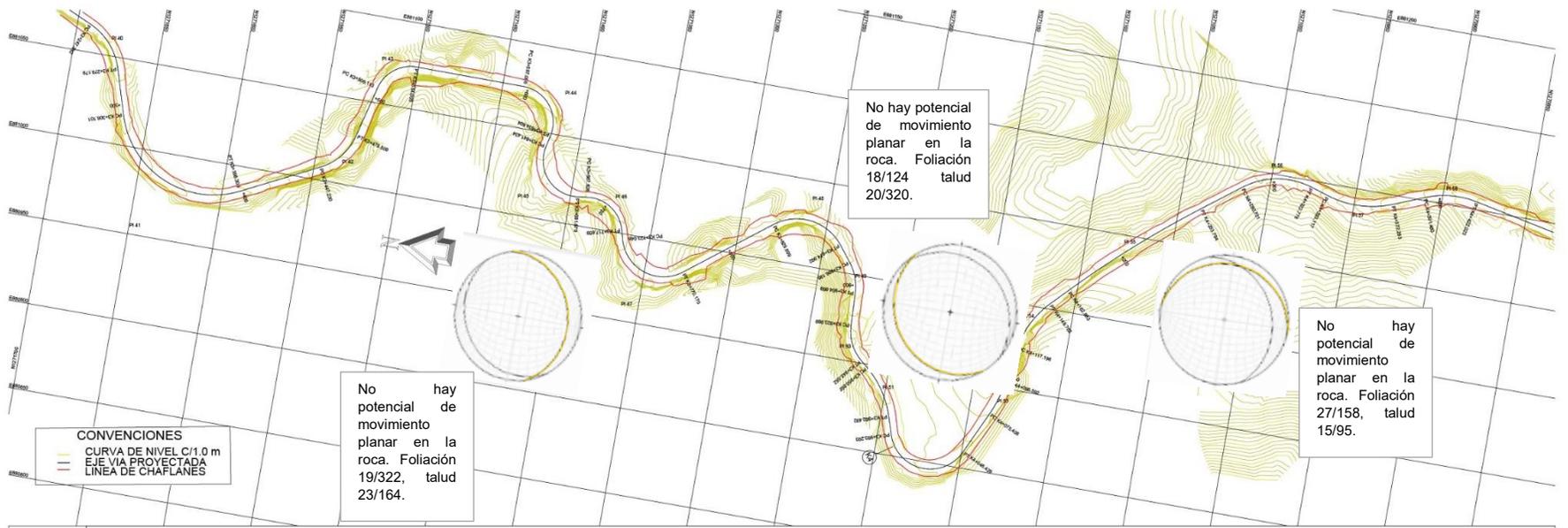


figura 44: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 05+637 y la abscisa 07+060.

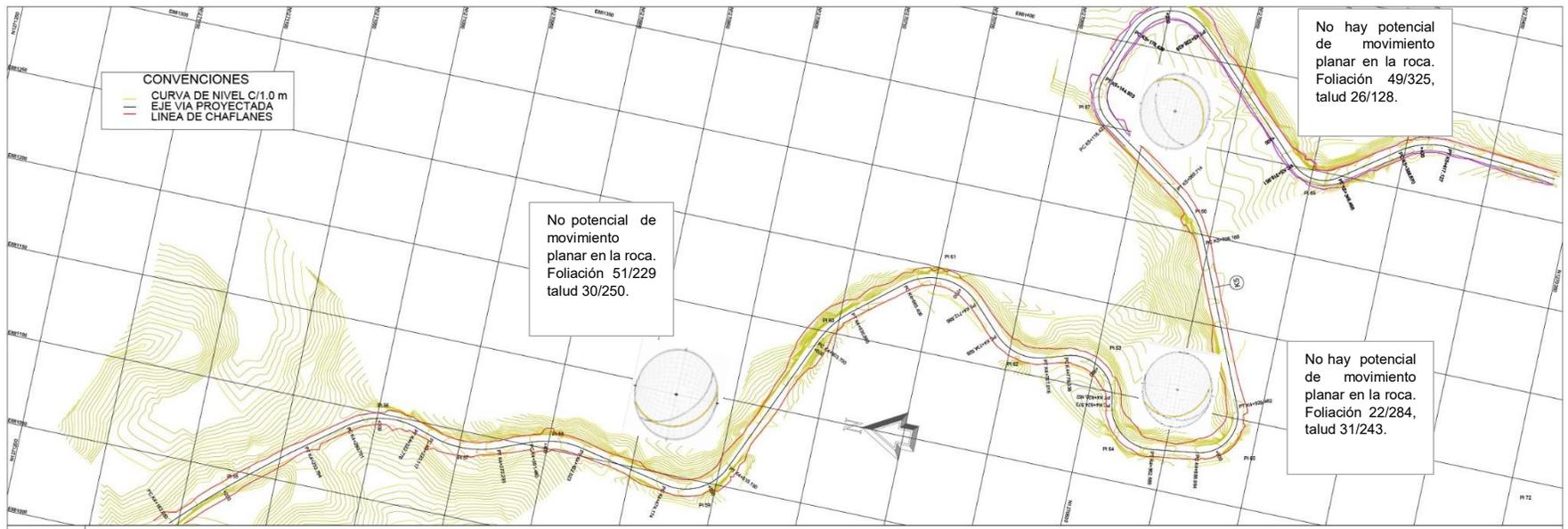


figura 45: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 07+060 y la abscisa 07+642.

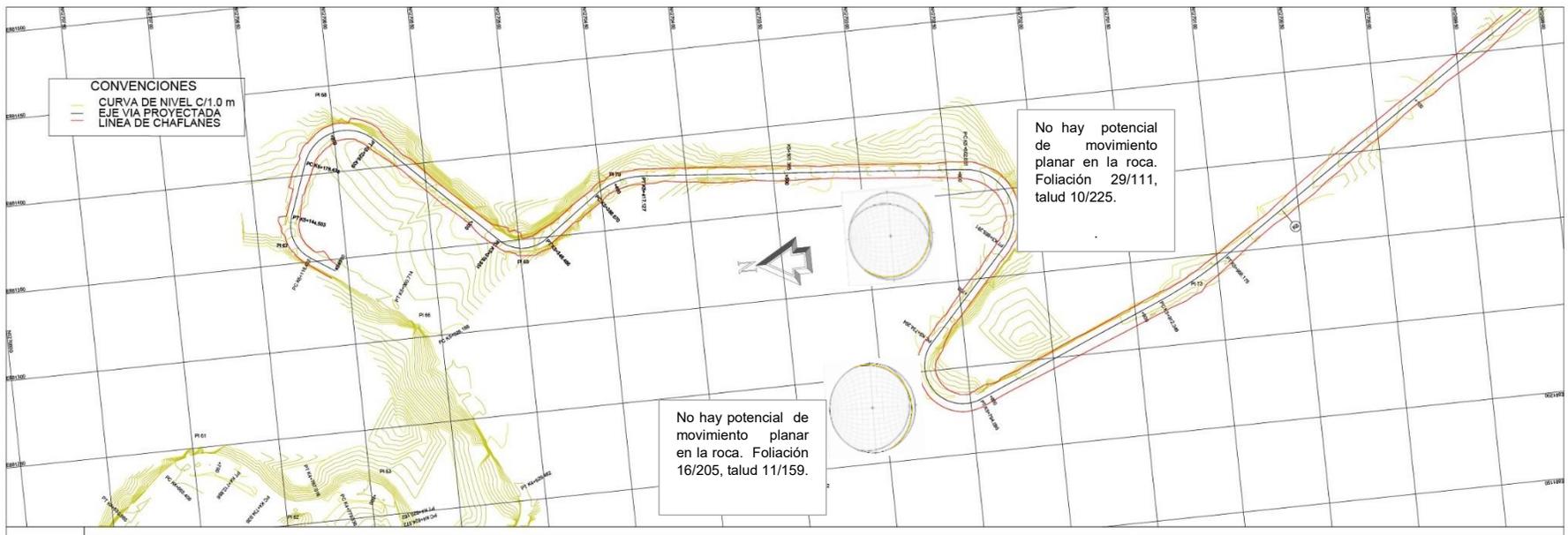


figura 46: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 07+642 y la abscisa 08+211.

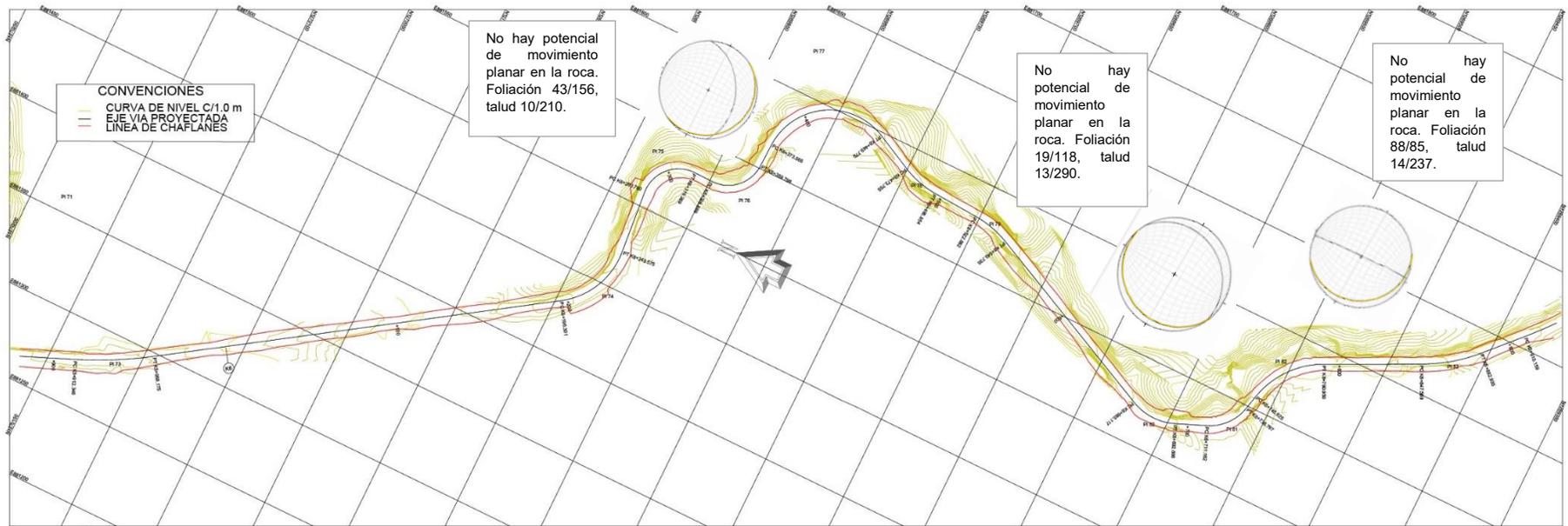


figura 47: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 08+211 y la abscisa 08+789.

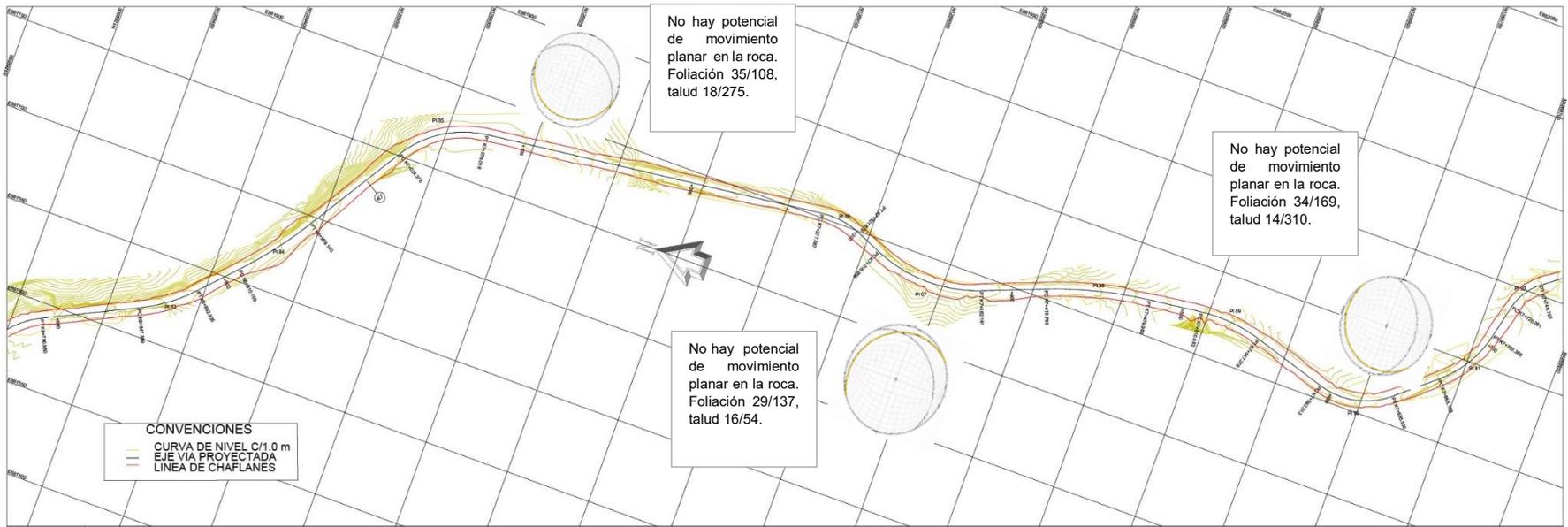


figura 48: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 08+789 y la abscisa 09+688.

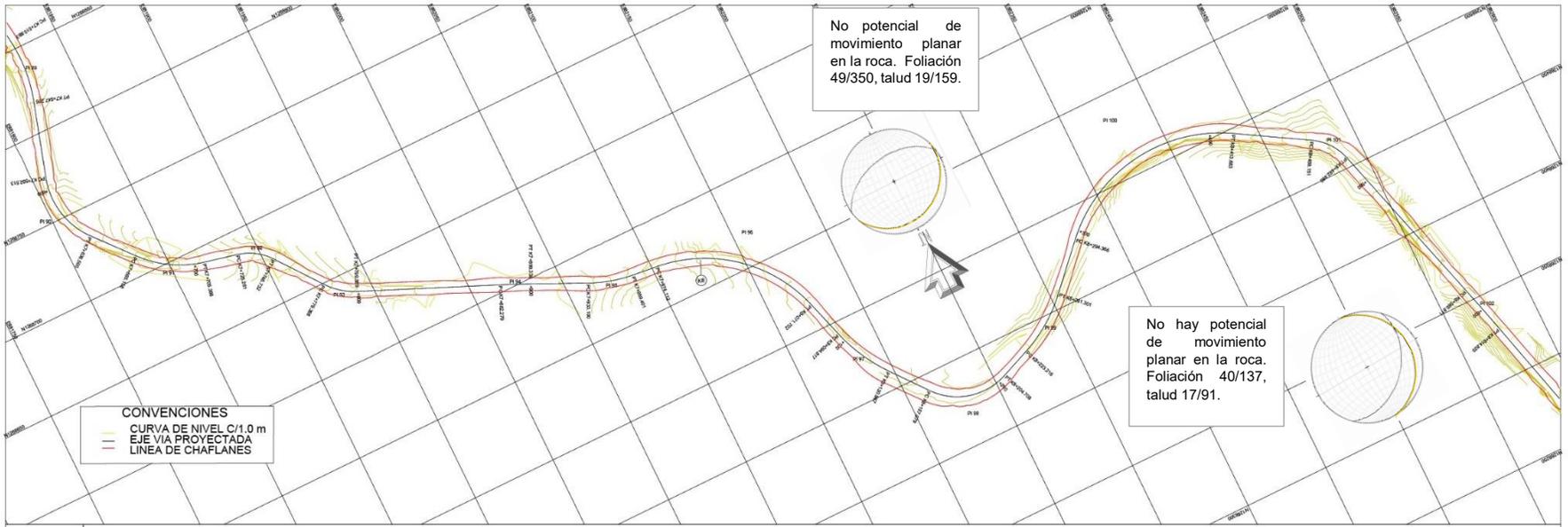


figura 49: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 09+688 y la abscisa 10+025.

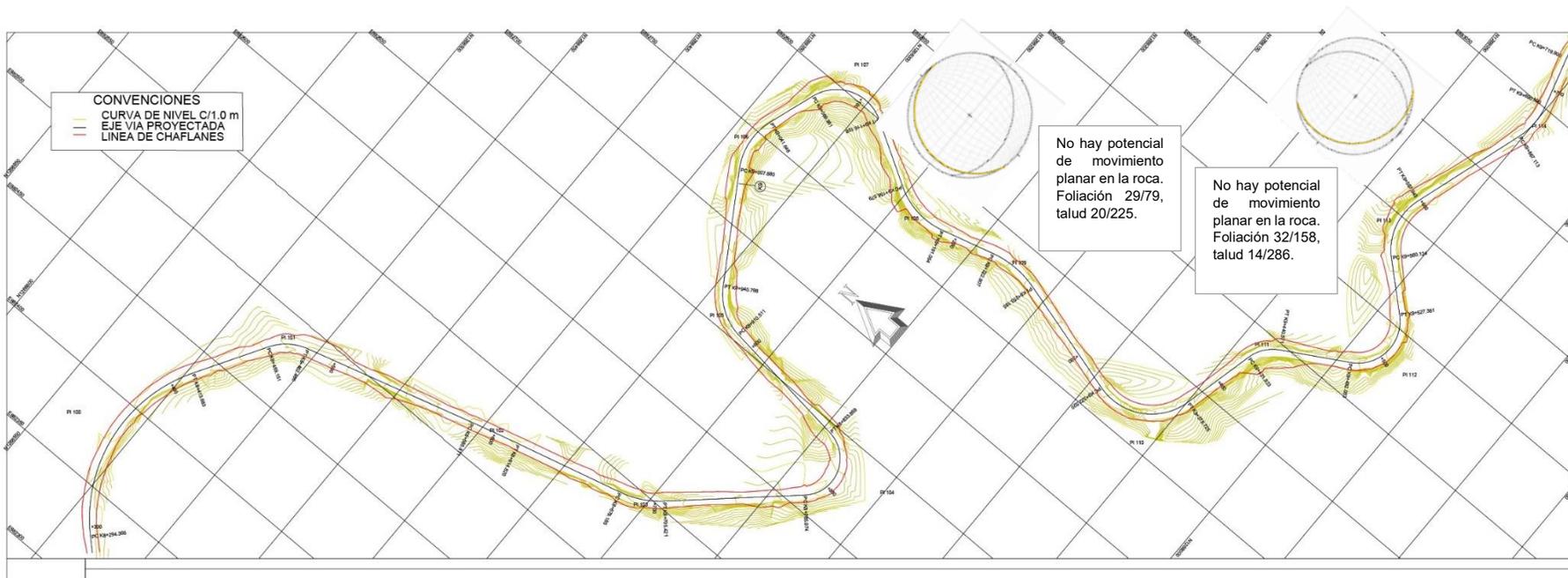


figura 50: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 10+025 y la abscisa 10+755.

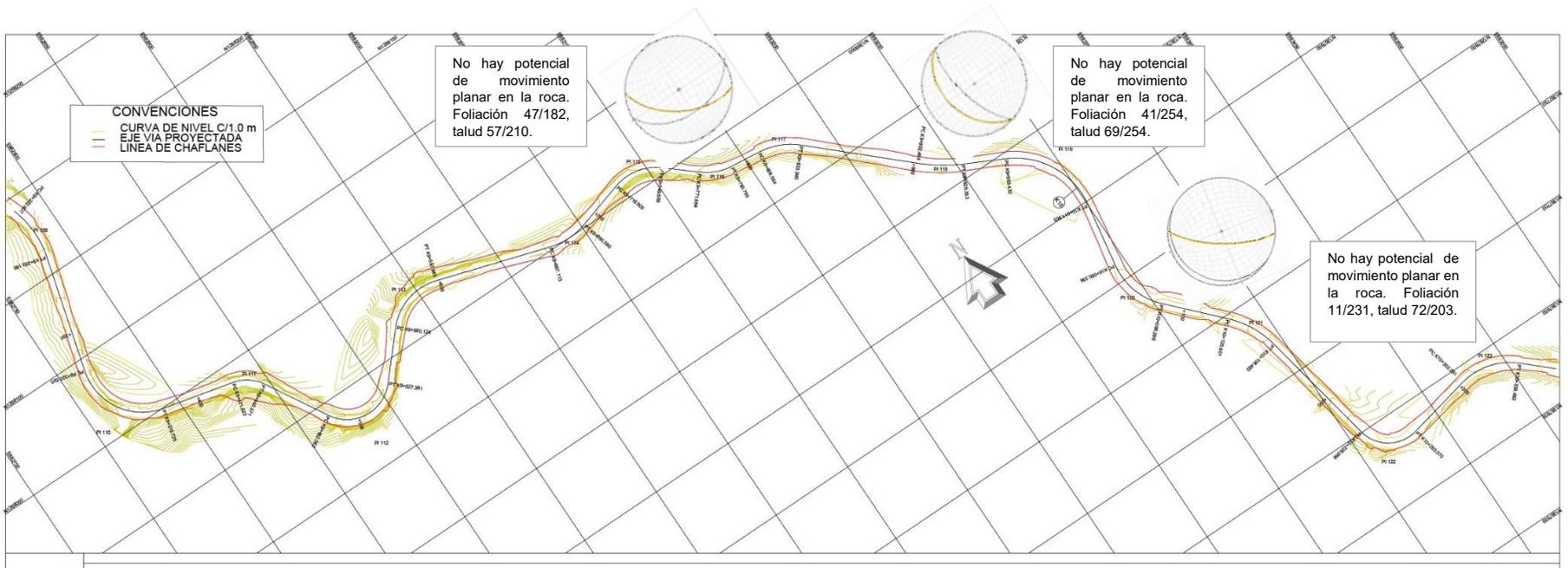


figura 51: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 10+755 y la abscisa 11+350.

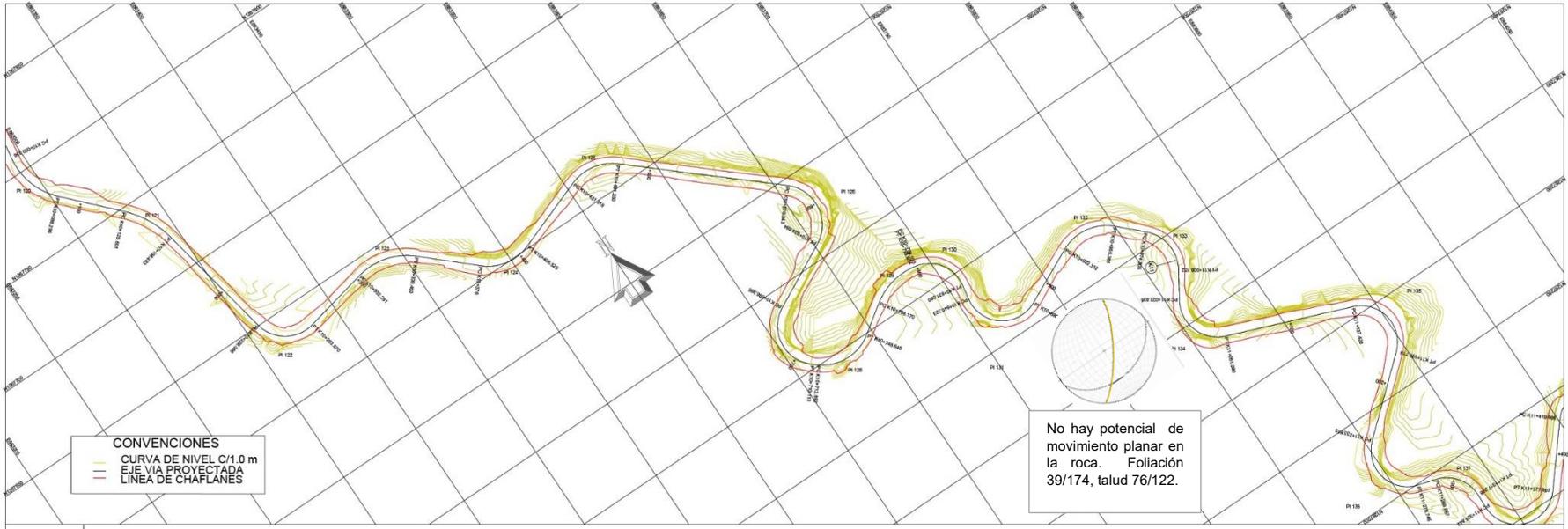


figura 52: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 11+350 y la abscisa 11+899.

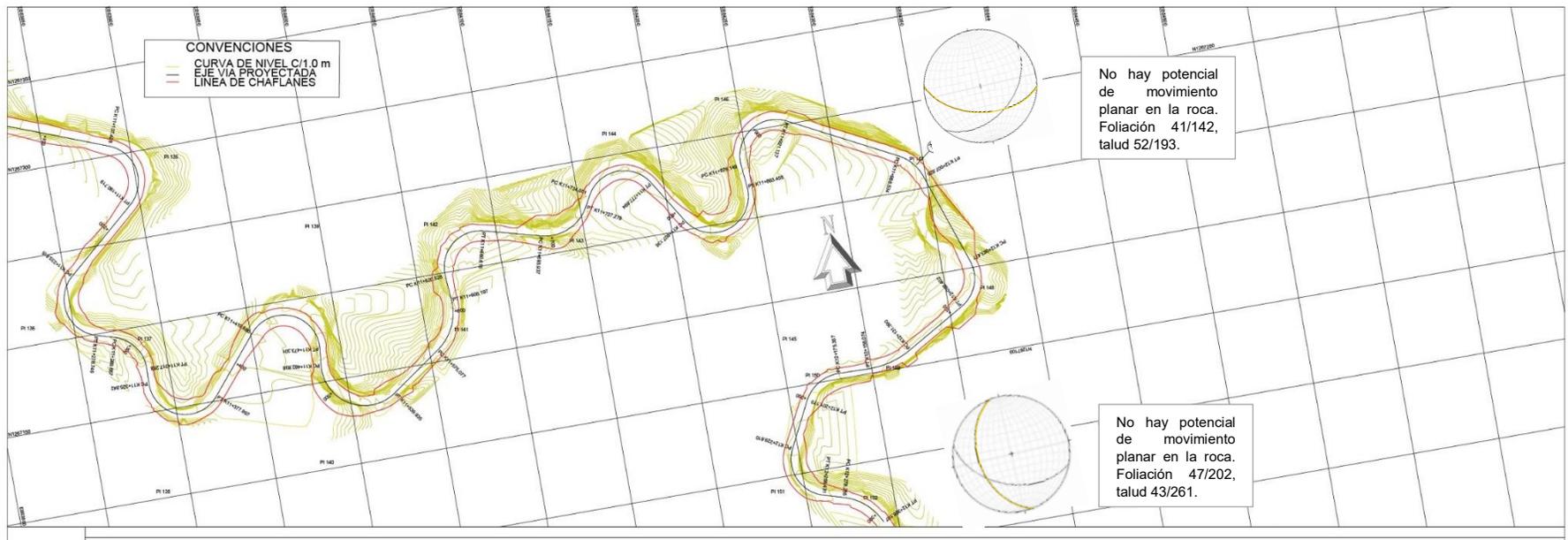


figura 53: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 11+899 y la abscisa 12+590.

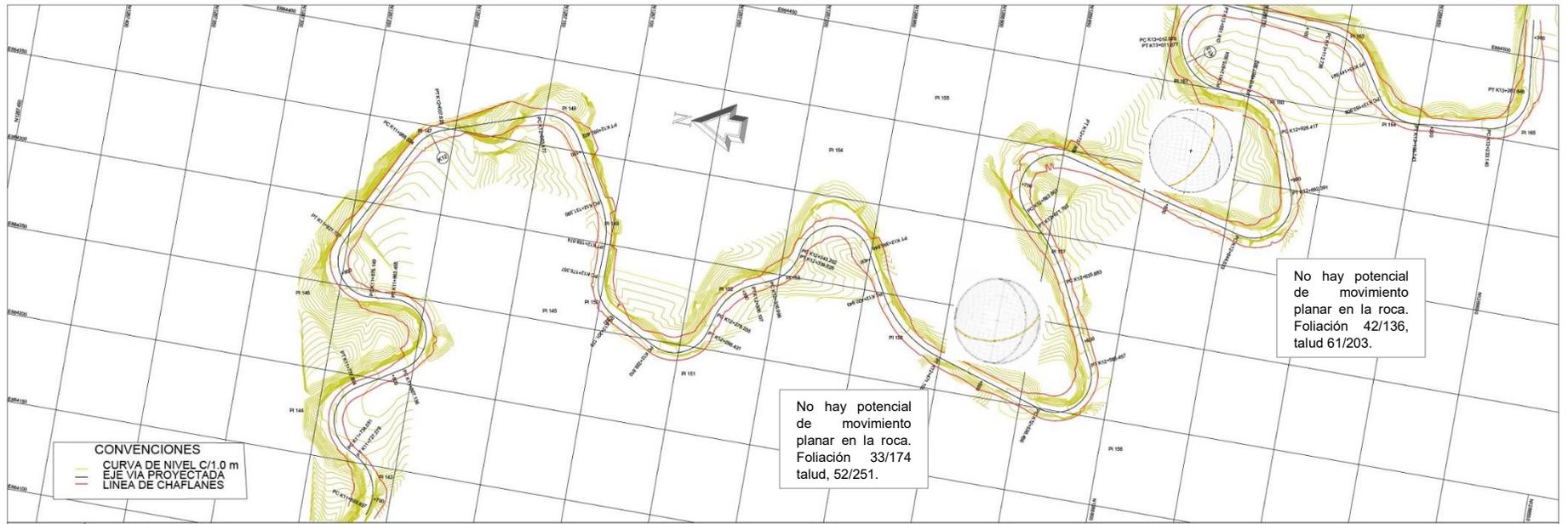


figura 54: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 12+590 y la abscisa 13+338.

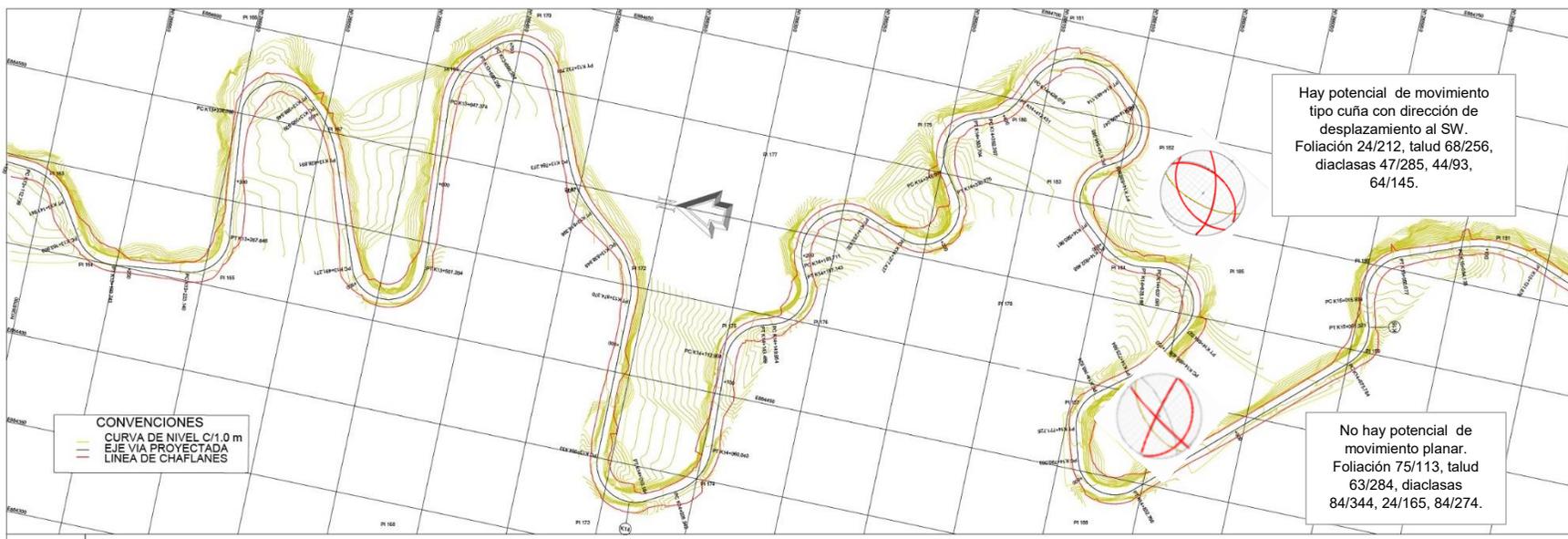


figura 55: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 13+338 y la abscisa 15+675.

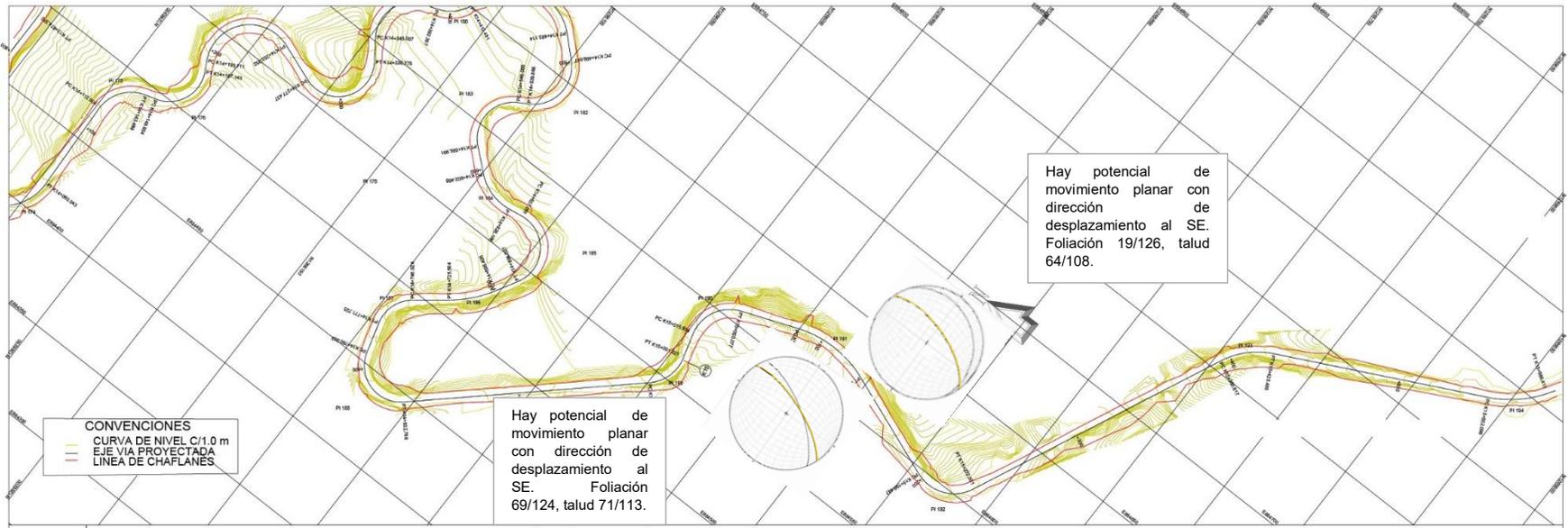


figura 56: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 15+675 y la abscisa 16+644.

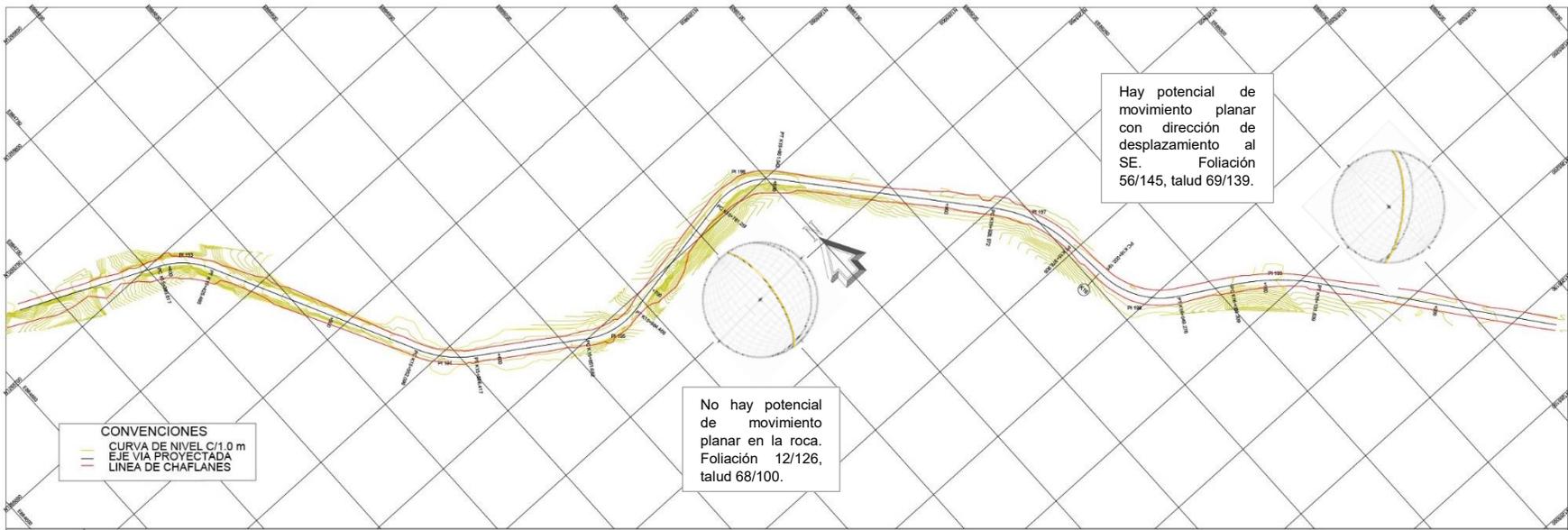


figura 57: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 16+644 y la abscisa 17+030.

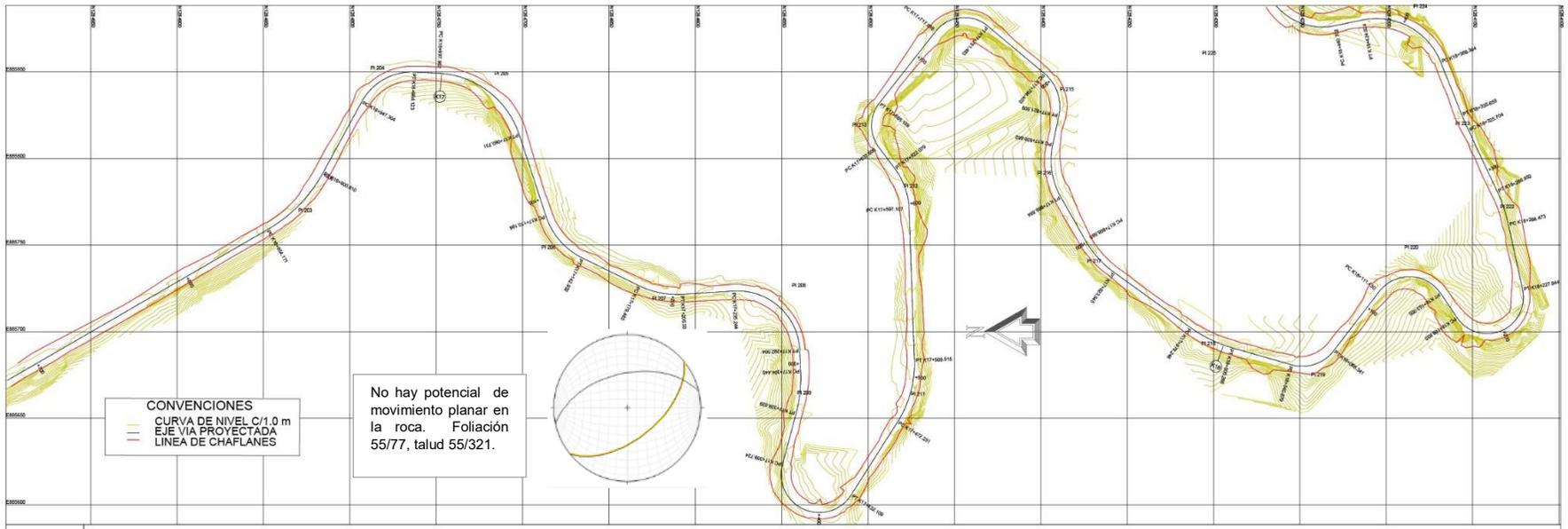


figura 58: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 17+030 y la abscisa 18+100.

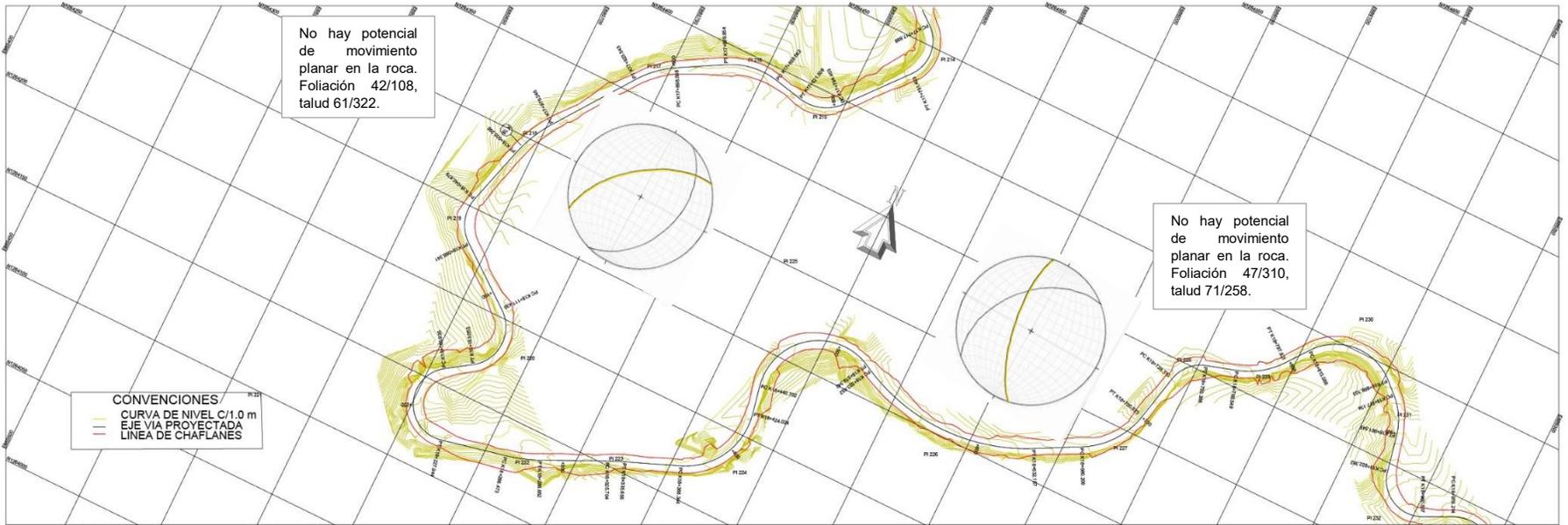


figura 59: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 18+100 y la abscisa 18+756.

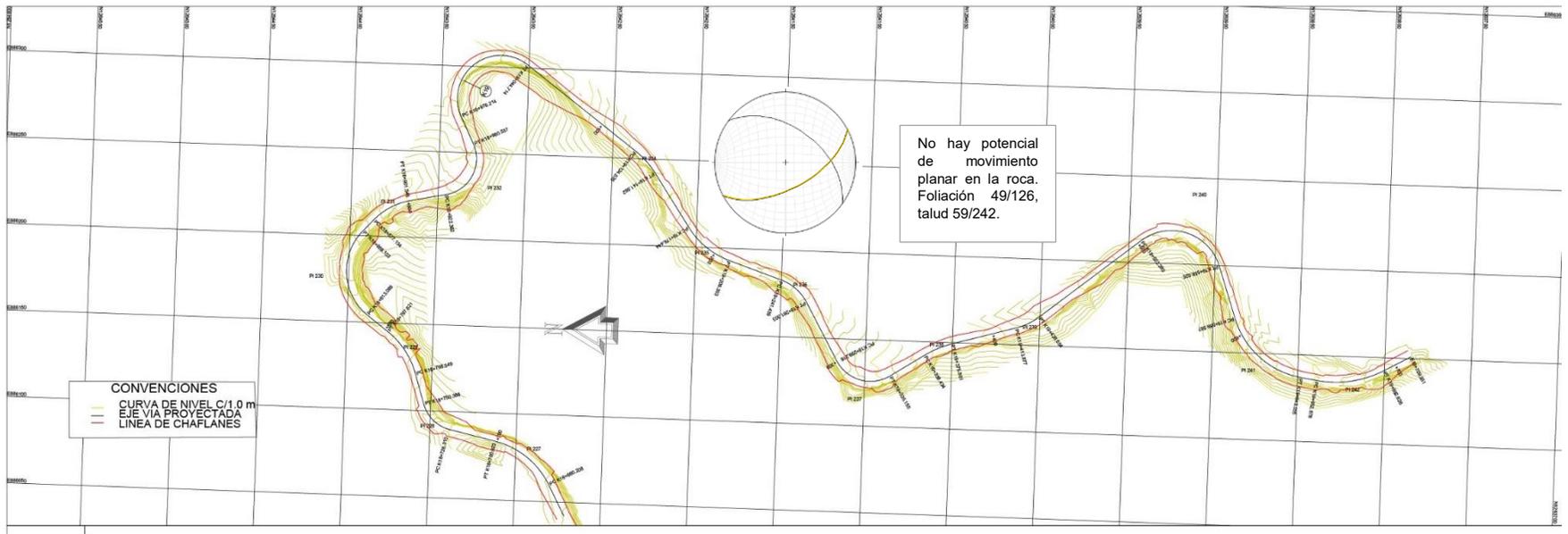


figura 60: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 18+756 y la abscisa 19+580.

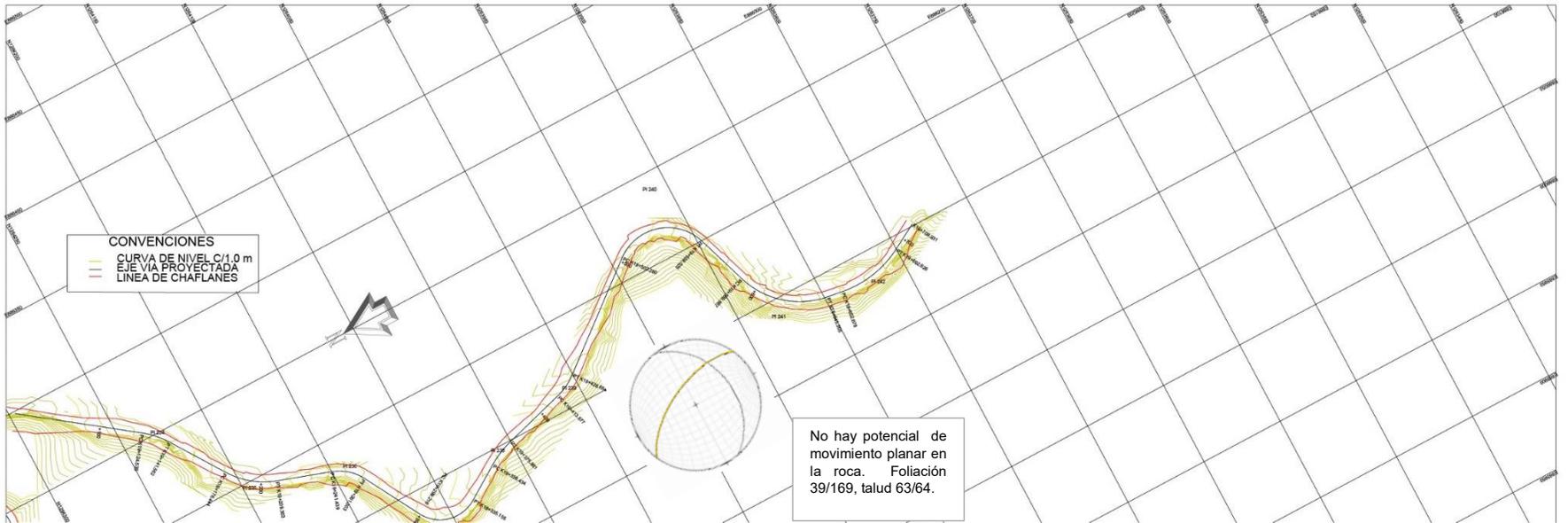


figura 61: Análisis de ruptura en las rocas entre la abscisa km 18+580 y la abscisa 19+700.

Los datos de discontinuidades de planos de foliación y de diaclasamiento se representan de mejor manera en diagramas de contornos que se ilustran los polos de los planos.

Una totalidad de 122 datos estructurales de foliación se graficaron mediante el software Dips versión 5.1, ilustrados en el diagrama de contornos de la figura 62, donde se observa que las direcciones preferenciales de foliación se encuentran alrededor del plano N60°E / 28°SE. Los tonos rojos representan la mayor densidad de concentraciones de polos de foliación, mientras que los tonos azules la menor densidad de concentraciones de polos de foliación.

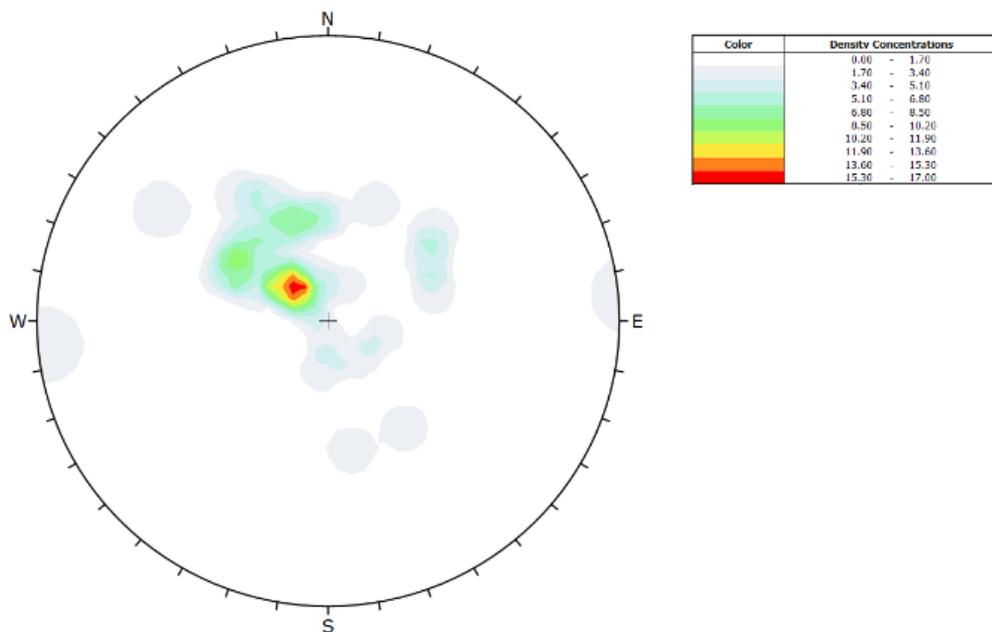


figura 62: Diagrama de contornos que representa los polos de los planos de foliación del corredor vial. Los tonos rojos indican la mayor densidad de polos y los tonos azules la menor densidad de polos. La dirección predominante es N60°E / 28°SE.

El diagrama de contorno de la figura 63 ilustra los polos de 76 datos estructurales de diaclasas, mediante el programa Dips versión 5.1. Las direcciones preferenciales de las estructuras indican diferentes familias localizadas alrededor de los planos N15°E /47°NW, N55°E /64°SE, N03°E /44°SE N74°E /84°NW, N75°E /24°SE y N04°E /84°NW. Los tonos rojos representan la mayor densidad de concentraciones de polos de familias de diaclasas, mientras que los tonos azules la menor densidad de concentraciones de familias de diaclasas.

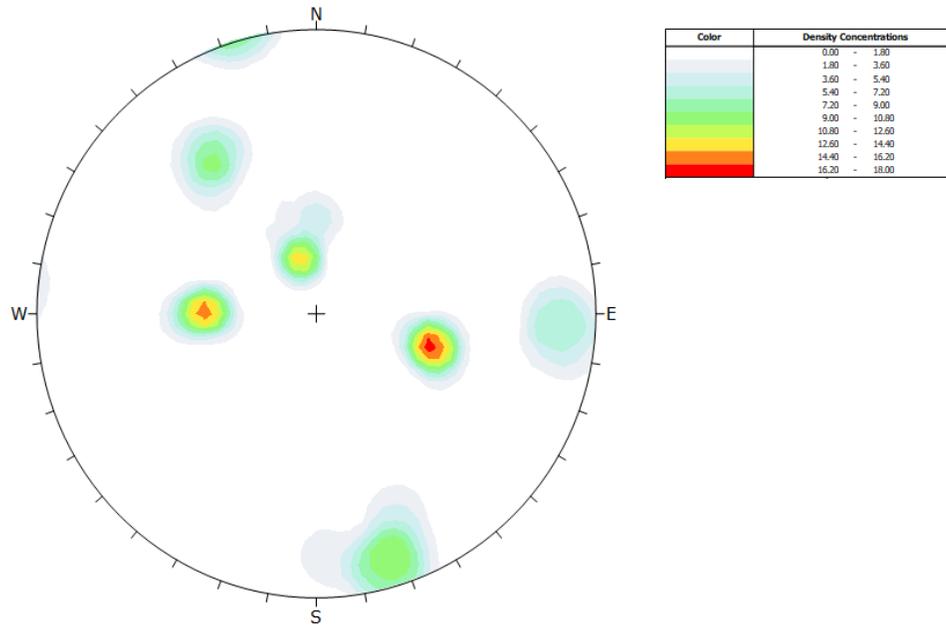


figura 63: Diagrama de contornos que representa los polos de los planos de diaclasamiento del corredor vial. Los tonos rojos indican la mayor densidad de polos y los tonos azules la menor densidad de polos.

Las familias de diaclasas tienen una tendencia de; espaciado entre 60-200 mm lo cual las categoriza como juntas, una continuidad muy baja (menor a 1 m) una abertura muy cerrada (menor a 0,1 mm) una rugosidad ondulada rugosa y sin rellenos. Estas características se establecen en el anexo 1 y se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Variaciones del espaciado, continuidad, abertura, relleno, infiltraciones y rugosidad en las familias de diaclasas.

Familia de diaclasa	Espaciado en mm	Continuidad en m	Abertura en mm	Rugosidad	Relleno	Filtaciones
N15°E /47°NW	Juntas 60-200	Muy baja <1	Muy cerrada <0,1	Ondulada rugosa	No aplica	Clase I
N55°E /64°SE	Juntas 60-200	Muy baja <1	Muy cerrada <0,1	Ondulada rugosa	No aplica	Clase I
N03°E /44°SE	Moderadamente juntas 200-600	Muy baja <1	Muy cerrada <0,1	Plana rugosa	No aplica	Clase I
N74°E /84°NW	Juntas 60-200	Muy baja <1	Muy cerrada <0,1	Ondulada rugosa	No aplica	Clase I
N75°E /24°SE	Juntas 60-200	Muy baja <1	Cerrada 0,1-0,25	Ondulada lisa	No aplica	Clase I
N04°E /84°NW	Juntas 60-200	Muy baja <1	Muy cerrada <0,1	Ondulada rugosa	No aplica	Clase I

6 CARACTERIZACIÓN GEOTECNICA

6.1 EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO

Con miras a adelantar el estudio, se realizaron 10 perforaciones a percusión (o SPT), localizadas como se muestra en la figura 64, y cuyas descripciones se presentan en el anexo 3. Durante su ejecución, se hace el ensayo de resistencia a la penetración estándar el cual sirve para que los ingenieros geotecnistas hagan correlaciones con la resistencia de los suelos. El ensayo consiste en golpear con un martillo de 63,5 kg a una altura de 76 cm mientras se penetran 3 tramos de a 15 cm cada uno, hasta que una de las siguientes cosas ocurra:

- Se llegue a 50 golpes en uno de los intervalos.
- Un total de 100 golpes sean dados.
- No se observe ningún avance durante 10 golpes sucesivos.

En este tipo de perforaciones también se utilizan tubos shelby para la recuperación de los suelos inalterados.

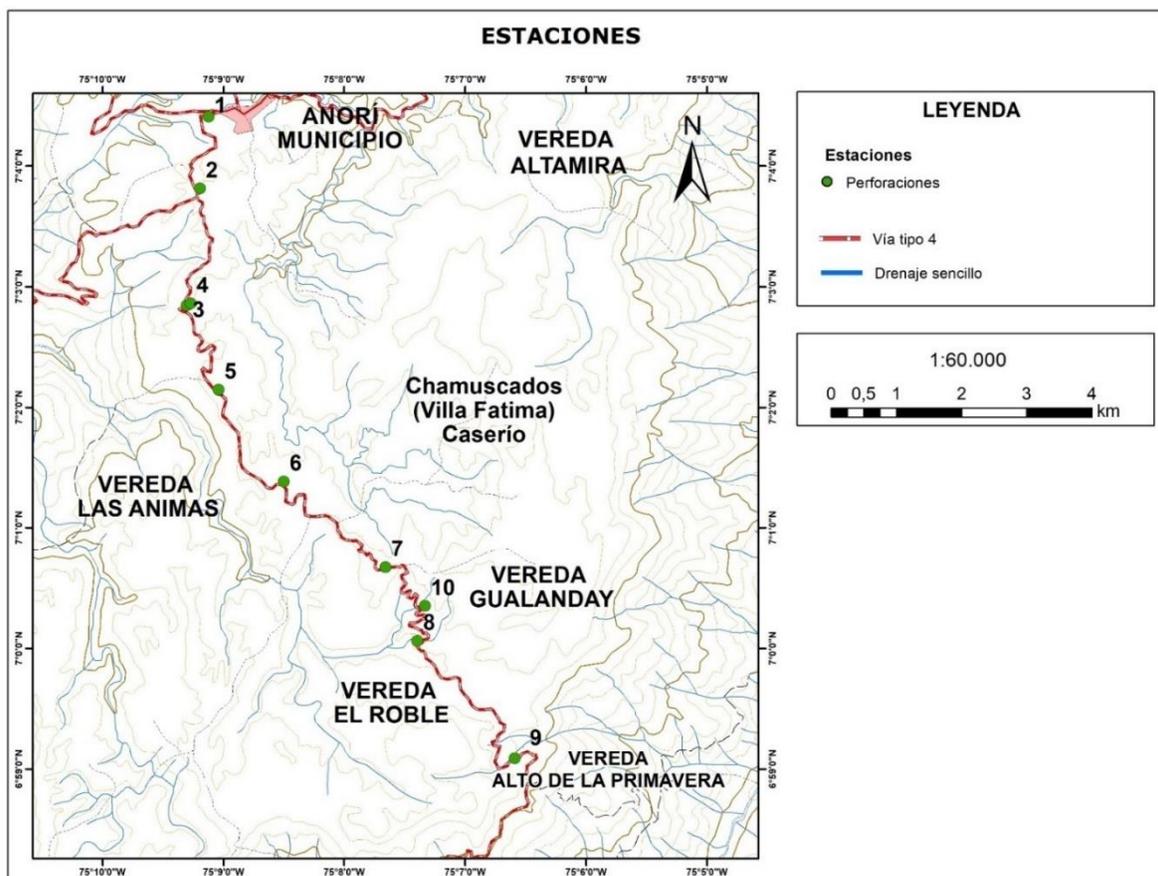


figura 64: Registros geológicos de exploración del subsuelo

6.2 ENSAYOS DE LABORATORIO.

De las 10 perforaciones realizadas a lo largo del corredor vial, solo nueve de ellas tuvieron recuperación de material suficiente para desarrollar ensayos de laboratorio, que incluyeron análisis de humedad, densidad, SPT, triaxial, uniaxial, límite líquido, límite plástico, granulometría y clasificación S.U.C.S. De la Tabla 5 a la Tabla 14 se relacionan los ensayos de laboratorio realizados por perforación y abscisa, y en el anexo 2 se entregan los resultados de los laboratorios.

Tabla 5: Ensayos de laboratorio para la perforación SPT-1.

Profundidad	Perfil de meteorización	SPT			Humedad	Densidad	Triaxial C - Φ	Uniaxial	Límite líquido	Límite plástico	Granulometría			Clasificación S.U.C.S	Muestra
		15 cm	30 cm	45 cm							>#4	<#4;>#200	<#200		
0,5 m	materia organica	1	1	1											
0,8 m	suelo residual	1	2	2											
1 m		1	2	2	26,1	15,5	30,3-25,6		58	17	1,5	22,4	76,1	CH M3	
1,6 m	saprolito	5	6	17											
2 m		16	10	10											
2,5 m		13	13	13											
3 m		12	11	20	19	17,1	39,6-30,8		43	34	2,1	19,3	78,6	ML M7	
3,3 m	suelo-roca	21	25	20											
3,8 m		17	15	17											
4,2 m		12	14	17											
4,7 m		14	16	17											
5,1 m		13	16	19											
5,6 m		14	18	20											
6 m		21	25	26											
6,5 m		21	25	33	24				69	21	1,1	15	83,9	CH M15	
7 m	29	37	R												

Tabla 6: Ensayos de laboratorio para la perforación SPT-2.

Profundidad	Perfil de meteorización	SPT			Humedad	Densidad	Triaxial C - ϕ	Uniaxial	Límite líquido	Límite plástico	Granulometría			Clasificación n S.U.C.S	Muestra
		15 cm	30 cm	45 cm							>#4	<#4;>#200	<#200		
0,5 m	materia organica	1	1	3											
0,8 m	saprolito	2	2	2											
1 m		2	2	2	22,8	12,3		115,9						M3	
1,6 m		3	6	5											
2 m		6	10	11											
2,5 m		10	12	12											
2,9 m	suelo-roca	10	10	12											
3,3 m		10	9	9											
3,6 m		9	13	17											
3,8 m		14	17	21											
4,2 m		18	21	32											
4,8 m		33	32	32											
5,1 m		25	33	34											
5,6 m		21	32	29											
6 m		21	25	26											
6,5 m		28	28	30											
7,5 m		27	32	R											

Tabla 7: Ensayos de laboratorio para la perforación SPT-3.

Profundidad	Perfil de meteorización	SPT			Humedad	Densidad	Triaxial C - ϕ	Uniaxial	Límite líquido	Límite plástico	Granulometría			Clasificación n S.U.C.S	Muestra
		15 cm	30 cm	45 cm							>#4	<#4;>#200	<#200		
0,5 m	materia organica	1	1	1											
0,7 m	saprolito	1	2	2											
1 m		1	2	3	21	14,1		91,7	45	28	4	47	49	SM M 3	
1,5 m		5	8	6											
2 m		8	9	11											
2,5 m	suelo-roca	25	33	49											
3 m		49	49	39											
3,5 m		25	29	34											
3,9 m		34	35	52											

Tabla 8: Ensayos de laboratorio para la perforación SPT-4.

Profundidad	Perfil de meteorización	SPT			Humedad	Densidad	Triaxial C - ϕ	Uniaxial	Límite líquido	Límite plástico	Granulometría			Clasificación n S.U.C.S	Muestra
		15 cm	30 cm	45 cm							>#4	<#4;>#200	<#200		
0,4 m	saprolito	1	2	5											
0,8 m		5	7	8											
1,2 m		5	7	8	26,5				57	24	0,1	31,5	68,4	CH M 2	
1,6 m	suelo-roca	15	21	21											
2 m		21	18	20											
2,5 m		21	33	34											
3 m		50	52	R											

Tabla 9: Ensayos de laboratorio para la perforación SPT-5.

Profundidad	Perfil de meteorización	SPT			Humedad	Densidad	Triaxial C - ϕ	Uniaxial	Límite líquido	Límite plástico	Granulometría			Clasificación S.U.C.S	Muestra
		15 cm	30 cm	45 cm							>#4	<#4;>#200	<#200		
0,5 m	materia orgánica	1	2	2											
0,7 m	saprolito	5	6	4											
1 m		2	3	5	15,3	15,4	14,3-32,3		38	26	14,5	47,7	37,8	SM M 3	
1,5 m		6	5	4											
2 m		6	7	8											
2,5 m	suelo-roca	8	11	11											
3 m		10	11	11											
3,4 m		10	9	9											
3,9 m		8	11	12											
4,2 m		11	11	12											
4,7 m		12	13	13											
5,3 m		13	14	23											
5,6 m		15	21	18											
6 m		28	33	34											
6,5 m		21	25	30											
7 m		17	20	21	11,6				46	28	7,3	59,7	33,1	SM M 16	
7,5 m	17	25	19												
8 m	21	43	52												

Tabla 10: Ensayos de laboratorio para la perforación SPT- 6.

Profundidad	Perfil de meteorización	SPT			Humedad	Densidad	Triaxial C - ϕ	Uniaxial	Límite líquido	Límite plástico	Granulometría			Clasificación S.U.C.S	Muestra
		15 cm	30 cm	45 cm							>#4	<#4;>#200	<#200		
0,3 m	materia organica	1	1	1											
0,6 m	saprolito	1	2	3											
1 m		2	3	3	21,7	13,4		219,5	42	23	8,3	25,6	66,1	CL	M 3
1,6 m	suelo-roca	9	11	13											
2 m		13	14	17											
2,5 m		21	25	19											
2,8 m		19	16	19											
3,2 m		14	16	20											
3,6 m		27	21	24											
4,2 m		21	24	30											
4,7 m		33	35	42											
5,3 m		37	41	R											

Tabla 11: Ensayos de laboratorio para la perforación SPT- 7.

Profundidad	Perfil de meteorización	SPT			Humedad	Densidad	Triaxial C - ϕ	Uniaxial	Límite líquido	Límite plástico	Granulometría			Clasificación n S.U.C.S	Muestra
		15 cm	30 cm	45 cm							>#4	<#4;>#200	<#200		
0,4 m	materia organica	1	1	2											
0,8 m	suelo residual	2	2	2											
1,2 m	saprolito	10	11	20	21	12,9		120,9	40	23	11,2	33,9	54,9	CL	M 3
1,7 m		11	13	17											
2,1 m	suelo-roca	17	21	26											
2,5 m		21	33	44											
3 m		33	36	49											
3,4 m		39	46	52											
3,9 m		48	46	51											
4,4 m		50	51	R											

Tabla 12: Ensayos de laboratorio para la perforación SPT- 8.

Abcisa	Ensayo	Profundidad	Perfil de meteorización	SPT			Humedad	Densidad	Triaxial C - ϕ	Uniaxial	Límite líquido	Límite plástico	Granulometría			Clasificación n S.U.C.S	
				15 cm	30 cm	45 cm							>#4	<#4;>#200	<#200		
15+400	SPT-8	0,4 m	saprolito	2	3	6											
		0,6 m		6	8	10											
		1,2 m		6	10	13											
		1,7 m	suelo-roca	13	24	36											
		2,1 m		37	46	46											
		2,6 m		52	52	52											
		2,9 m		52													

Tabla 13: Ensayos de laboratorio para la perforación SPT- 9.

Profundidad	Perfil de meteorización	SPT			Humedad	Densidad	Triaxial C - ϕ	Uniaxial	Límite líquido	Límite plástico	Granulometría			Clasificación S.U.C.S	Muestra
		15 cm	30 cm	45 cm							>#4	<#4;>#200	<#200		
0,3 m	materia organica	1	1	2											
0,7 m	suelo residual	1	1	1											
1,2 m		1	1	1	13,7	15,5	18,5-34,3		41	22	4,3	65,9	29,8	SC	M 3
1,7 m	saprolito	5	6	8											
2,1 m		9	11	9											
2,5 m		13	10	10											
2,9 m		9	6	7											
3,4 m		6	7	9											
4 m	suelo -roca	13	11	15	8,5				29	22	3	70,4	26,6	SC	M 9
4,4 m		29	43	R											

Tabla 14: Ensayos de laboratorio para la perforación SPT-10.

Profundidad	Perfil de meteorización	SPT			Humedad	Densidad	Triaxial C - Φ	Uniaxial	Límite líquido	Límite plástico	Granulometría			Clasificación S.U.C.S	Muestra
		15 cm	30 cm	45 cm							>#4	<#4;>#200	<#200		
0,3 m	suelo residual	1	1	1											
0,6 m		1	1	1											
1,2 m		1	1	2											
1,6 m		2	2	2											
2 m		2	2	2											
2,5 m		2	2	3	31	13,6	23,1-37,2		39	30	0,6	40,4	59	ML	M 6
3 m		2	3	3											
3,5 m		2	3	3											
3,8 m	sapolito	6	5	6											
4,2 m		11	11	13	25,8	15,3	27,8-25		46	25	0,7	36	63,4	CL	M 10
4,6 m		11	11	11											
5,3 m		14	10	11											
5,6 m		9	9	10											
6 m	10	10	13												
6,5 m	suelo- roca	15	15	18											
7 m		15	18	17											
7,5 m		15	17	20											
8 m		19	22	29											
8,5 m		29	38	R											

6.3 VARIACIONES DEL ENSAYO SPT.

A partir de los datos proporcionados de 10 ensayos SPT (ensayo de penetración estándar) tomados a lo largo del corredor vial correspondiente al área de estudio, se integra la relación de NSPT (número de golpes en los dos tramos inferiores de 15 cm) vs. Profundidad alcanzada.

Los mayores números de golpes alcanzados en el ensayo corresponden a niveles de meteorización de transición suelo-roca y saprolito, mientras que los menores números de golpes corresponden a niveles de meteorización de suelo residual y zona de materia orgánica.

A continuación, se muestran las 10 variaciones SPT graficadas, de la figura 64 a la figura 74.

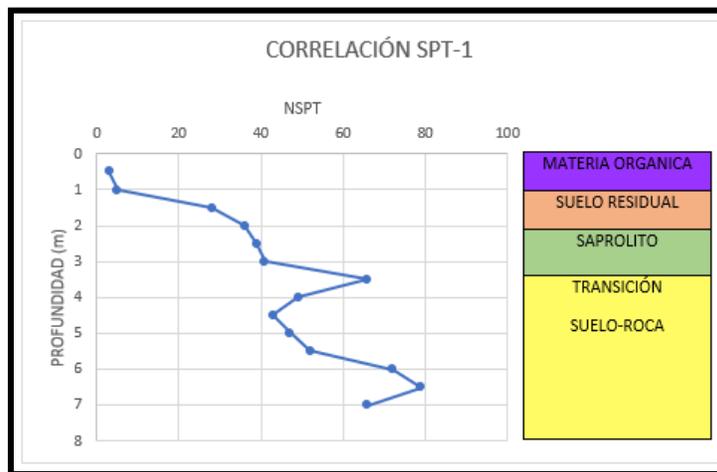


figura 65: Correlación SPT-1. Integración de la relación de NSPT vs. Profundidad.

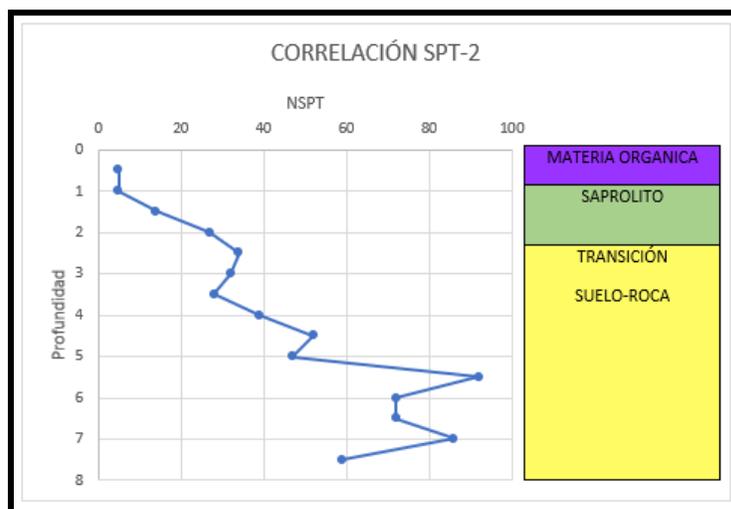


figura 66: Correlación SPT-2. Integración de la relación de NSPT vs. Profundidad.

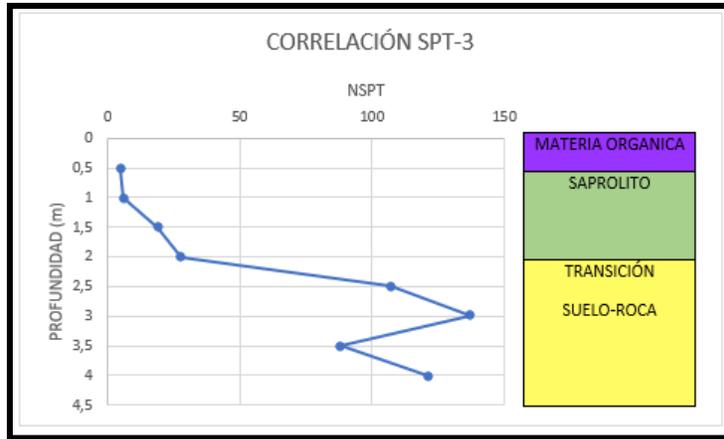


figura 67: Correlación SPT-3. Integración de la relación de NSPT vs. Profundidad.

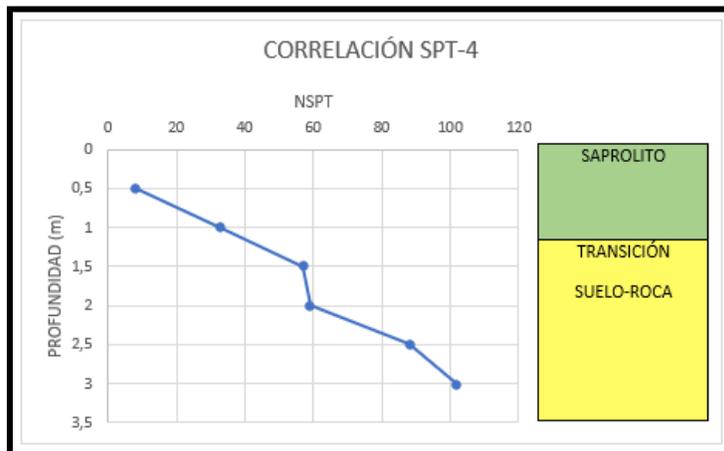


figura 68: Correlación SPT-4. Integración de la relación de NSPT vs. Profundidad.

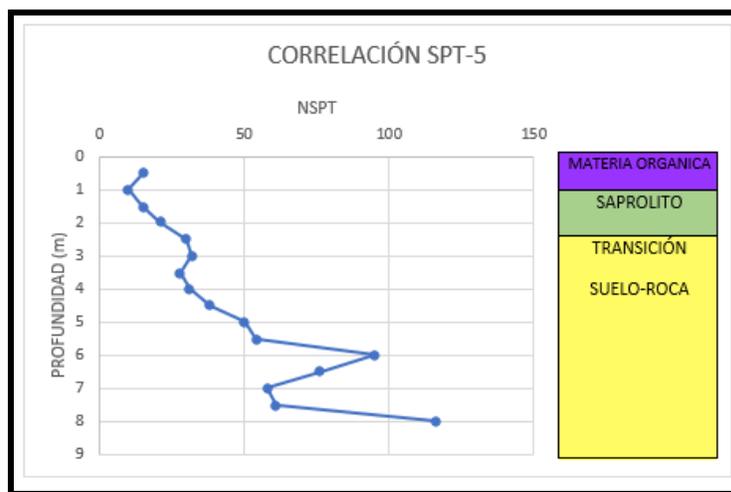


figura 69: Correlación SPT-5. Integración de la relación de NSPT vs. Profundidad.

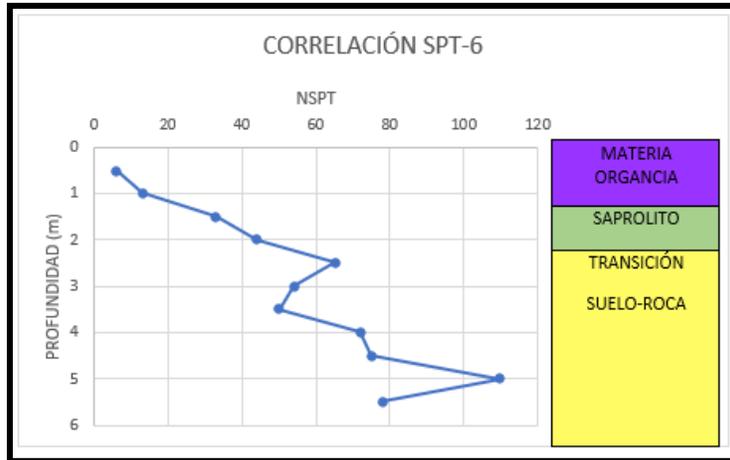


figura 70: Correlación SPT-6. Integración de la relación de NSPT vs. Profundidad.

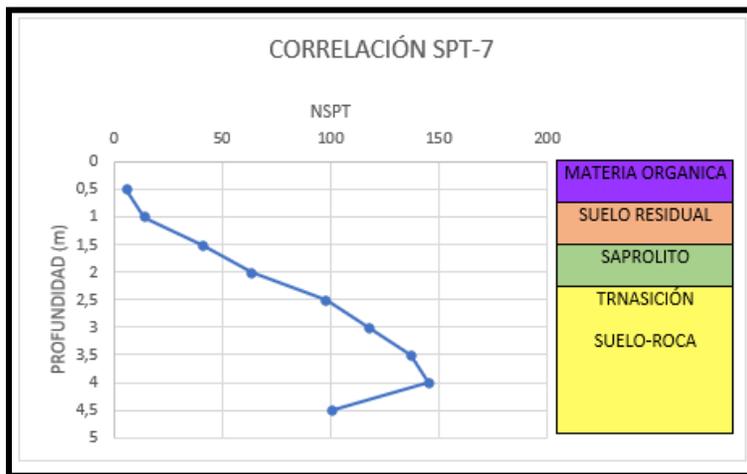


figura 71: Correlación SPT-7. Integración de la relación de NSPT vs. Profundidad.

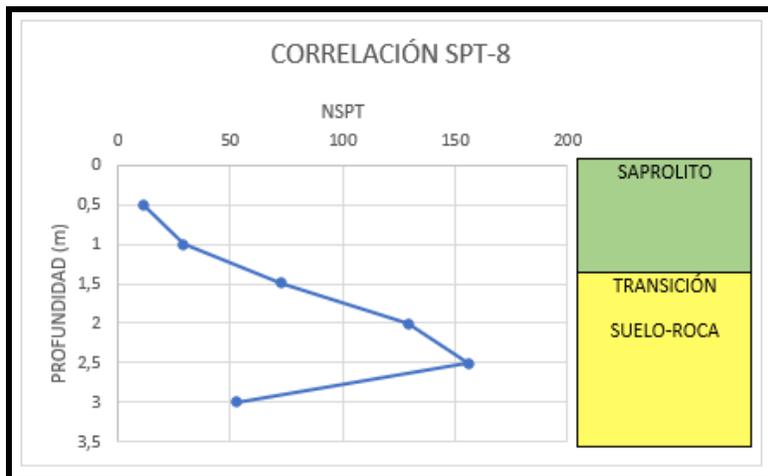


figura 72: Correlación SPT-8. Integración de la relación de NSPT vs. Profundidad.

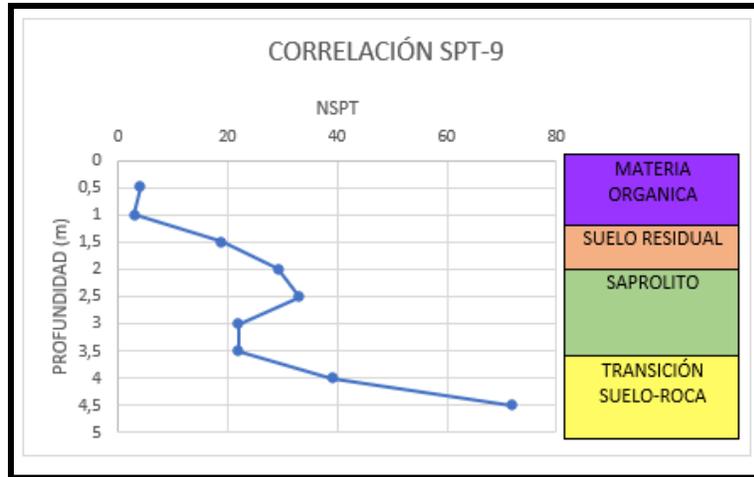


figura 73: Correlación SPT-9. Integración de la relación de NSPT vs. Profundidad.

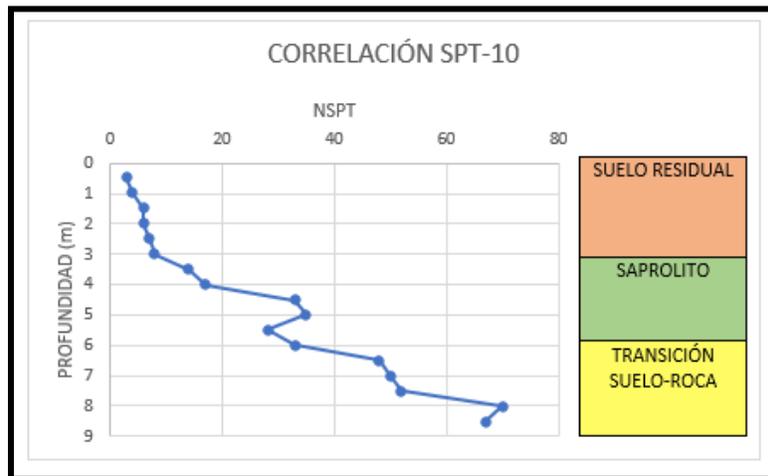


figura 74: Correlación SPT-10. Integración de la relación de NSPT vs. Profundidad.

6.4 CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO.

Se graficaron los valores de humedad, índice de plasticidad y resistencia a la compresión respecto a la profundidad para determinar la variación entre ellas (figura 75, figura 76 y figura 77)

Debido a la uniformidad litológica y geomorfológica del corredor, se integraron en una sola gráfica la variación de humedad vs. La profundidad, así mismo, la resistencia a la compresión vs. La profundidad y el índice de plasticidad vs. La profundidad.

6.4.1 Variación de la humedad

Se graficó el contenido de humedad en porcentaje de las muestras pertenecientes a los horizontes de suelo residual, saprolito y transición suelo-roca vs. La profundidad en metros, para conocer como el porcentaje de humedad varía en cada horizonte dentro el perfil de meteorización de la litología metamórfica presente (figura 75)

Para el horizonte de suelo residual, se hizo análisis de humedad en la perforación 1, 9 y 10. Los valores adquiridos en el análisis indican que la humedad en el horizonte varía entre 13.7% y 31% a profundidades entre 1 m y 2,5 m. Lo cual indica que hay un alto porcentaje de material fino.

Para el horizonte de saprolito, se hizo análisis de humedad en la perforación 1,2,3,4,5,6,7 y 10. Los valores adquiridos en el análisis indican que la humedad varía entre 15% y 26% a profundidades entre 1 m y 4,2 m. Lo cual indica que hay una integración de suelo fino y granular.

Para el horizonte de transición suelo-roca, se hizo análisis de humedad en la perforación 1,5 y 9. Los valores adquiridos en el análisis indican que la humedad varía entre 8% y 24% a profundidades entre 4 m y 7 m. Lo cual indica que hay alto porcentaje de suelo granular.

El material que presentó mayor humedad de los tres horizontes fue el suelo residual, seguido del saprolito y por último, el horizonte con la menor humedad fue transición suelo-roca.

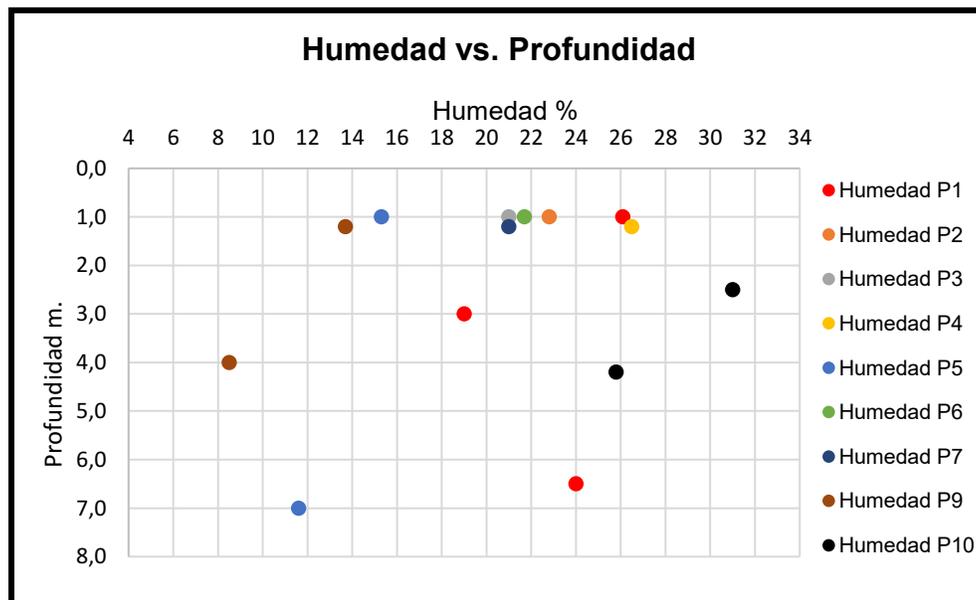


figura 75: Relación humedad vs. Profundidad en 9 perforaciones.

6.4.2 Variación del índice de plasticidad.

Se graficó el índice de plasticidad en porcentaje de las muestras pertenecientes a los horizontes de suelo residual, saprolito y transición suelo-roca vs. La profundidad en metros (figura 76)

Para el horizonte de suelo residual, se hizo análisis de índice de plasticidad en la perforación 1, 9 y 10. Los valores adquiridos en el análisis indican que el índice de plasticidad varía entre 9% y 41% a profundidades entre 0 m y 1 m. Por lo cual se requiere entre poca a media cantidad de agua para que el suelo pase del estado semisólido al líquido.

Para el horizonte de saprolito, se hizo análisis de índice de plasticidad en la perforación 1,3,4,5,6,7 y 10. Los valores adquiridos en el análisis indican que el índice de plasticidad varía entre 9% y 32% a profundidades entre 1 m y 3 m. Por lo cual se requiere entre poca a media cantidad de agua para que el suelo pase del estado semisólido al líquido.

Para el horizonte de transición suelo-roca, se hizo análisis de índice de plasticidad en la perforación 1,5 y 9. Los valores adquiridos en el análisis indican que el índice de plasticidad varía entre 6% y 48% a profundidades entre 4 m y 7 m. Por lo cual se requiere entre poca a media cantidad de agua para que el suelo pase del estado semisólido al líquido.

El horizonte que requiere menor cantidad de agua para que el material pase del estado semisólido a líquido por su menor porcentaje en el índice de plasticidad es, el horizonte de sarprolito, seguido del suelo residual y, por último, transición suelo-roca.

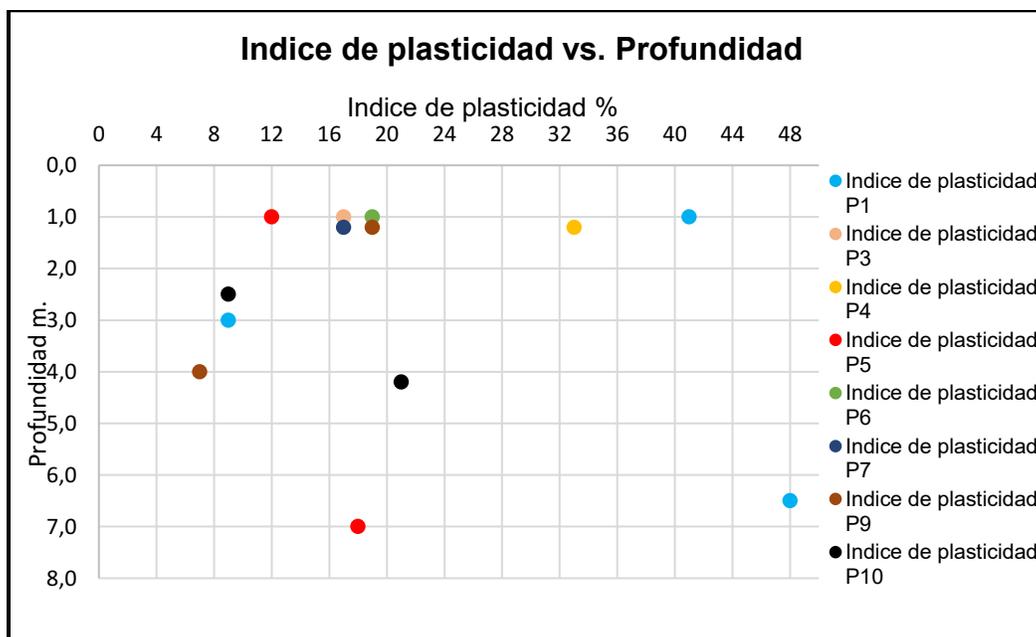


figura 76. Relación índice de plasticidad vs. Profundidad.

6.4.3 Variación de la resistencia a la compresión simple (uniaxial)

Se graficaron los datos resistencia a la compresión de las muestras del horizonte de saprolito vs. La profundidad. El ensayo de compresión se realizó para determinar el esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento.

Para el horizonte de saprolito, se hizo análisis de resistencia a la compresión en la perforación 2,3 y 7. Los valores adquiridos en el análisis indican que la compresión varía entre 90 Kpa y 220 Kpa a profundidades entre 1 m y 1,2 m (figura 77). Lo cual indica que la roca es dura y requiere una alta fuerza aplicada sobre el área de aplicación en este horizonte y a esta profundidad.

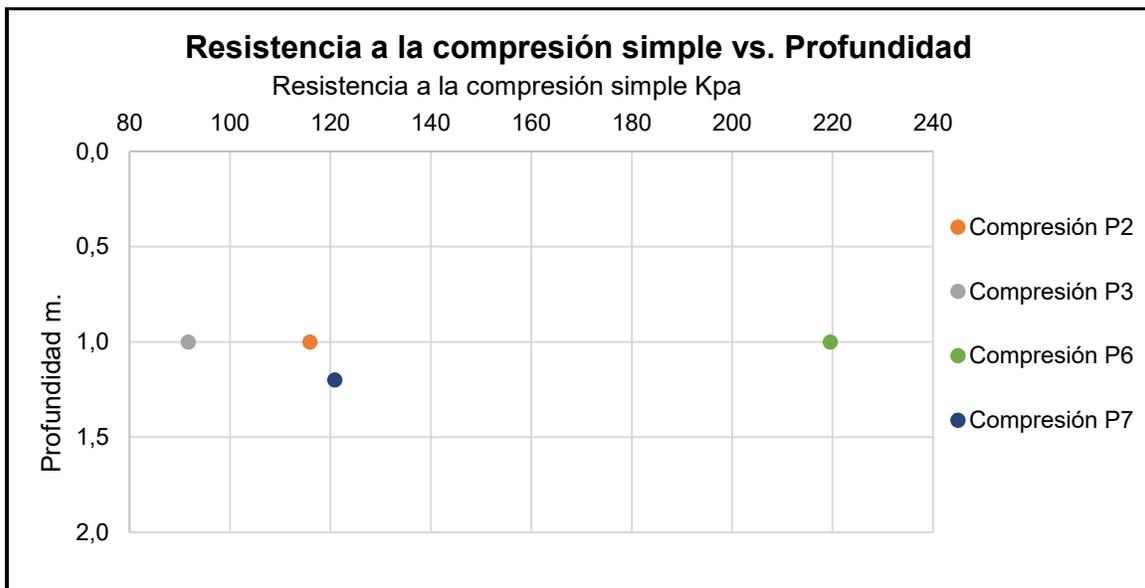


figura 77: Relación límite plástico vs. Profundidad.

Los resultados por estrato se resumen en la Tabla 15.

Tabla 15. Tabla resumen de las variaciones de humedad, índice de plasticidad y resistencia a la compresión simple, respecto a cada estrato.

Estratos	Humedad			Índice de Plasticidad			Resistencia a la Compresión Simple		
	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio
Suelo residual	26%	15,50%	20,75%	41%	9%	25,0%	N/A	N/A	N/A
Saprolito	30,50%	13,50%	22%	32%	9%	20,5%	220 Kpa	90 Kpa	155 Kpa
Transición suelo-roca	25,5%	8%	16,8%	48%	6%	27,0%	N/A	N/A	N/A

6.5 CLASIFICACIÓN GEOMECAICA DE LOS MACIZOS ROCOSOS.

El proyecto será excavado básicamente en suelo. Solo se encontraron dos sitios con presencia de roca en la base del talud, para los cuales se hizo la clasificación de macizo rocoso por el método Rock Mass Rating (RMR) propuesta por Bieniawsky (1973). Los resultados muestran un macizo de buena calidad, con valores de 63 y 69, respectivamente.

6.5.1 RMR en estación geomecánica 1 abscisa km 14+822.

CLASIFICACION GEOMECAICA RMR (BIENIAWSKI, 1989)									
1	RESISTENCIA A LA MATRIZ ROCOSA (MPa)	ENSAYO DE CARGA PUNTUAL	> 10	10 - 4	4 - 2	2 - 1	COMPRESION SIMPLE (MPa)		
		COMPRESION SIMPLE	>250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5	5 - 1	<1
PUNTUACION			15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90 % - 100 %	75 % - 90 %	50 % - 75 %	25 % - 50 %	< 25 %		
	PUNTUACION		20	17	13	6	3		
3	SEPARACION DE DIACLASA		> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	0.06 - 0.2 m	< 0.06 m		
	PUNTUACION		20	15	10	8	5		
4	ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES	LONG DE LA DISCONTINUIDAD	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
		PUNTUACION	6	4	2	1	0		
		ABERTURA	Nada	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
		PUNTUACION	6	5	3	1	0		
		RUGOSIDAD	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente Rugosa	Ondulada	Suave		
		PUNTUACION	6	5	3	1	0		
		RELLENO	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm		
		PUNTUACION	6	4	2	2	0		
ALTERACION	Inalterada	Ligeramente Alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta				
	PUNTUACION	6	5	3	1	0			
5	AGUA FREATICA	CAUDAL POR 10m DE TUNEL	Nulo	< 10 litros/min	10 - 25 litros/min	25 - 125 litros/min	> 125 litros/min		
		RELACION: PRESION DE AGUA/TENSION PRINCIPAL MAYOR	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		ESTADO GENERAL	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
		PUNTUACION	15	10	7	4	0		
CLASIFICACION	CLASE	I	II	III	IV	V			
	CALIDAD	Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala			
	PUNTUACION	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20			

La suma de cada uno de los valores indicados por cada parámetro (puntos rojos), da un total de 63 puntos. Esto lo ubica en el rango de puntuación de RMR entre 80-61, indicando una calidad del macizo Buena clase ..

RMR ESTACIÓN GEOMECAICA 1 = 63

6.5.2 RMR en estación geomecánica 2 abscisa km 15+100

CLASIFICACION GEOMECANICA RMR (BIENIAWSKI, 1989)								
1	RESISTENCIA A LA MATRIZ ROCOSA (MPa)	ENSAYO DE CARGA PUNTUAL	> 10	10 - 4	4 - 2	2 - 1	COMPRESION SIMPLE (MPa)	
		COMPRESION SIMPLE	>250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5	5 - 1
	PUNTUACION		15	12	7	4	2	1
2	RQD		90 % - 100 %	75 % - 90 %	50 % - 75 %	25 % - 50 %	< 25 %	
	PUNTUACION		20	17	13	6	3	
3	SEPARACION DE DIACLASA		> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	0.06 - 0.2 m	< 0.06 m	
	PUNTUACION		20	15	10	8	5	
4	ESTADO DE LAS DISCONTINUIDADES	LONG DE LA DISCONTINUIDAD	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m	
		PUNTUACION	6	4	2	1	0	
		ABERTURA	Nada	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm	
		PUNTUACION	6	5	3	1	0	
		RUGOSIDAD	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente Rugosa	Ondulada	Suave	
		PUNTUACION	6	5	3	1	0	
		RELLENO	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm	
		PUNTUACION	6	4	2	2	0	
		ALTERACION	Inalterada	Ligeramente Alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta	
PUNTUACION	6	5	3	1	0			
5	AGUA FREATICA	CAUDAL POR 10m DE TUNEL	Nulo	< 10 litros/min	10 - 25 litros/min	25 - 125 litros/min	> 125 litros/min	
		RELACION: PRESION DE AGUA/TENSION PRINCIPAL MAYOR	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5	
		ESTADO GENERAL	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo	
		PUNTUACION	15	10	7	4	0	
CLASIFICACION	CLASE	I	II	III	IV	V		
	CALIDAD	Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala		
	PUNTUACION	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20		

La suma de cada uno de los valores indicados por cada parámetro (puntos rojos), da un total de 69 puntos. Esto lo ubica en el rango de puntuación de RMR entre 80-61, indicando una calidad del macizo Buena clase II.

RMR ESTACIÓN GEOMECANICA 2 = 69

7 ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES.

7.1 METODOLOGÍA

El estudio de la evaluación de los modelos geotécnicos se realiza con el fin de definir el comportamiento mecánico de los taludes, lo cual permitirá determinar el grado de estabilidad, mediante la evaluación del factor de seguridad, cuyo criterio de aceptación se establece con base a los factores de seguridad mínimos de diseños, establecidos en la norma NSR-10, en el numeral H.2.4.3. Esta tesis solo llega hasta el análisis de estabilidad estático y no de diseño de taludes, el cual se asume como competencia de los ingenieros civiles.

Para los análisis de estabilidad de taludes en suelo se realizaron corridas por la metodología de equilibrio límite, por medio del programa SLIDE de Rocscience. Las formulaciones pueden elegirse entre Bishop simplificado, GLE/Morgenstern and Price, Jambu simplificado y Jambu modificado. El modelo analiza la estabilidad del talud utilizando la metodología de Bishop, en un entorno de 2 dimensiones, donde el cuerpo del talud está conformado por capas de perfiles de suelos, definidas a partir de la inspección en campo, la caracterización y zonificación geológica, y el proyecto de exploración.

El método de análisis de estabilidad de taludes definió las condiciones de equilibrio en la potencial superficie de deslizamiento según las condiciones de drenaje del suelo, para lo cual se implementan dos metodologías, la primera considera la tensión efectiva para una condición drenada y la segunda considera una tensión total para una condición no drenada.

El análisis de estabilidad se desarrolló para condiciones estáticas, en los taludes donde se realizaron las 10 perforaciones y de sus muestras ensayos de laboratorio, para que fueran espesores y valores reales. En esos sitios se construyeron perfiles topográficos transversales al corredor vial y se corrieron con el nivel freático saturado y sin saturar, determinando el factor de seguridad de cada uno.

7.1.1 Factores de seguridad mínimos

La evaluación de los modelos geotécnicos con el fin de definir el comportamiento mecánico de las obras geotécnicas y su grado de estabilidad o equilibrio asociado, se determina mediante la evaluación del factor de seguridad, cuyo criterio de aceptación se establece con base a factores de seguridad mínimos de diseño, tomando como referencia los factores de seguridad establecidos en la norma NSR-10, título H., con un factor estático de 1,5, y uno pseudo-estático de 1,05. Este último no fue objeto de la presente tesis.

7.1.2 Parámetros geotécnicos de los suelos

Las propiedades geotécnicas de los suelos se estimaron a partir de los resultados de laboratorio en los estratos donde se tomaron muestras representativas, complementada con la información obtenida en campo, los resultados de los ensayos SPT y la experiencia de los asesores. Para aquellas zonas donde no fue posible la recuperación de muestras inalteradas, se obtuvieron los parámetros geomecánicos de diseño por medio de correlaciones con los valores de SPT y las condiciones de consistencia encontradas en campo.

Empíricamente, la evaluación de los parámetros efectivos de resistencia puede ser realizada usando un método aproximado mediante el empleo de los datos del ensayo de penetración estándar SPT (N golpes/pie), lo cual permite tener un estimativo razonable para los suelos identificados por la exploración del subsuelo.

El ensayo de penetración estándar SPT efectuado durante la campaña geotécnica, se realizó siguiendo los lineamientos establecidos en la normativa colombiana vigente, Norma INVIAS E-111, donde el procedimiento consiste en conducir un muestreador de tubo partido dentro del suelo, para obtener muestras representativas con fines de identificación y medir la resistencia del suelo a la penetración del muestreador.

El método consiste en hincar un toma muestras partido de 18" (45cm) de largo, por medio de un martillo de 63,5 kg de peso, el cual se deja caer libremente desde una altura de 76 cm, para lo cual se registra el número de golpes necesario para penetrar cada 15 cm del toma muestras.

El principio del ensayo, consistente en la aplicación de una energía estándar para el hincado de un toma muestras, para lo cual se tiene un estimativo de la resistencia de los suelos según el número de golpes aplicado, siendo aquellos que presentan mayor oposición, los más resistentes.

Las correlaciones matemáticas para la obtención de los parámetros a partir del SPT, y la estimación definitiva de estos, fue elaborada por el asesor y por su equipo de diseño de la empresa IRYS S.A.S.; los datos se resumen en la Tabla 16.

Tabla 16: Parámetros geomecánicos de los materiales.

Material	Densidad seca (kN/m ³)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción interna Φ (°)
VI Suelo residual	18	18,5	25
V Saprolito	19	29,5	25
IV Transición suelo-roca	20	39,5	30

7.2 TALUDES DE ANÁLISIS

7.2.1 PERFIL TALUD 1 ABSCISA 00+200

Talud de 8,2 m de altura con tres perfiles de meteorización. Saprolito, suelo residual y transición suelo roca. El talud presenta una ruptura de falla circular y un factor de seguridad de 2.093. Cumple con los criterios de F.S. (figura 78)

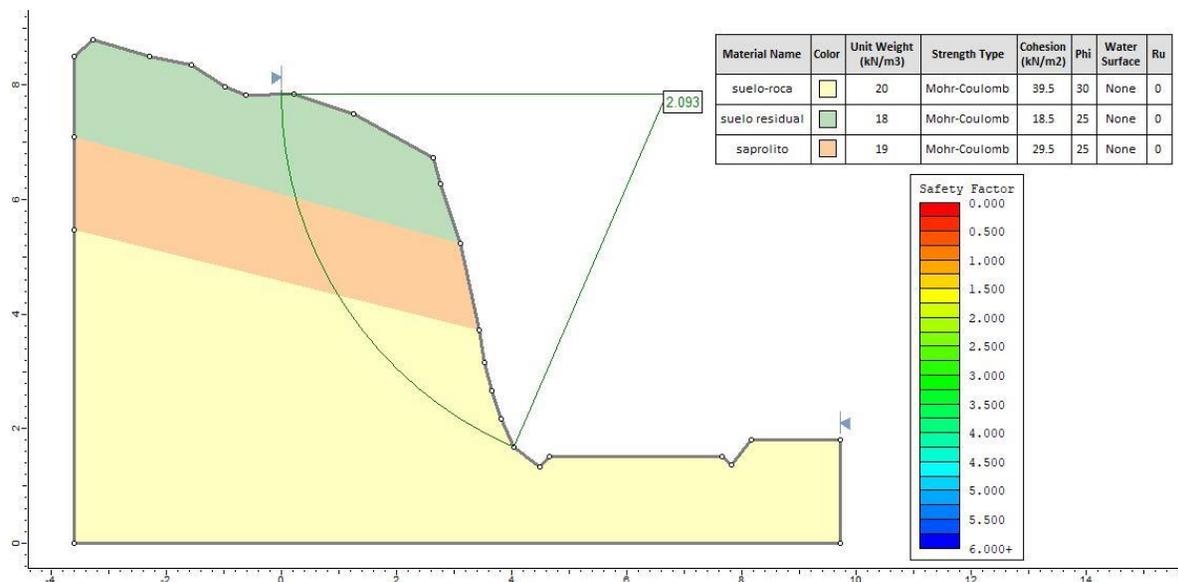


figura 78: Perfil talud 1 Abscisa 00+200.

El talud con el nivel freático saturado presenta una ruptura de falla circular y un factor de seguridad de 1.446. No cumple con los criterios de F.S. por lo cual se recomienda intervención y control de aguas por posible generación de movimientos en masa (figura 79)

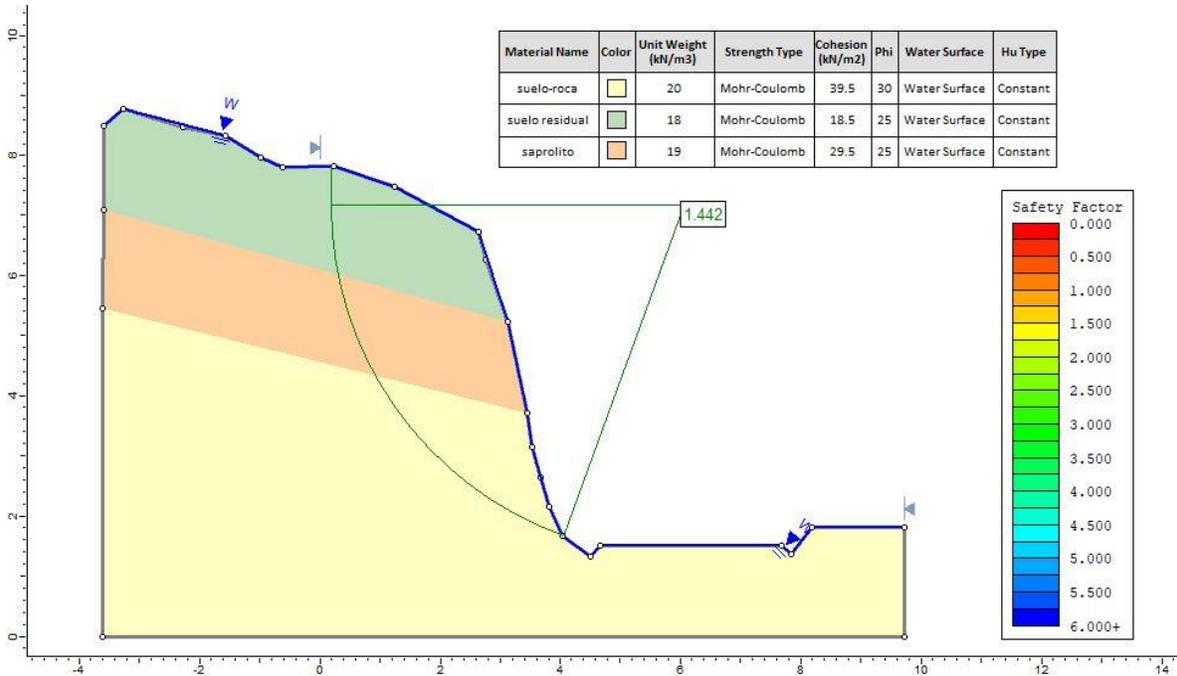


figura 79: Perfil talud 1 con el nivel freático saturado.

7.2.2 PERFIL TALUDES 2 ABSCISA 01+990

En la margen izquierda del corredor vial, el talud presenta 4 m de altura, se expone un perfil de meteorización de transición suelo roca y muestra una ruptura de falla circular con un factor de seguridad de 3.179. El talud no requiere intervención, cumple con los criterios de F.S. (figura 80)

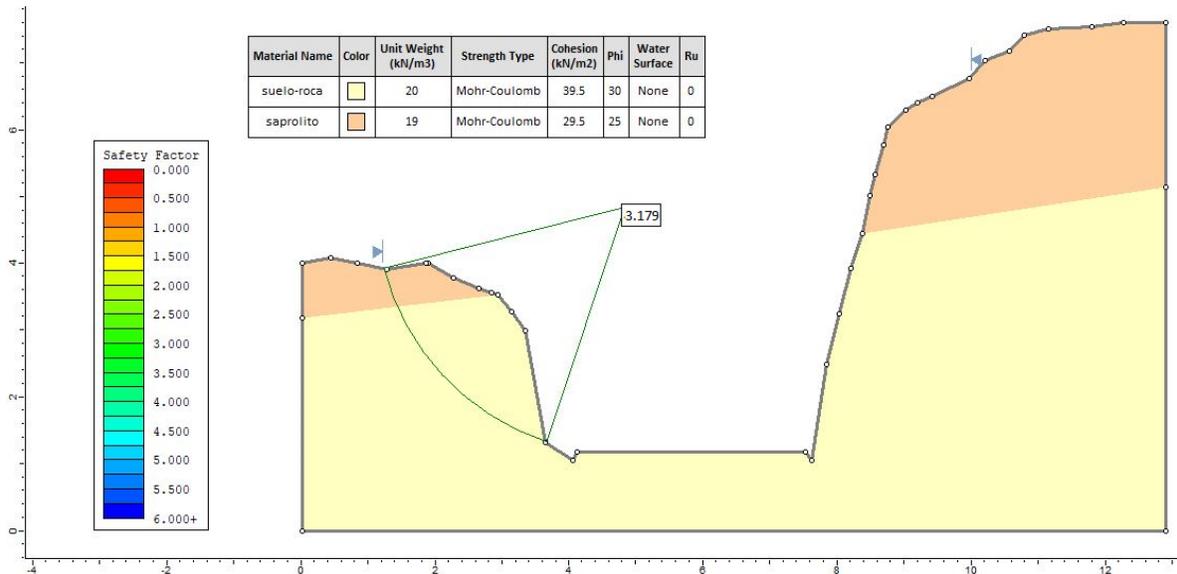


figura 80: Perfil talud 2 margen izquierda Abcisa 01+990.

El talud con el nivel freático saturado presenta una ruptura de falla circular y un factor de seguridad de 2.575, El talud no requiere intervención, cumple con los criterios de F.S. (figura 81)

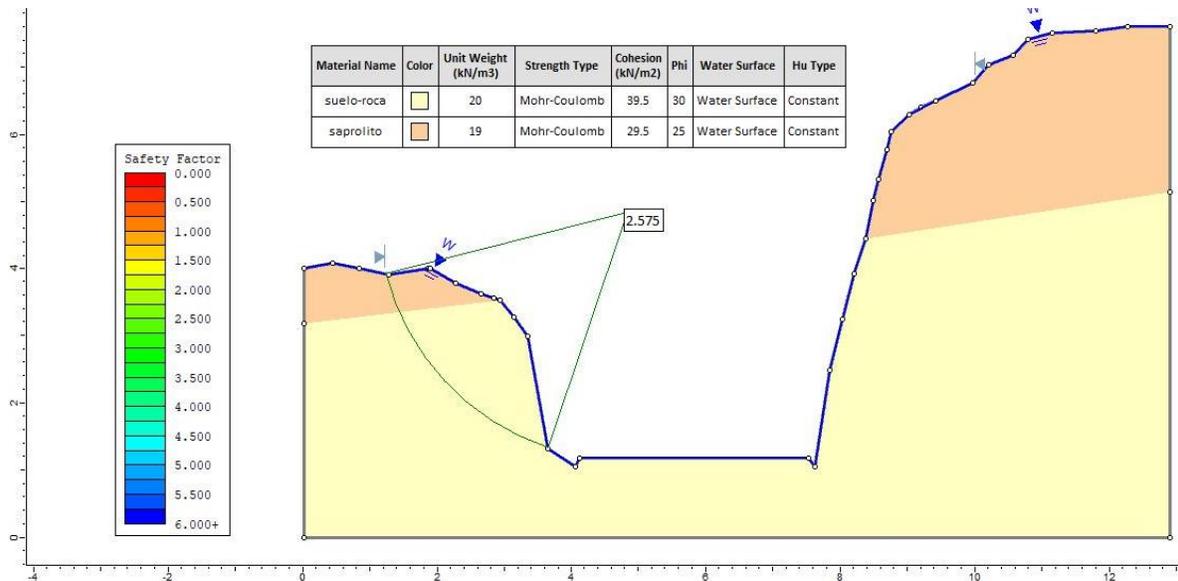


figura 81: Perfil talud 2 margen izquierda con el nivel freático saturado.

En la margen derecha del corredor vial, el talud presenta 6,7 m de altura, exhibe dos perfiles de meteorización, transición suelo roca y saprolito. Muestra una ruptura de falla circular con un factor de seguridad de 2.055. Cumple con los criterios de F.S. (figura 82)

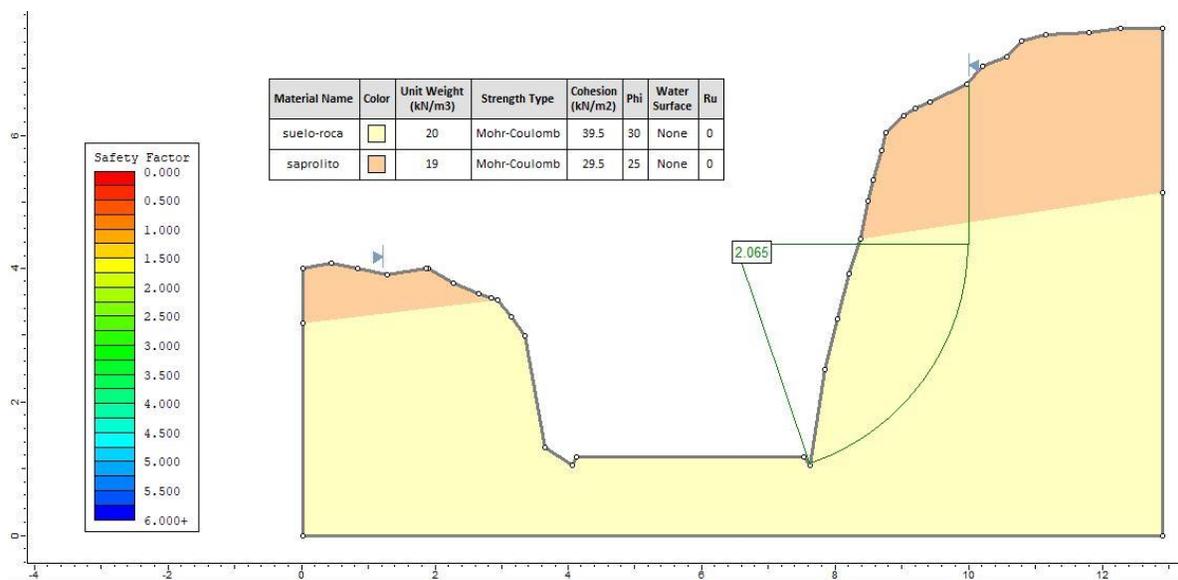


figura 82: Perfil talud 2 margen derecha Abcisa 01+990.

El talud con el nivel freático saturado presenta una ruptura de falla circular y un factor de seguridad de 1.383. No cumple con los criterios de F.S. por lo cual se recomienda intervención y control de aguas por posible generación de movimientos en masa. (figura 83)



figura 83: Perfil talud 2 margen derecha con el nivel freático saturado.

7.2.3 PERFIL TALUD 3 ABSCISA 04+420

Talud de 4 m de altura con dos perfiles de meteorización. Saprolito y suelo residual. El talud presenta una ruptura de falla circular y un factor de seguridad de 2.495 cumple con los criterios de F.S, no se requiere intervención. (figura 84)

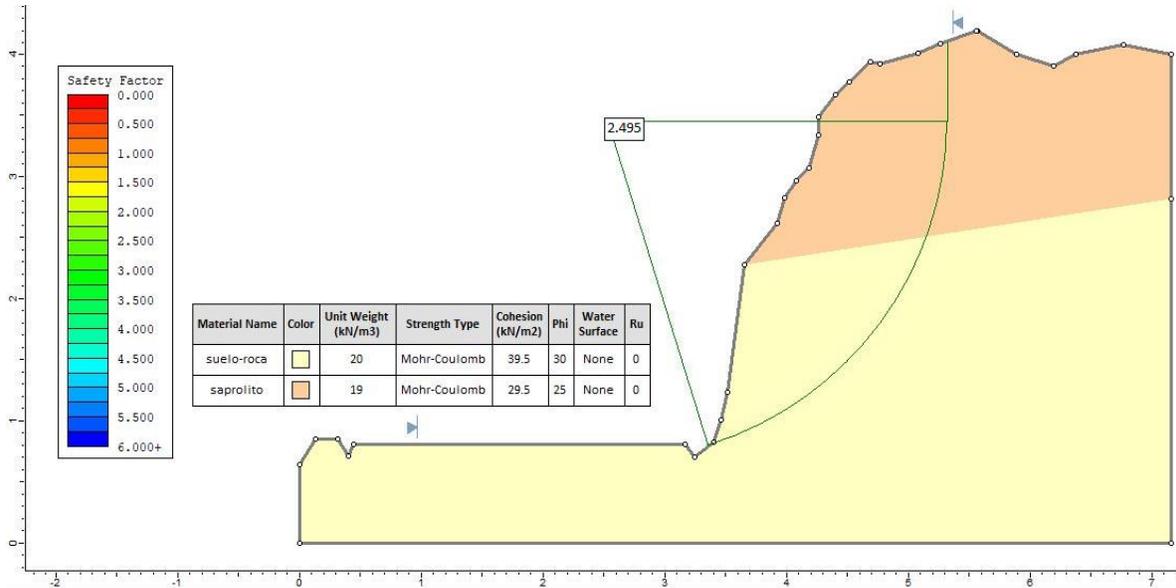


figura 84: Perfil talud 3 Abscisa 04+420.

El talud con el nivel freático saturado presenta una ruptura de falla circular y un factor de seguridad de 1.742. Cumple con los criterios de F.S. No se requiere intervención (figura 85)

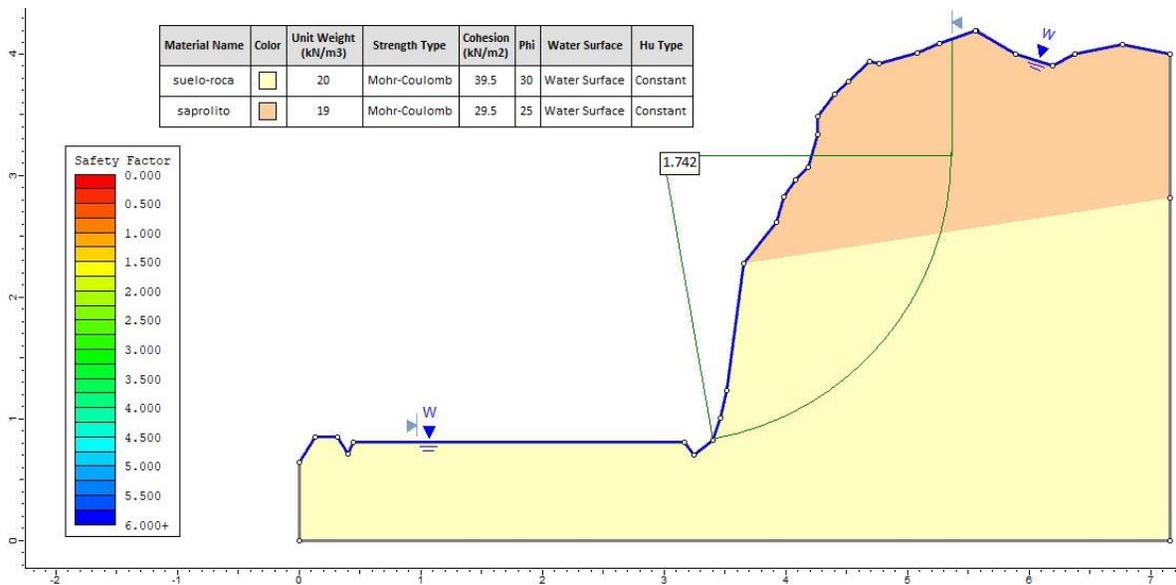


figura 85: Perfil talud 3 con el nivel freático saturado.

7.2.4 PERFIL TALUD 4 ABSCISA 04+410

Al costado izquierdo del corredor vial, el talud presenta 3 m de altura, luce dos perfiles de meteorización, transición suelo roca y saprolito. Muestra una ruptura de falla circular con un factor de seguridad de 3.127. El talud no requiere intervención, cumple con los criterios de F.S. (figura 86)

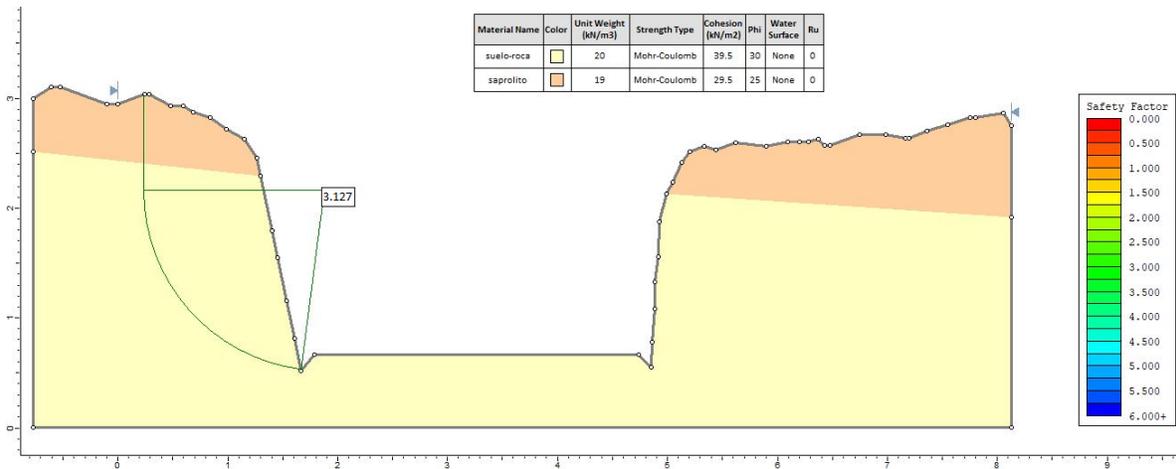


figura 86: Perfil talud 4 margen izquierda abscisa 04+410.

El talud con el nivel freático saturado presenta una ruptura de falla circular y un factor de seguridad de 2.384, cumple con los criterios de F.S. (figura 87)

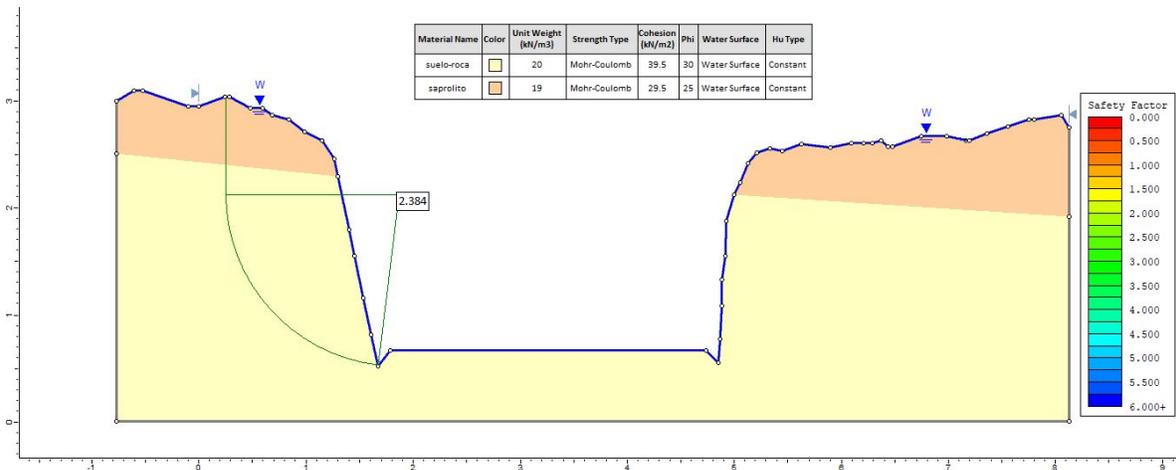


figura 87: Perfil talud 4 margen izquierda con el nivel freático saturado.

En la margen derecha del corredor vial, el talud presenta 2,7 m de altura, luce dos perfiles de meteorización, transición suelo roca y saprolito. Muestra una ruptura de falla circular con un factor de seguridad de 3.459. El talud no requiere intervención, cumple con los criterios de F.S. (figura 88)

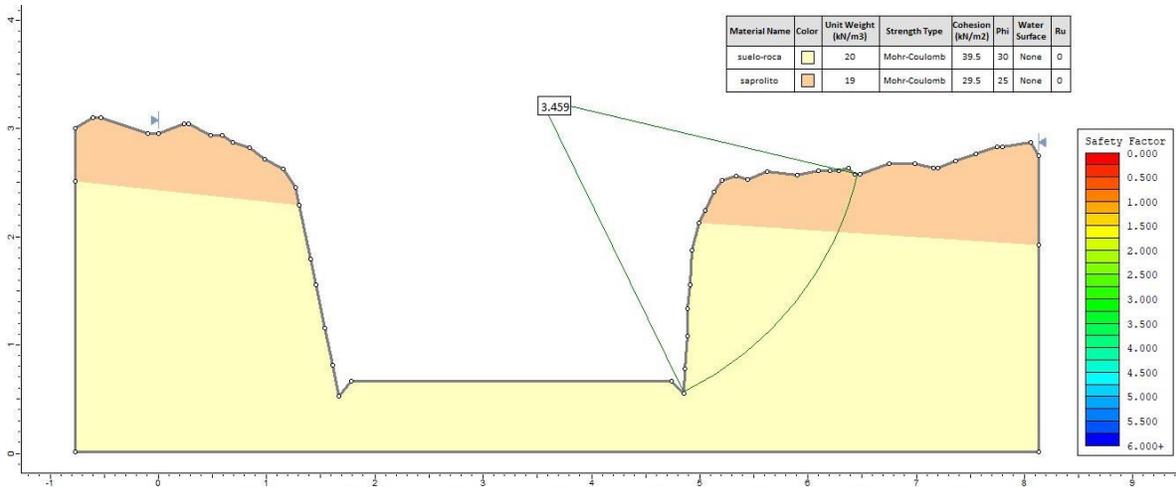


figura 88: Perfil talud 4 margen derecha Abscisa 04+410.

El talud con el nivel freático saturado presenta una ruptura de falla circular y un factor de seguridad de 2.826, cumple con los criterios de F.S. (figura 89)

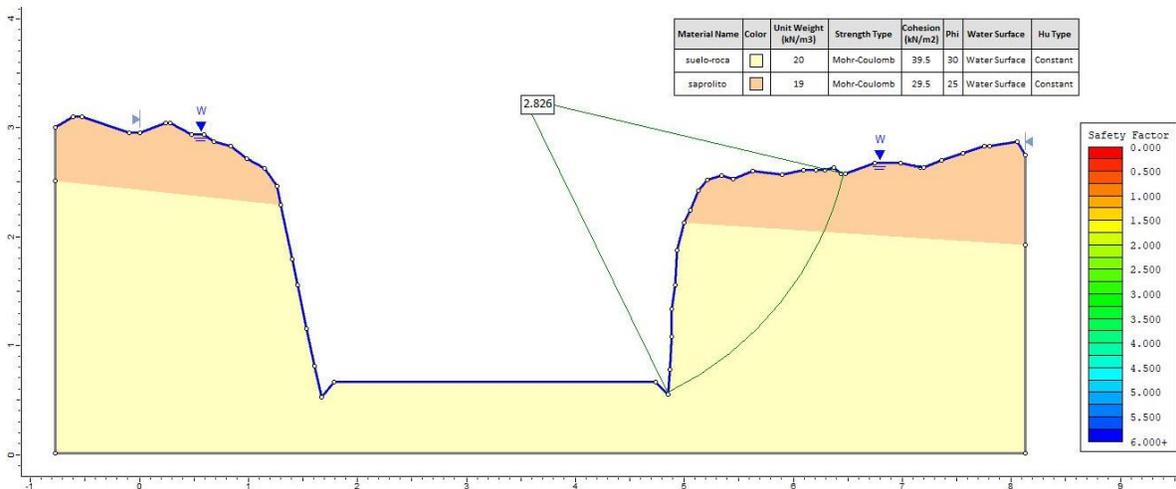


figura 89: Perfil talud 4 margen derecha con el nivel freático saturado.

7.2.5 PERFIL TALUD 5 ABSCISA 06+690

Talud de 8 m de altura con dos perfiles de meteorización. Saprolito y suelo residual. El talud presenta una ruptura de falla circular y un factor de seguridad de 2.010. Cumple con los criterios de F.S. (figura 90)

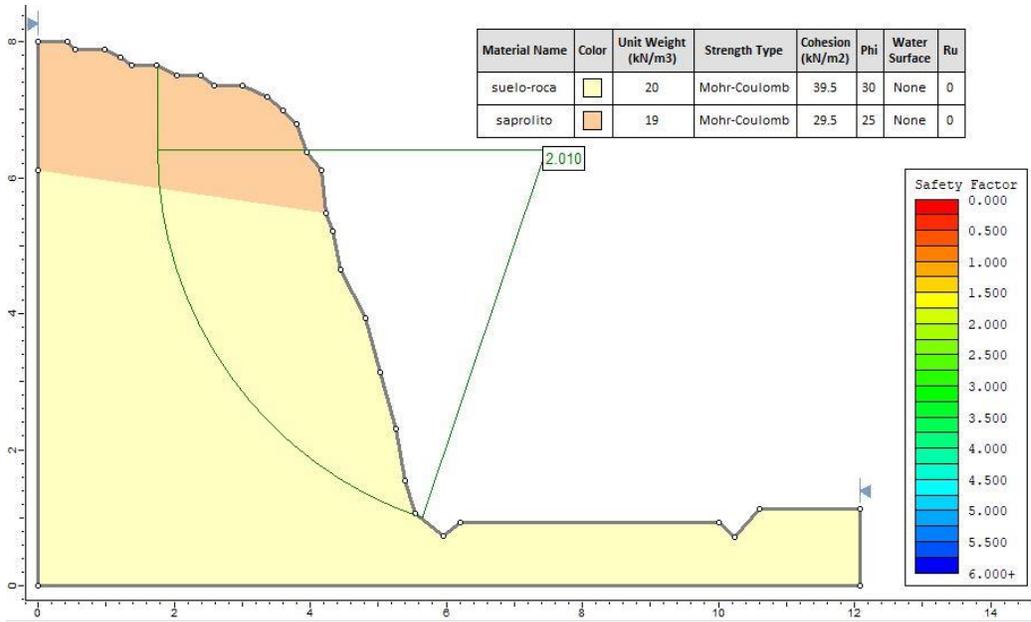


figura 90: Perfil talud 5 Abcisa 06+690.

El talud con el nivel freático saturado presenta una ruptura de falla circular y un factor de seguridad de 1.336, no cumple con los criterios de F.S., se recomienda intervención y control de aguas por posible generación de movimientos en masa (figura 91)

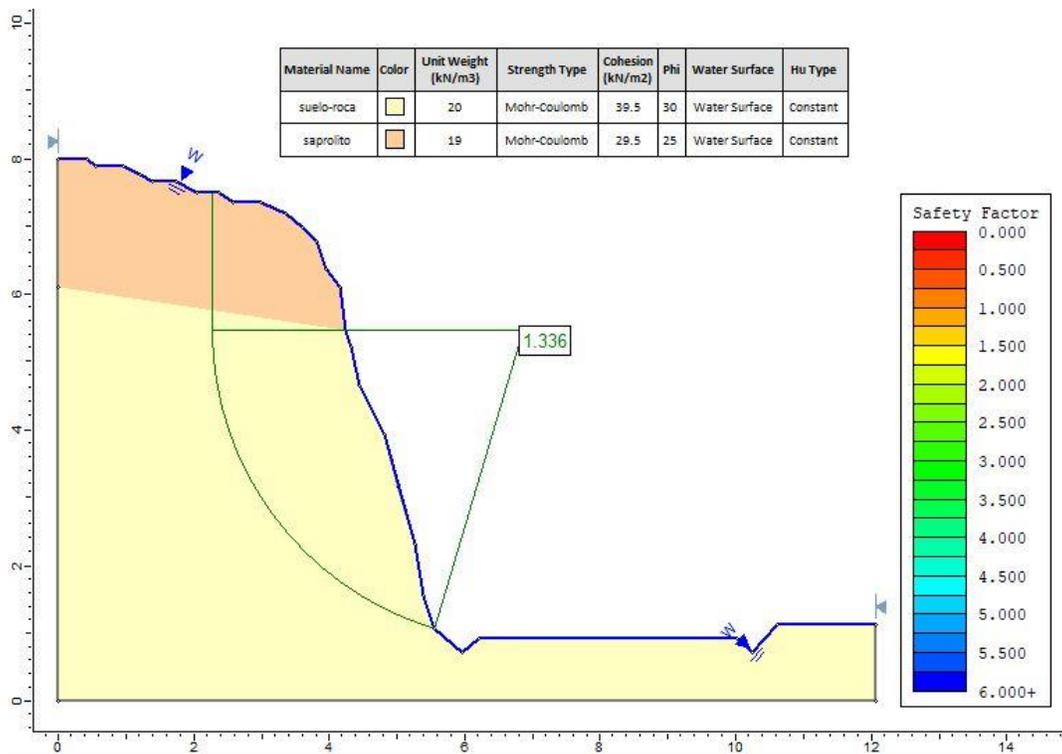


figura 91: Perfil talud 5 con el nivel freático saturado.

7.2.6 PERFIL TALUD 6 ABCSISA 09+000

Talud de 5,5 m de altura con dos perfiles de meteorización. Sapolito y suelo residual. El talud presenta una ruptura de falla circular y un factor de seguridad de 2.856. Cumple con los criterios de F.S. (figura 92)

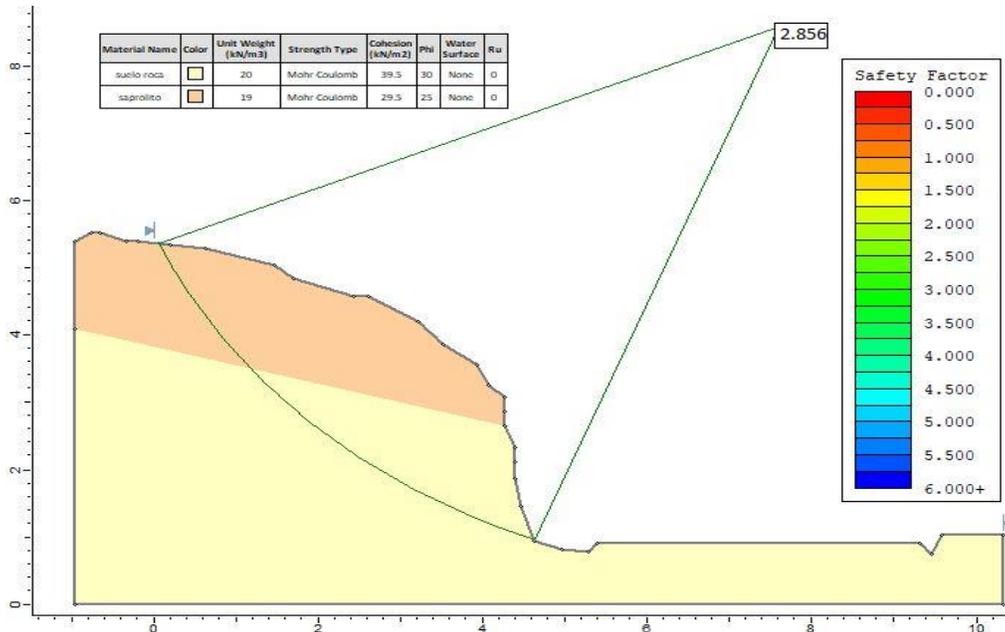


figura 92: Perfil talud 6 Abscisa 09+000.

El talud con el nivel freático saturado presenta una ruptura de falla circular y un factor de seguridad de 1.907. Cumple con los criterios de F.S. (figura 93)

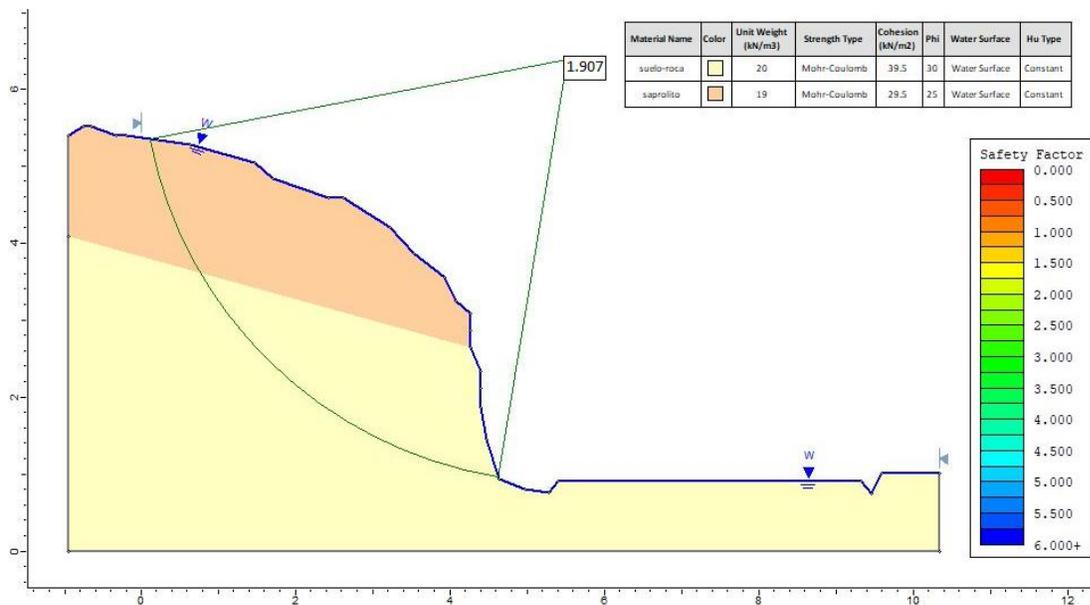


figura 93: Perfil talud 6 con el nivel freático saturado.

7.2.7 PERFIL TALUD 7 ABSCISA 12+040

Talud de 4,5 m de altura con dos perfiles de meteorización. Saprolito y suelo residual. El talud presenta una ruptura de falla circular y un factor de seguridad de 2.689 cumple con los criterios de F.S., no se requiere intervención.(figura 94)

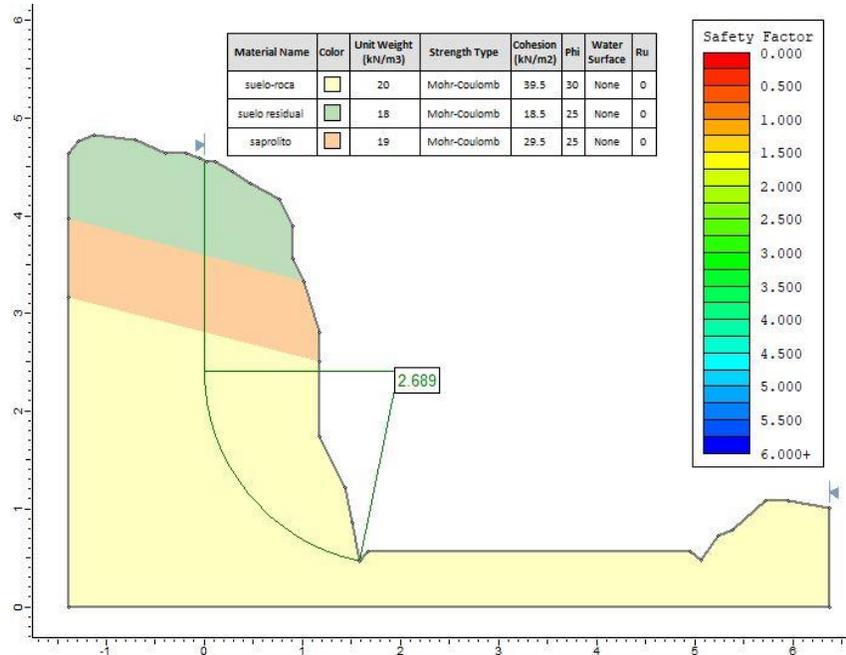


figura 94: Perfil talud 7 Abscisa 12+040.

El talud con el nivel freático saturado presenta una ruptura de falla circular y un factor de seguridad de 1.983, cumple con los criterios de F.S., no se requiere intervención. (figura 95)

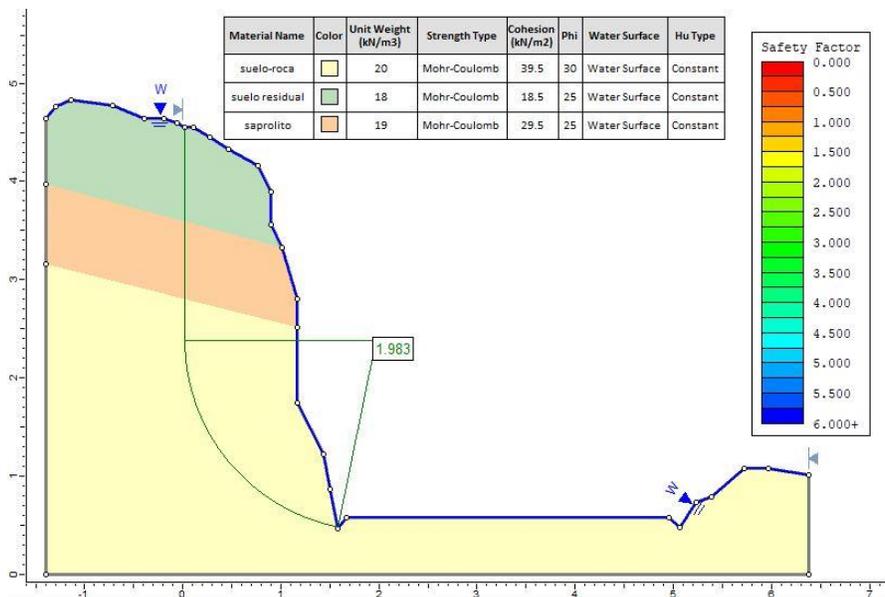


figura 95: Perfil talud 7 con el nivel freático saturado.

7.2.8 PERFIL TALUD 8 ABSCISA 15+400

Talud de 2,8 m de altura con dos perfiles de meteorización. Sapolito y suelo residual. El talud presenta una ruptura de falla circular y un factor de seguridad de 3.519 cumple con los criterios de F.S., no se requiere intervención. (figura 96)

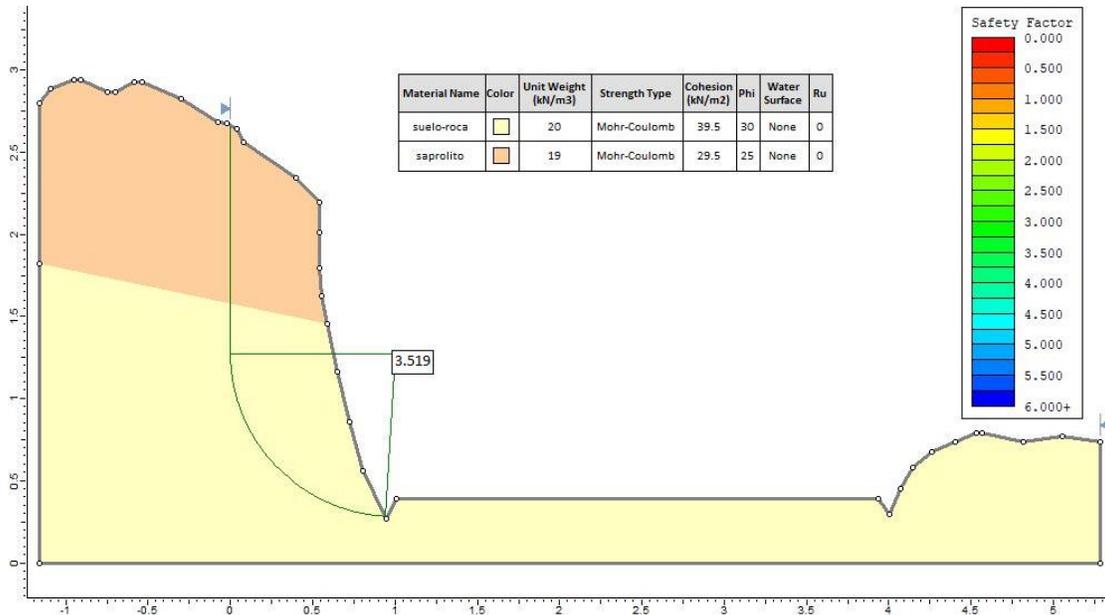


figura 96: Perfil talud 8 Abscisa 15+400.

El talud con el nivel freático saturado presenta una ruptura de falla circular y un factor de seguridad de 2.780, cumple con los criterios de F.S., no se requiere intervención. (figura 97)

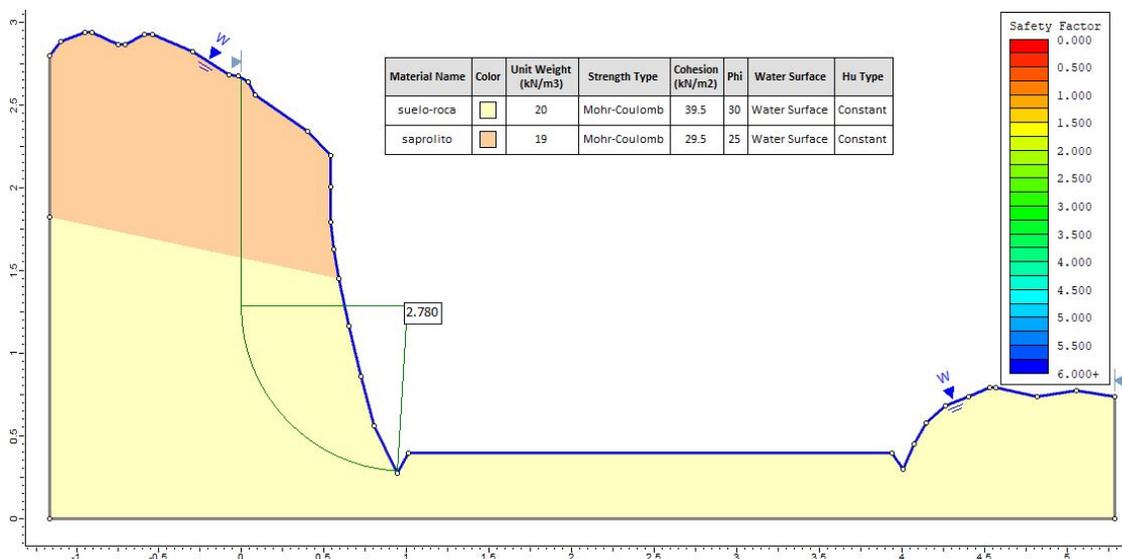


figura 97: Perfil talud 8 con el nivel freático saturado.

7.2.9 PERFIL TALUD 9 ABSCISA 19+020

Talud de 4,2 m de altura con tres perfiles de meteorización. Sapolito, suelo residual y transición suelo roca. El talud presenta una ruptura de falla circular y un factor de seguridad de 2.458. Cumple con los criterios de F.S., no se requiere intervención. (figura 98)

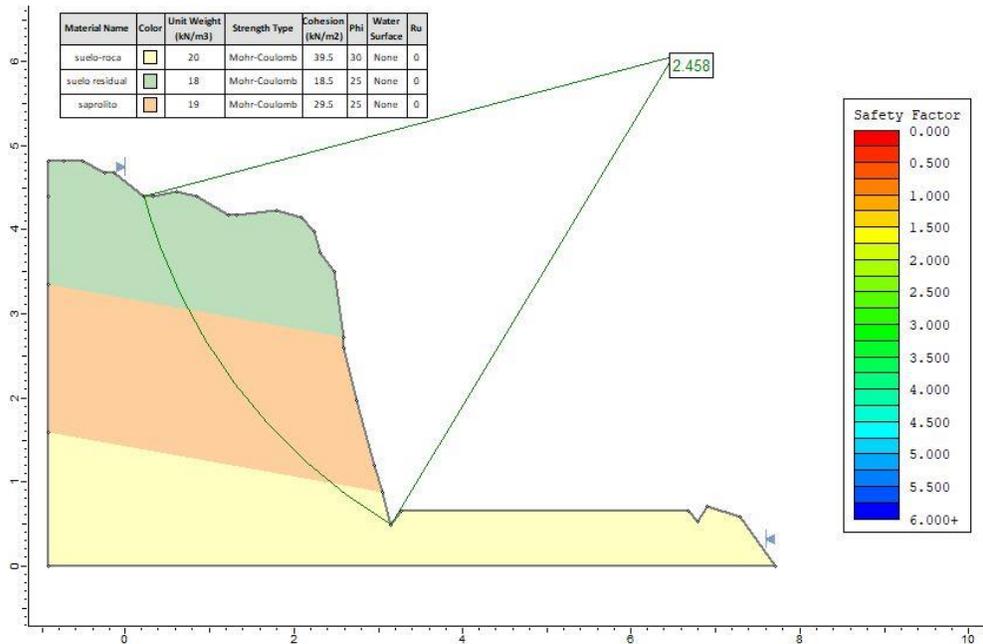


figura 98: Perfil talud 9 Abscisa 19+020.

El talud con el nivel freático saturado presenta una ruptura de falla circular y un factor de seguridad de 1.906, cumple con los criterios de F.S., no se requiere intervención. (figura 99)

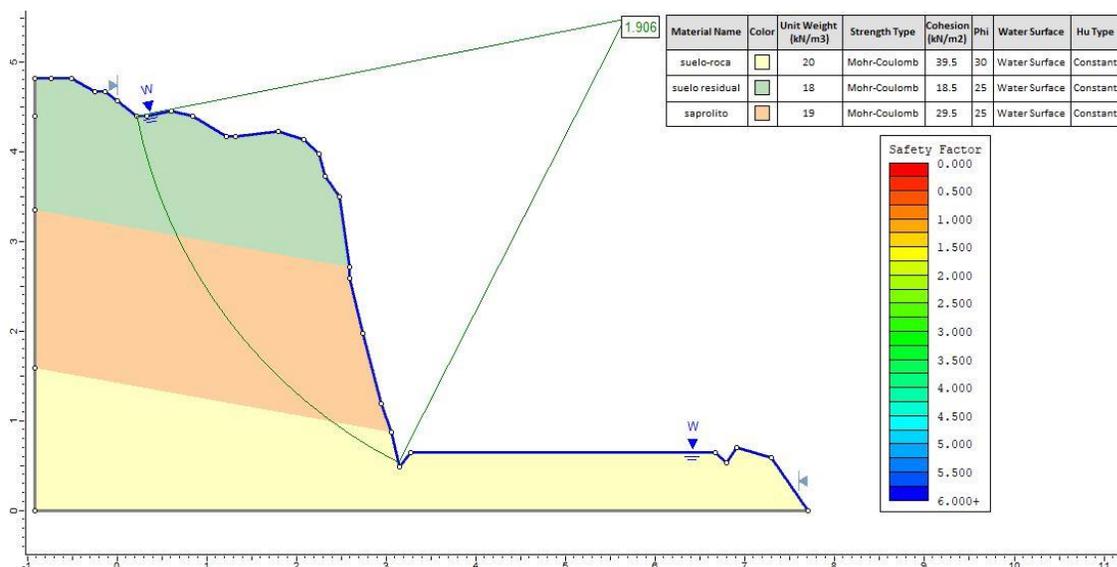


figura 99: Perfil talud 9 con el nivel freático saturado.

7.2.10 PERFIL TALUD 10 ABSCISA 14+000

Talud de 8 m de altura con tres perfiles de meteorización. Sapolito, suelo residual y transición suelo roca. El talud presenta una ruptura de falla circular y un factor de seguridad de 1.690. Cumple con los criterios de F.S., no se requiere intervención. (figura 100)

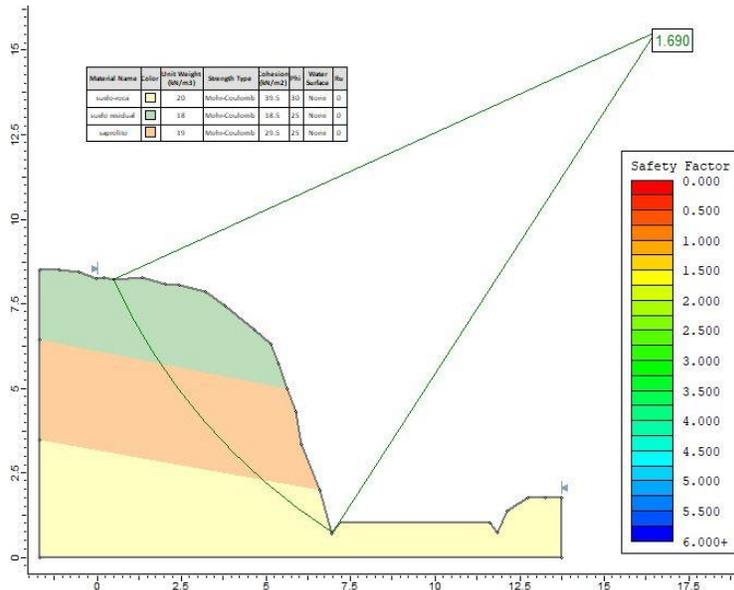


figura 100: Perfil talud 10 Abscisa 14+000.

El talud con el nivel freático saturado presenta una ruptura de falla circular y un factor de seguridad de 1.141. No cumple con los criterios de F.S., se recomienda intervención y control de aguas por posible generación de movimientos en masa (figura 101)

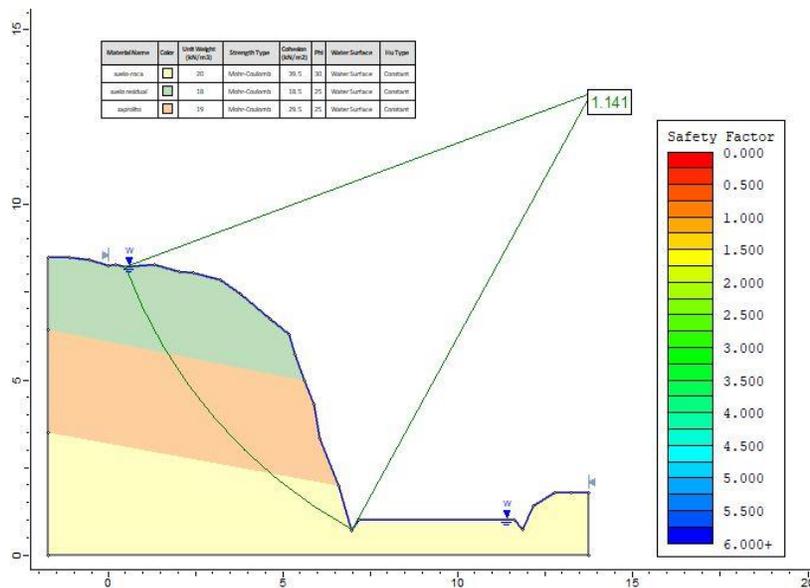


figura 101: Perfil talud 10 con el nivel freático saturado.

8 SECTORIZACIÓN GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA.

Como insumo básico para que los ingenieros geotecnistas hagan sus diseños, y que los encargados de presupuestos costeen la obra, se requiere de una sectorización geológico-geotécnica que agrupe zonas de comportamiento los más homogéneo posible. Se tomaron en cuenta aspectos como geomorfología, hidrología, geometría de la vía, geología estructural, litología y perfiles de meteorización basados en las descripciones de perforaciones y estaciones de campo.

Se definieron tres sectores geológicos ubicados en las abscisas que resume la Tabla 17, y el mapa de la figura 102.

Tabla 17. Sectores geológicos del corredor vial.

Sector Geológico	Abscisa Inicial	Abscisa Final
1	00+000	05+299
2	05+300	15+200
3	15+201	19+700

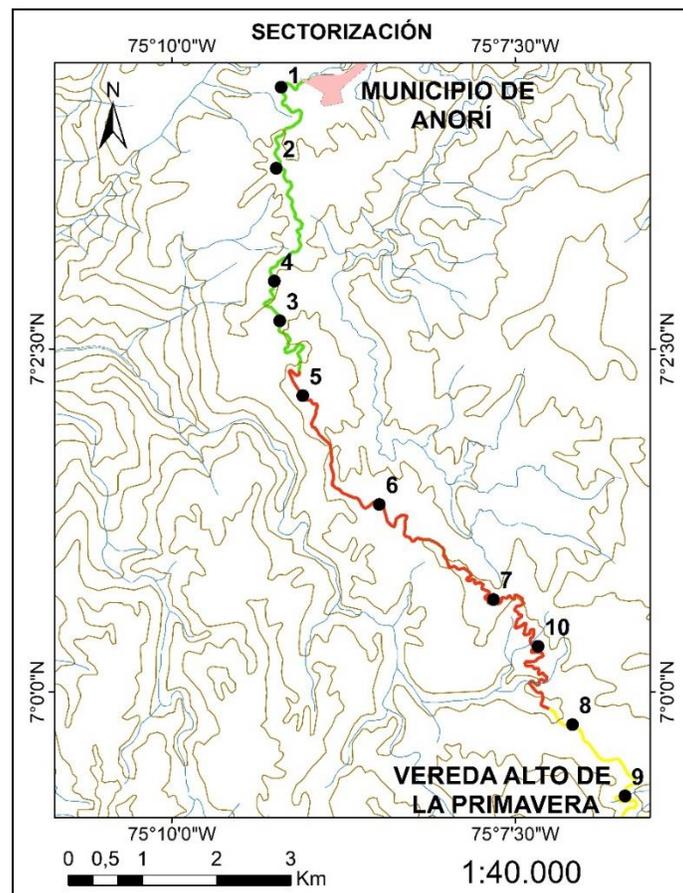


figura 102: Localización sectores geológicos dentro del corredor vial.

8.1 SECTOR GEOLÓGICO 1 (km 0+000 a km 5+299)

Este sector tiene una longitud total de 5,8 km y una geometría caracterizada por curvas de amplio radio (150-200 m) y rectas de hasta 600 m. Geomorfológicamente, está dominado por un relieve de colinas, con elevaciones entre 201- 499 m, la forma de las crestas son redondeadas y convexas planas. Las laderas presentan características como forma recta a convexas, abruptas a muy abruptas, de baja incisión con inclinaciones que van entre 16°-30 ° y longitudes largas entre 501-1000 m, medias entre 251-500 m y bajas entre 51-250 m.

Las exploraciones y reconocimientos de superficie permiten estimar el siguiente perfil estratigráfico de los niveles de alteración (figura 103):

- **Materia orgánica:** 0,6 m de espesor promedio
- **Saprolito (V):** Debajo de la materia orgánica hasta los 2,3 m. Es un suelo limo arcilloso de coloración rojiza, amarillenta, gris verdosa y anaranjada, con baja humedad y plasticidad media; se encuentran cristales de cuarzo y fragmentos de roca que conserva la foliación de la roca metamórfica.
- **Transición suelo-roca (IV):** Por debajo del saprolito, la exploración solo permitió llegar hasta este nivel, una mezcla de matriz limo arcillosa de color rojizo amarillento con consistencia blanda a muy blanda que envuelve pequeños fragmentos de roca foliada altamente meteorizada y oxidada con bloques de esquistos.

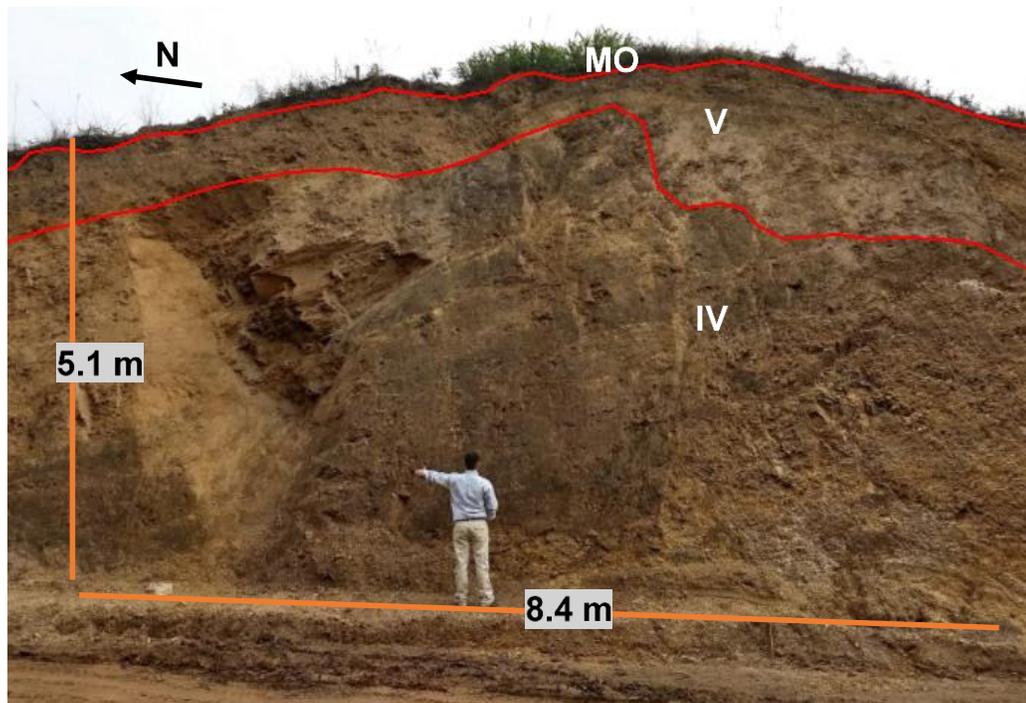


figura 103: Afloramiento que evidencia la presencia del horizonte de saprolito y transición suelo-roca, característicos del sector 1.

Hidrológicamente, el sector presenta una densidad de drenajes moderada, el tipo de drenaje es dendrítico y drena sus aguas en la parte occidental hacia la quebrada la Soledad y en la parte oriental el río Anorí. Entre la abscisa 00+200 y la abscisa 00+600, hay aumento en la densidad de los drenajes que atraviesan el sector, lo que requiere numerosas estructuras de cruce. Taludes típicos con la presencia de suelo residual en el sector se muestran en la figura 104 y figura 105.

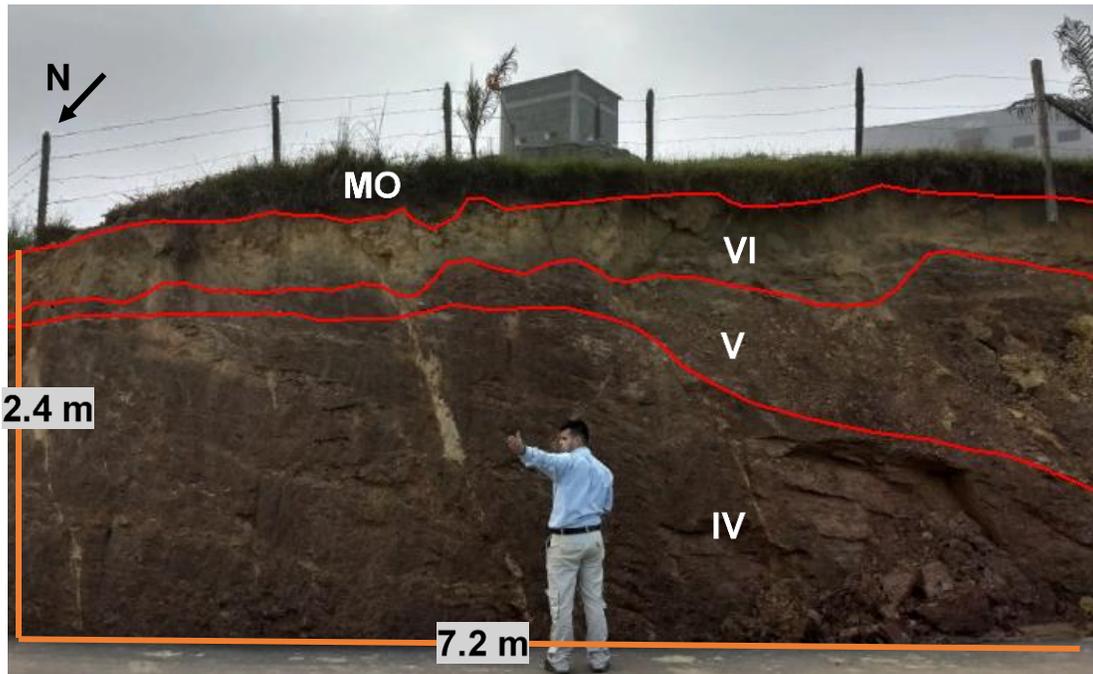


figura 104: Afloramiento que evidencia la presencia de suelo residual en el sector 1.



figura 105: Drenaje que cruza la vía en el sector 1.

Estructuralmente, se observó un lineamiento atravesando el corredor vial en sentido N-E, entre la abscisa 04+218 y la abscisa 04+215, que tiene aproximadamente 4,2

km de longitud y genera control estructural sobre aproximadamente 3.8 km del cauce del río Anorí. Las direcciones de foliaciones predominantes se encuentran alrededor del plano $N45^{\circ}E / 30^{\circ}SE$. En el sector hay poca presencia de procesos morfodinámicos debido al poco contenido de humedad. Es apreciable el cambio geomorfológico del sector, predominan laderas abruptas de longitud larga con alta incisión que descargan sus aguas sobre el río Anorí (figura 106)



figura 106: Laderas abruptas con alta incisión sector 1.

Para las características del subsuelo se determinó que, para el sector, el índice de plasticidad es mayor respecto al sector 2 y 3, la compresión simple es menor respecto al sector 2 y respecto a la humedad el resultado no fue un factor concluyente para ser discriminado.

Los factores de seguridad de los taludes sin saturar tienen un promedio de 2.5, los taludes saturados tienen un promedio de 1.74 lo cual los hace seguros, sin embargo, en las abscisas 00+200 y 1+990 no se cumple los criterios de F.S. para los taludes saturados.

Las alturas máximas de los taludes son de 9m y las mínimas de 3m.

En el sector se presenta un único caso de deslizamiento planar, se ubica en la abscisa 3+905, en la margen derecha, y es dado por el bajo buzamiento de la foliación respecto al del talud.

8.2 SECTOR GEOLÓGICO 2 (km 5+300 a km 15+200)

La vía en estudio correspondiente a este sector tiene una longitud total de 9.4 km (Tabla 17) y una geometría caracterizada por la intercalación de tramos rectos y largos de aproximadamente 400 m con curvas de radio de aproximadamente 150 m. Hay facilidad relativa de ampliación, excepto en zonas semi-urbanas.

Geomorfológicamente, el sector numero dos está dominado por un relieve de montículos, con elevaciones entre 20-49 m, la forma de las crestas son

redondeadas, planas y convexas amplias. Las laderas presentan características de; forma recta, muy inclinadas a abruptas con inclinaciones entre 11° - 20° y longitudes largas entre 51- 250 m. Hay dos formaciones aluviales, la primera entre la abscisa 05+800 y la abscisa 05+950 y la segunda entre la abscisa 06+800 y la abscisa 06+820, están compuestas de sedimentos acumulados por medios acuosos, posiblemente por la quebrada la soledad o rio Anorí, conformados por bloques de esquistos y materiales tamaño arena y limos (figura 107 y figura 108).



figura 107: Formación aluvial entre la abscisa 05+800 y la abscisa 05+950 sector 2.



figura 108: Formación aluvial entre la abscisa 06+800 y la abscisa 06+820 sector 2.

Las exploraciones y reconocimientos de superficie permiten estimar el siguiente perfil estratigráfico de los niveles de alteración (figura 109):

- **Materia orgánica:** 0,9 m de espesor promedio
- **Saprolito (V):** Debajo de la materia orgánica hasta los 2,2 m. Es un suelo limo arcilloso de coloración rojiza, amarillenta, gris verdosa y anaranjada, con baja humedad y plasticidad media; se encuentran cristales de cuarzo y fragmentos de roca que conserva la foliación de la roca metamórfica.
- **Transición suelo-roca (IV):** Por debajo del saprolito, la exploración solo permitió llegar hasta este nivel, una mezcla de matriz limo arcillosa de color rojizo amarillento con consistencia blanda a muy blanda que envuelve pequeños fragmentos de roca foliada altamente meteorizada y oxidada con bloques de esquistos.



figura 109: Afloramiento que evidencia la presencia del horizonte de saprolito y transición suelo-roca, característicos del sector 2.

Hidrológicamente, el sector presenta una menor densidad de drenajes respecto al sector 1 y 3, el tipo de drenajes es dendrítico y drena sus aguas en la parte occidental hacia la quebrada la Soledad y en la parte oriental el río Anorí. Entre la abscisa 13+732 y la abscisa 14+822, hay aumento en la densidad de los drenajes que atraviesan el sector, lo que requiere numerosas estructuras de cruce. Taludes típicos y la aparición de suelo residual dentro del sector se muestran en la figura 110 y figura 111.

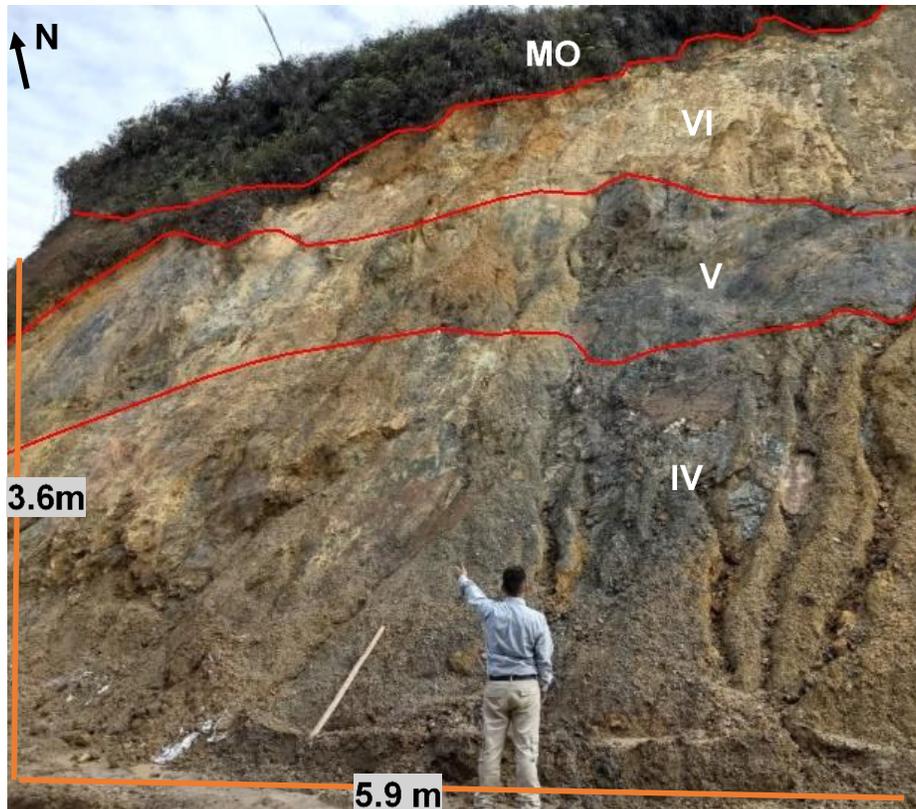


figura 110: Afloramiento que evidencia la presencia de suelo residual en el sector 2.



figura 111: Drenajes que cruzan la vía en el sector 2.

Estructuralmente las direcciones de foliaciones predominantes se encuentran alrededor de los planos $N45^{\circ}E / 50^{\circ}SE$ y $S60^{\circ}E / 30^{\circ}SW$. En el sector hay presencia intermedia de procesos morfodinámicos en relación con el sector 1 y 3 que están relacionados especialmente con el contenido de humedad y los planos estructurales (discontinuidades, foliación y sistemas de diaclasas), que, al servir de rutas de infiltración, facilitan la acción lubricante del agua y consecuentemente el movimiento por acción gravitacional.

Entre la abscisa 14+823 y la abscisa 15+200 hay presencia de macizos rocosos moderadamente meteorizados compuestos predominantemente por familias de diaclasas con direcciones preferenciales hacia los planos N15°E /47°NW, N55°E /64°SE, N03°E /44°SE N74°E /84°NW, N75°E /24°SE y N04°E /84°NW. Las discontinuidades se caracterizan por; un espaciado entre 60-200 mm lo cual las categoriza como juntas, una continuidad muy baja (menor a 1 m) una abertura muy cerrada (menor a 0,1 mm) una rugosidad rugosa ondulada y sin rellenos, (figura 112).



figura 112: Macizo rocoso característico del sector 2.

Para las características del subsuelo se determinó que, para el sector, el índice de plasticidad es menor respecto al sector 1, la compresión simple es mayor respecto al sector 1 y respecto a la humedad el resultado no fue un factor concluyente para ser discriminado.

Los factores de seguridad de los taludes sin saturar tienen un promedio de 2.48, los taludes saturados tienen un promedio de 1.8 lo cual los hace seguros, sin embargo, en las abscisas 6+690 y 14+00 no se cumplen los criterios de F.S. para los taludes saturados.

Las alturas máximas de los taludes son de 8m y las mínimas de 2.5m.

En el sector se presenta un único caso de deslizamiento por cuña, se ubica en la abscisa 14+866, en la margen derecha, y es dado por el bajo buzamiento de la foliación y familias de diaclasas respecto al del talud.

8.3 SECTOR GEOLÓGICO 3 (km 15+201 a km 19+300)

La vía en estudio correspondiente a este sector tiene una longitud total de 4.5 km (Tabla 17) y una geometría caracterizada por la intercalación de tramos rectos muy cortos de aproximadamente 80 m con curvas de radio entre 100 y 110 m. Podría hacer dificultad relativa de ampliación por las zonas semi – urbanas.

Geomorfológicamente, el sector tres está dominado por un relieve de montaña, con elevaciones mayores a 500 m, la forma de las crestas son redondeadas, convexa amplias y agudas. Las laderas presentan características como; forma recta, irregular y cóncavas, escarpadas con inclinaciones entre 31°-45° y longitudes largas entre 501- 1000 m, medias entre 251-500 m y bajas entre 51-250 m.

Las exploraciones y reconocimientos de superficie permiten estimar el siguiente perfil estratigráfico de los niveles de alteración (figura 113):

- **Materia orgánica:** 0,5 m de espesor promedio
- **Saprolito (V):** Debajo de la materia orgánica hasta los 2,3 m. Es un suelo limo arcilloso de coloración rojiza, amarillenta, gris verdosa y anaranjada, con baja humedad y plasticidad media; se encuentran cristales de cuarzo y fragmentos de roca que conserva la foliación de la roca metamórfica.
- **Transición suelo-roca (IV):** Por debajo del saprolito, la exploración solo permitió llegar hasta este nivel, una mezcla de matriz limo arcillosa de color rojizo amarillento con consistencia blanda a muy blanda que envuelve pequeños fragmentos de roca foliada altamente meteorizada y oxidada con bloques de esquistos.

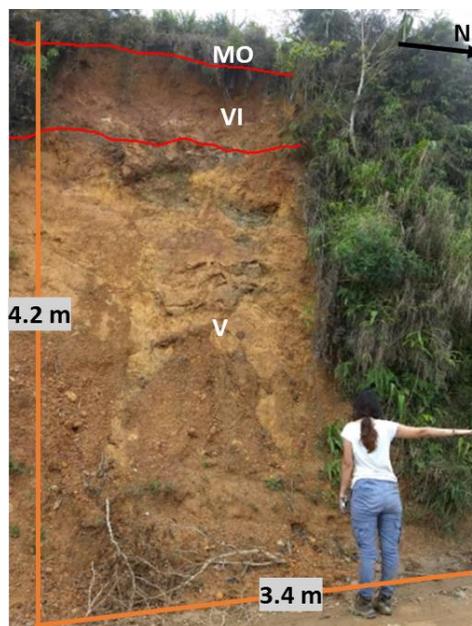


figura 113: Afloramiento característico del sector 3 con presencia de dos horizontes.

Estructuralmente las direcciones de foliaciones predominantes se encuentran alrededor del plano $N36^{\circ}E / 20^{\circ}SE$. En el sector hay alta presencia de procesos morfodinámicos en relación con el sector 1 y 2 que están relacionados especialmente con el contenido de humedad y los planos estructurales (discontinuidades, foliación y sistemas de diaclasas), que, al servir de rutas de infiltración, facilitan la acción lubricante del agua y consecuentemente el movimiento por acción gravitacional.

Hidrológicamente, el sector presenta una alta densidad de drenajes respecto al sector 1 y 2, el tipo de drenajes varía entre es subparalelo y paralelo y drenan sus aguas hacia el río Porce. Entre la abscisa 18+610 y la abscisa 19+300, hay aumento en la densidad de los drenajes que atraviesan el sector, lo que requiere numerosas estructuras de cruce. Taludes típicos con la presencia de suelo residual se muestran en la figura 114, figura 115 y figura 116.

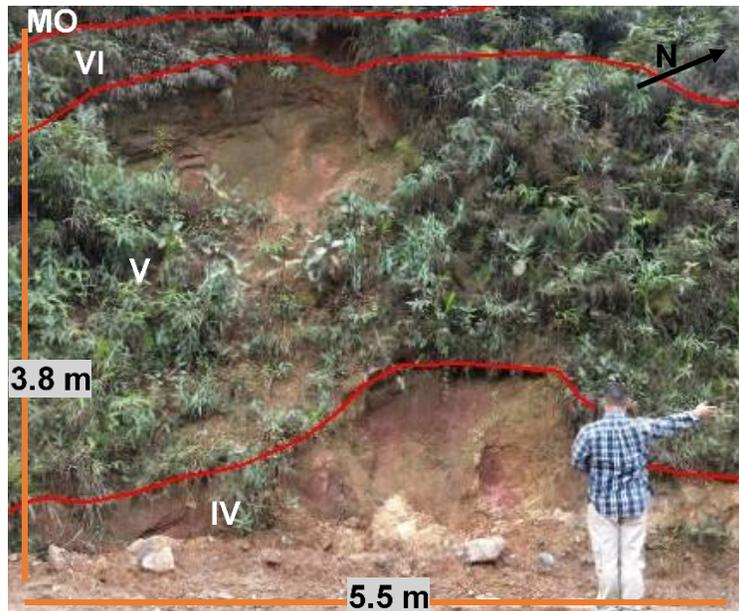


figura 114. Afloramiento característico del sector 3 con presencia de suelo residual.

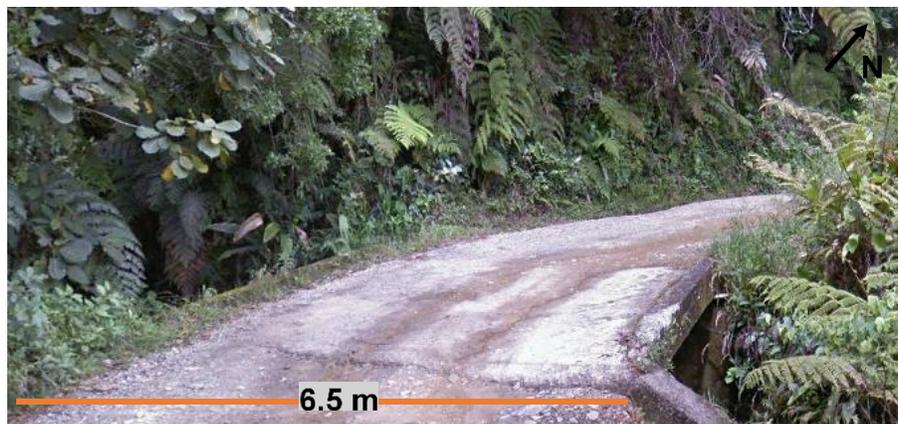


figura 115: Drenaje que cruza la vía en el sector 3.



figura 116: Drenaje que cruza la vía en el sector 3.

Para las características del subsuelo se determinó que, para el sector, el índice de plasticidad es menor respecto al sector 1 y respecto a la humedad el resultado no fue un factor concluyente para ser discriminado.

Los factores de seguridad de los taludes sin saturar tienen un promedio de 2.95, los taludes saturados tienen un promedio de 2.3 lo cual los hace seguros.

Las alturas máximas de los taludes son de 5m y las mínimas de 3m.

En el sector se presentan tres casos de deslizamiento planar, se ubican en las abscisas 16+124, 16+126 y 16+933, en la margen derecha, y es dado por el bajo buzamiento de la foliación respecto al del talud.

9 DISCUSIÓN

Los tres sectores geológico geotécnicos discriminados entre si, se diferenciaron por características como geomorfología, hidrología, tendencia de las foliaciones, factores de seguridad y ensayos de laboratorio, como se muestra en la Tabla 18. No fue concluyente la litología y los niveles de meteorización para la sectorización.

Tabla 18: Discusión

		Sector 1	Sector 2	Sector 3
Geomorfología		Colinas	Montículos	Montaña
Morfodinámica		Poca presencia	Presencia intermedia	Presencia alta
Hidrología		Densidad moderada. Drenaje dendrítico	Densidad baja. Drenaje dendrítico	Densidad alta. Drenaje paralelo y subparalelo
Estructural (foliaciones)		N20°W / 29°SW.	S60°E / 30°SW.	N36°E / 20°SE.
Factor de seguridad		Valores altos	Valores intermedios	Valores bajos
Ensayos	Humedad	Alto	Intermedia	Baja
	Límites de consistencia	Baja a Alta plasticidad	Baja plasticidad	Ligeramente plástico
	Deformación	Material dúctil (valores bajos)	Material frágil (valores altos)	NA
	SPT	Rebote a 7,5m	Rebote a 8,5m	Rebote a 4,4m
	Triaxial	Mayor resistencia al corte	Resistencia al corte intermedia	Resistencia al corte intermedia-baja

10 IDENTIFICACIÓN DE ZODMES Y FUENTES DE MATERIALES

10.1 ZODMES (BOTADEROS)

Como zonas para la disposición de materiales sobrantes de corte (Zodmes), se seleccionaron dos lotes que satisfacen las necesidades del proyecto, están ubicadas en la Abscisa 04+400 a 04+800 y en la Abscisa 07+200 a 07+600.

10.1.1 Zodme 1.

Se ubica a 30 m de la margen derecha del corredor, entre la abscisa 04+400 y la abscisa 04+800, en las coordenadas geográficas $75^{\circ} 9' 4,460''$ W y $7^{\circ} 2' 11,645''$ N, presenta un área total de 40.749 m^2 , sin embargo, garantizando 30 m de ronda a la carretera, para su ampliación, se obtiene un área de 32.987 m^2 .

Geomorfológicamente, el botadero está rodeado por un relieve de montículos, con elevaciones entre 20-49 m, con crestas redondeadas. Las laderas presentan características de; forma recta, con inclinaciones entre 11° - 20° y longitudes largas entre 51- 250 m. La parte central del botadero presenta forma cóncava.

Geológicamente, el esquisto grafitoso presente expone un perfil de meterización con dos horizontes según la clasificación de Deerman 1984, estos son; saprolito (V), con suelo limo arcilloso de coloración rojiza, amarillenta, gris verdosa y anaranjada, con baja humedad y plasticidad media; se encuentran cristales de cuarzo y fragmentos de roca que conserva la foliación de la roca metamórfica, y zona de transición suelo-roca (IV) que presenta una mezcla de matriz limo arcillosa de color rojizo amarillento con consistencia blanda a muy blanda que envuelve pequeños fragmentos de roca foliada altamente meteorizada y oxidada con bloques de esquistos.

En la revisión de campo no se encontraron aguas permanentes en el interior del botadero. En las perforaciones realizadas de aproximadamente 7 m a lo largo del corredor vial, no se encontró nivel freático.

Para no generar riesgos en la estabilidad, se recomienda; evaluar el nivel freático para determinar la necesidad de construcción de subdrenajes, evaluar la necesidad de crear drenajes superficiales, evaluar la altura e inclinación de los taludes de los llenos del botadero para que no creen afectaciones o riesgos de movimientos en masa, y hacer un análisis de compactación del material

Se tiene como elevación aproximada al borde de la vía 1615 m.s.n.m. y en la parte baja 1600 msnm, es así que hay una diferencia de nivel aproximada de 20 metros, así que el volumen aproximado para este botadero está en $32.987 \text{ m}^2 * 15 \text{ m} = 494.805 \text{ m}^3$. (figura 117 y figura 118)



figura 117: Aspecto de la zona seleccionada para disponer de los materiales sobrantes de corte. Abcisa 04+400 a 04+800.

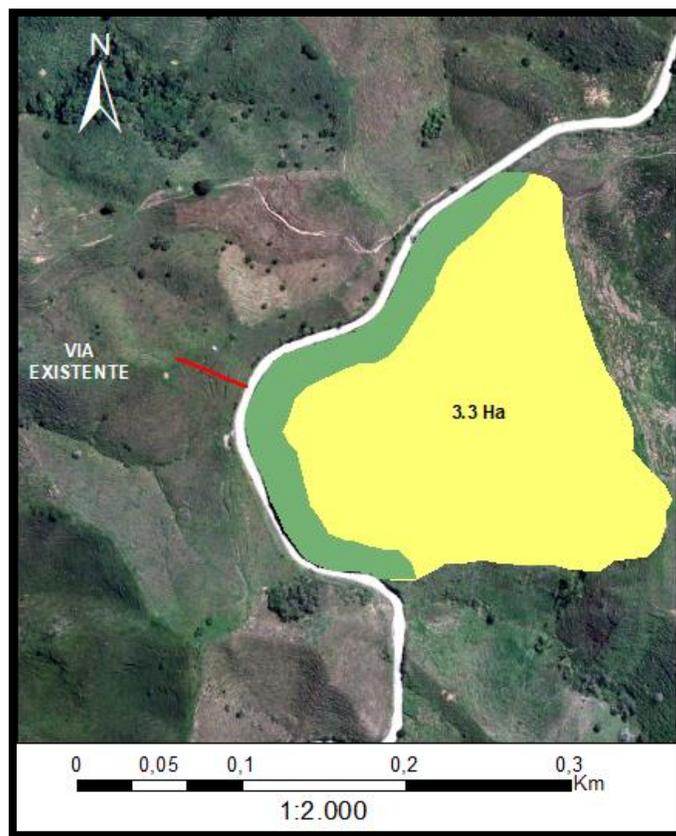


figura 118: Botadero 1.

10.1.2 Zodme 2.

Se localiza en cercanías al proyecto, a 30 m de la margen derecha del corredor en dirección Norte-Sur, entre la Abcisa 07+200 y 07+600, en las coordenadas $75^{\circ} 8'49,664''$ W y $7^{\circ} 1' 32,344''$ N. Presenta un área total es de 40.147 m^2 ,

garantizando 30 m de ronda a la carretera, para su ampliación, se obtiene un área de 34.421 m^2 .

Geomorfológicamente, el botadero está rodeado por un relieve de montículos, con elevaciones entre 25-35 m, con crestas redondeadas. Las laderas presentan características de; forma recta, con inclinaciones entre 11° - 20° y longitudes largas entre 70- 220 m. La parte central del botadero presenta forma cóncava.

Geológicamente, el esquisto grafitoso presente, expone un perfil de meteorización con dos horizontes según la clasificación de Deerman 1984, estos son; saprolito (V), con suelo limo arcilloso de coloración rojiza, amarillenta, gris verdosa y anaranjada, con baja humedad y plasticidad media; se encuentran cristales de cuarzo y fragmentos de roca que conserva la foliación de la roca metamórfica, y zona de transición suelo-roca (IV) que presenta una mezcla de matriz limo arcillosa de color rojizo amarillento con consistencia blanda a muy blanda que envuelve pequeños fragmentos de roca foliada altamente meteorizada y oxidada con bloques de esquistos.

En la revisión de campo no se encontraron aguas permanentes en el interior del botadero. En las perforaciones realizadas de aproximadamente 7 m a lo largo del corredor vial, no se encontró nivel freático.

Para no generar riesgos en la estabilidad, se recomienda; evaluar el nivel freático para determinar la necesidad de construcción de subdrenajes, evaluar la necesidad de crear drenajes superficiales, evaluar la altura e inclinación de los taludes de los llenos del botadero para que no creen afectaciones o riesgos de movimientos en masa, y hacer un análisis de compactación del material.

Se tiene como elevación aproximada al borde de la vía 1670 m.s.n.m. y en la parte baja 1650 msnm, es así que se tiene una diferencia de nivel aproximada de 20 metros, así que el volumen aproximado para este botadero está en $34.421 \text{ m}^2 * 20\text{m} = 688.420 \text{ m}^3$. (figura 119 y figura 120).



figura 119: Aspecto de la zona seleccionada para disponer de los materiales sobrantes de corte. Abscisa 07+200 a 07+600.



figura 120: Zodme 2.

10.2 FUENTES DE MATERIALES

El contratista ha seleccionado la cantera La Ortiz como su fuente de materiales, de la cual espera suplir las necesidades de materiales para sub-base, base y rodadura, dado que cumple con los requisitos INVIAS para este tipo de proyecto. Se tienen en reserva otras canteras (Fuente 1 y Fuente 2). Para este estudio de tesis se visitaron todas, y sus principales características se describen a continuación.

10.2.1 Cantera La Ortiz.

10.2.1.1 Localización

La entrada a la cantera se encuentra a 2,8 km de la partida de la vía principal de la cabecera municipal del municipio de Anorí con el municipio de Campamento, como se muestra en la figura 121, en las coordenadas $75^{\circ} 16' 9,460''$ W y $7^{\circ} 0' 50,477''$ N.

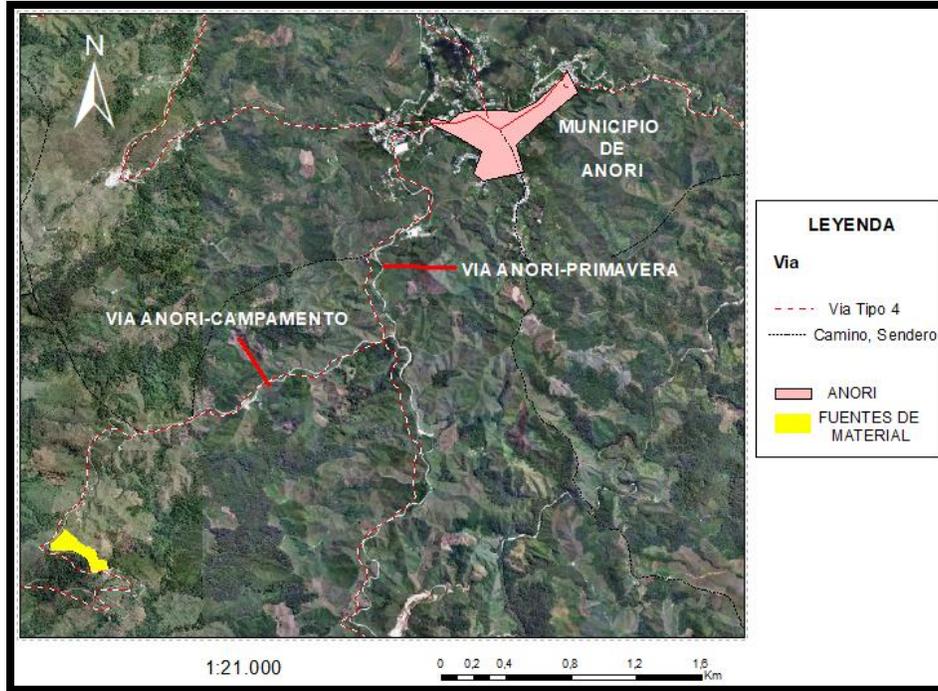


figura 121: La cantera La Ortiz se ubica a 2,8 km de la partida de la vía principal de la cabecera municipal del municipio de Anorí con el municipio de Campamento. El polígono amarillo representa la cantera la Ortiz, el polígono rosa la cabecera municipal de Anorí, la línea punteada negra los senderos y la línea punteada roja con blanco vías tipo 4.

La zona presenta un área total de 32.178 m^2 como se muestra en la figura 122. Asumiendo que se van a explotar aproximadamente 7 metros de espesor, el volumen total de material corresponde a 225.246 m^3 , se espera que este volumen satisfaga las necesidades de materiales para la pavimentación, ampliación y rectificación de los 19,7 km de la vía en estudio.

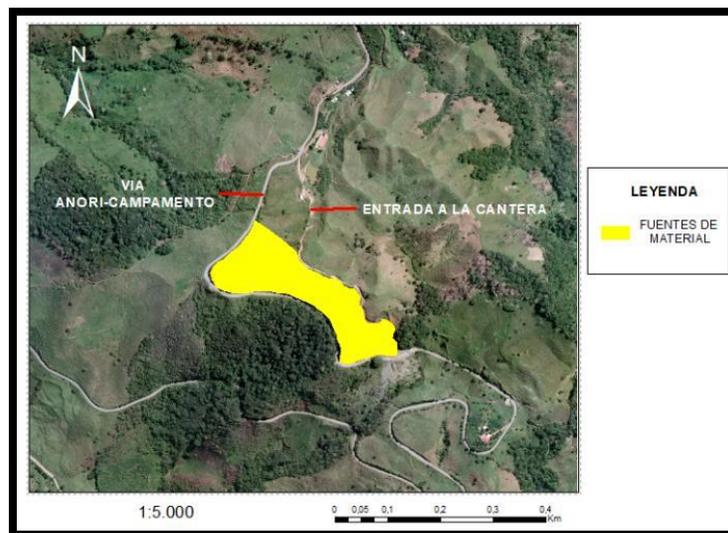


figura 122: La cantera La Ortiz. El polígono amarillo representa la cantera la Ortiz.

10.2.1.2 Características geológicas y geomorfológicas

En la cantera La Ortiz se identificó una unidad geomorfológica que corresponde a un terreno montañoso moderado con laderas de longitud larga, de pendientes semi-escarpadas con elevaciones aproximadas a 500 m, con crestas redondeadas, convexas planas y agudas.

Litológicamente, la cantera La Ortiz, está compuesta por esquistos cuarzo-sericiticos de color azul a gris oscuro, con porcentajes que varían entre 60 y 80% de cuarzo y 20 y 30% de micas de biotita y sericita. En general la roca no presenta ni fracturamiento ni diaclasas. El yacimiento corresponde a un tipo masivo, donde todo el material extraído será aprovechado.

Presenta un perfil de meteorización con tres horizontes bajo un espesor de aproximado de 0,6 m de materia orgánica, estos son; Suelo residual con un espesor aproximado de 1,4 m, Saprolito con un espesor aproximado de 2,9 m y transición suelo roca con un espesor aproximado de 4,3 m.

Los materiales de construcción serán extraídos de la cantera a cielo abierto.

A continuación, en la Tabla 19, se mostrará la columna correspondiente a la cantera La Ortiz.

Tabla 19. Columna correspondiente a la Cantera La Ortiz.

Materia Orgánica	0-60 cm		Este material no es apto como fuente de material para la base, sub-base y rodadura, por lo que este material será de descapote.
Suelo Residual	61-120 cm		Este material es apto como fuente de material debido a su granulometría, pero solo podrá ser explotado y utilizado para la sub-base y en algunos casos como la base del proyecto de pavimentación.
Saprolito	121-340 cm		Este material es apto como fuente de material debido a su granulometría, pero solo podrá ser explotado y utilizado para la rodadura o la base del proyecto de pavimentación.
Transición Suelo-Roca	341-700 cm		Este material es apto como fuente de material debido a su granulometría, pero solo podrá ser explotado y utilizado para la sub-base o la base del proyecto de pavimentación.

10.2.1.3 Propiedades geomecánicas del material

Los principales datos de laboratorio del material preparado como Base Estabilizada Con Emulsión Asfáltica se resumen en la Tabla 20.

Tabla 20. Datos de laboratorio del material preparado como base estabilizadora con emulsión asfáltica.

Ensayo	Valor
Límite líquido	24,0%
Límite plástico	18,4%
Índice de plasticidad	5,6%
Equivalente en arena:	27,4%
Desgaste en la máquina de los Ángeles a 500 RPM:	35%
Desgaste por Microdeval	36,6%
Porcentaje de finos ensayo seco:	12,7%
Porcentaje de finos ensayos húmedo:	8,6%
Relación Húmedo/Seco:	79,3%
Densidad Húmeda	2361 gr/cm ³
Densidad Seca	2190 gr/cm ³
Densidad máxima (kg/m ³)	2190
Humedad óptima	7,8%
CBR corregido a 0,1"	89,7
CBR corregido a 0,2"	97,5
Solidez del agregado grueso en sulfato de magnesio	0.63% de pérdida
% Terrones arcilla finos	0,37%
% Terrones arcilla gruesos	0,68%

10.2.2 Fuente 1.

10.2.2.1 Localización

Se ubica sobre el corredor vial en estudio en la abscisa 05+950, en las coordenadas 75° 15' 14,24" W y 7° 03' 98,10" N, como se ilustra en la figura 123.

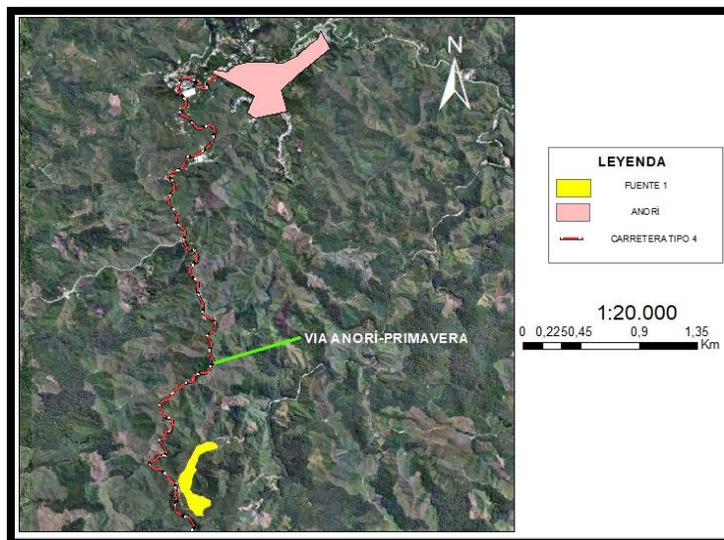


figura 123: La fuente 1 se ubica en el kilómetro 4+400 de la vía principal de la cabecera municipal de Anorí. El polígono amarillo representa la fuente 1, el polígono rosa la cabecera municipal de Anorí y la línea punteada roja con blanco vías tipo 4.

La zona presenta un área total de 57.8765 m^2 como se muestra en la figura 124. Asumiendo que se van a explotar aproximadamente 1,2 metros de espesor debido al descapote de 0.3 m, el volumen total de material corresponde a 78.297 m^3 .

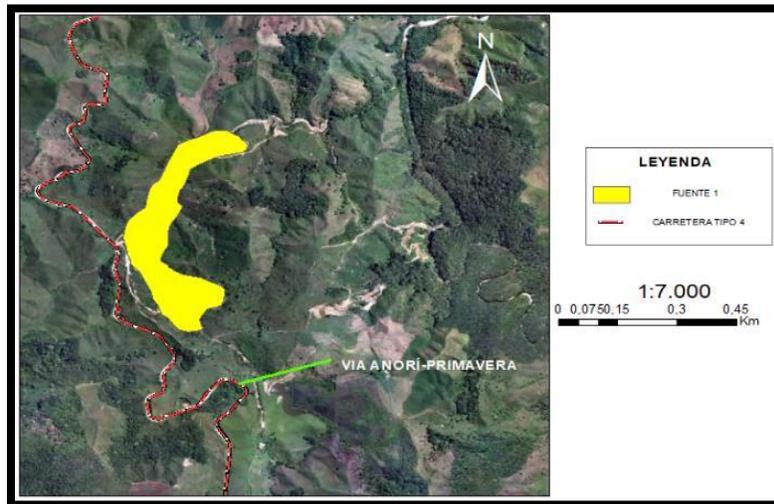


figura 124: Fuente 1. El polígono amarillo representa la fuente 1.

10.2.2.2 Características geológicas y geomorfológicas

Geomorfológicamente, la fuente 1, presenta laderas cóncavas, de baja pendiente y con poca prolongación correspondientes a un terreno ondulado a plano.

La fuente 1 corresponde a un depósito aluvial de material detrítico no consolidado acumulado por medios acuoso, posiblemente por la quebrada la Soledad o el río Anorí. Está conformado por gravas y arena gruesa principalmente y de composición metamórfica.

A continuación, en la Tabla 21, se mostrará la columna correspondiente a la fuente 1.

Tabla 21. Columna correspondiente a la fuente 1 de materiales.

Materia Orgánica	0-0.4 cm		Este material no es apto como fuente de material para la base, sub-base y rodadura, por lo que este material será de descapote.
Sedimento no consolidado	0.4-1.5 cm		Este material es apto como fuente de material debido a su variedad granulométrica, por lo que podrá ser explotado para la base, sub-base y rodadura del proyecto de pavimentación.

10.2.3 Fuente 2.

10.2.3.1 Localización

Se ubica sobre el corredor vial en estudio en la abscisa 06+800, en las coordenadas $75^{\circ} 14' 77,92''$ W y $7^{\circ} 02' 28,81''$ N, como se ilustra en la figura 125.

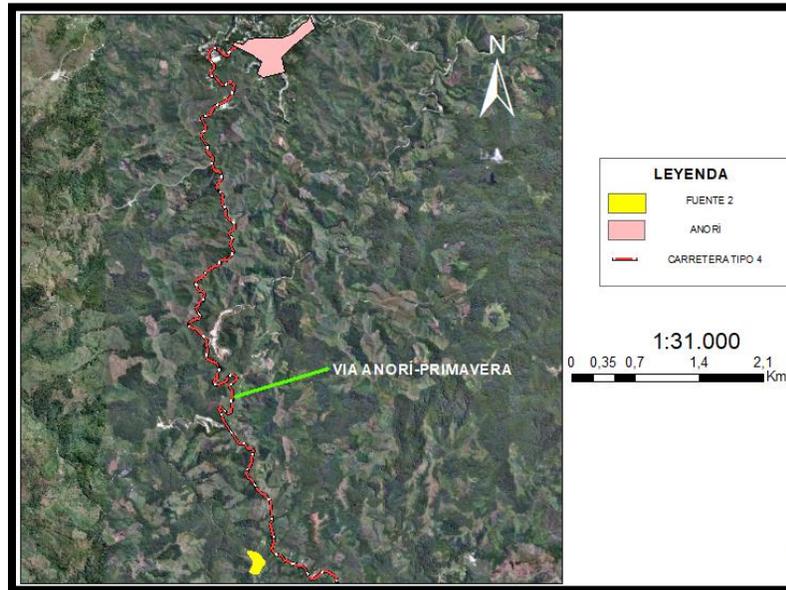


figura 125: La fuente 2 se ubica en el kilómetro 6+800 de la vía principal de la cabecera municipal de Anorí. El polígono amarillo representa la fuente 2, el polígono rosa la cabecera municipal de Anorí y la línea punteada roja con blanco vías tipo 4.

La zona presenta un área total de 31.663 m^2 como se muestra en la figura 126. Asumiendo que se van a explotar aproximadamente 1,3 metros de espesor debido al descapote de 0.2 m, el volumen total de material corresponde a 53.494 m^3 .

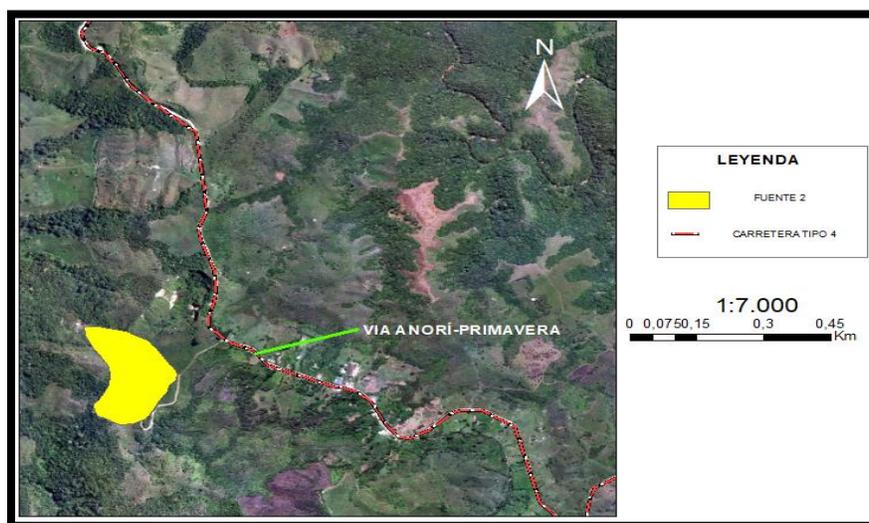


figura 126: Fuente 2. El polígono amarillo representa la fuente 2.

10.2.3.2 Características geológicas y geomorfológicas

Geomorfológicamente, la fuente 2, presenta laderas cóncavas, de baja pendiente y con poca prolongación correspondientes a un terreno ondulado a plano.

La fuente 2 corresponde a un depósito aluvial de material detrítico no consolidado acumulado por medios acuoso, posiblemente por la quebrada la Soledad o el río Anorí. Está conformado por gravas y arena gruesa principalmente y de composición metamórfica.

A continuación, en la Tabla 22, se mostrará la columna correspondiente a la fuente 2.

Tabla 22. Columna correspondiente a la fuente 2 de materiales.

Materia Orgánica	0-0.2 cm		Este material no es apto como fuente de material para la base, sub-base y rodadura, por lo que este material será de descapote.
Sedimento no consolidado	0.3-1.5 cm		Este material es apto como fuente de material debido a su variedad granulométrica, por lo que podrá ser explotado para la base, sub-base y rodadura del proyecto de pavimentación.

11 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

La vía que comunica la cabecera municipal de Anorí con la vereda Alto de la Primavera tiene una longitud de 19,7 km. Afloran los productos de la meteorización de rocas metamórficas de la Cordillera Central al oeste de la falla Otu (Paleozoico), unidad T-Mbg3, compuesta por esquisto cuarzo-sericítico grafitoso, y en menor proporción depósitos aluviales conformado por bloques que varían entre 4 y 6 cm de diámetro, compuestos en su mayoría por esquistos, filitas y cuarcitas.

Hidrológicamente, la zona oriental de la vía en estudio presenta drenajes subparalelos, paralelos y dendríticos, que drenan hacia el río Porce y hacia el río Anorí. La zona occidental de la vía presenta drenajes dendríticos que drenan hacia la quebrada La soledad y hacia el río Porce. Los ríos con mayor acumulación de flujo son el río Porce, la quebrada La soledad y el río Anorí. Las direcciones preferenciales por donde drena el flujo son en sentido Este y Oeste. Son sobresalientes en la zona los órdenes de drenajes según Strahler 1-2 y 3.

Geomorfológicamente, domina una topografía que combina relieves de montículos, colinas y montañas, fuertemente disectadas en sectores cercanos al río Anorí y al río Porce. Las geoformas denudacionales presentes en el relieve del área de estudio, son evidencias de rocas expuestas por largos periodos de tiempo a la inclemencia de la temperatura, precipitaciones y vegetación abundante. El mayor porcentaje de las pendientes se encuentra en sentido Sureste, Sur y Oeste, con laderas que tienden a ser lineales o planas e inclinaciones entre 3% - 40%.

Se destacaron tres sectores geológicos discriminados entre sí por características homogéneas de aspectos como geomorfología, hidrología, geometría de la vía, geología estructural, litología y perfiles de meteorización basados en las descripciones de perforaciones, estaciones de campo y factores de seguridad.

- Sector geológico 1: geomorfológicamente, está dominado por un relieve de colinas, la forma de las crestas son redondeadas y convexas planas, con laderas recta a convexas, abruptas a muy abruptas, de baja incisión con inclinaciones que van entre 16°-30 ° y longitudes largas, medias y bajas. La densidad de drenajes moderada. Presenta un lineamiento en sentido N-E que ejerce control estructural sobre el río Anorí. Las direcciones de foliaciones predominantes se encuentran alrededor del plano N45°E / 30°SE. El material de corte corresponde a roca 0% y a suelo (material común) 100%. Presenta ruptura planar en la abscisa 3+905 , baja cantidad de movimientos morfodinámicos, en general cumplen con los factores de seguridad estáticos salvo en la abscisa 00+200 y 1+990 geomorfológicamente domina un relieve de colinas, los ensayos arrojaron que el material es dúctil, de baja a alta plasticidad, alta compresibilidad y mayor resistencia al corte.

- Sector geológico 2: geomorfológicamente, está dominado por montículos, con crestas redondeadas, planas y convexas amplias, laderas de forma recta, muy inclinadas a abruptas con inclinaciones entre 11° - 20° y longitudes largas. Hay dos formaciones aluviales con sedimentos acumulados por medios acuosos. La densidad de drenajes es menor respecto al sector 1 y 3. Estructuralmente las direcciones de foliaciones predominantes se encuentran alrededor de los planos $N45^{\circ}E / 50^{\circ}SE$ y $S60^{\circ}E / 30^{\circ}SW$. Hay Presencia intermedia de procesos morfodinámicos en relación con el sector 1 y 3 debido al poco contenido de humedad relacionados especialmente con el contenido de humedad y los planos estructurales. El material de corte corresponde a roca 15% y a suelo (material común) 85%. Presenta ruptura planar en la abscisa 14+823, en general cumplen con los factores de seguridad estáticos salvo en la abscisa 6+690 y 14+00 geomorfológicamente domina un relieve de montículos, los ensayos arrojaron que el material es frágil, de baja plasticidad, media compresibilidad y resistencia al corte intermedia.
- Sector geológico 3: geomorfológicamente, está dominado por un relieve de montaña, con elevaciones mayores a 500 m, con crestas redondeadas, convexa amplias y agudas, laderas rectas, irregulares y cóncavas, escarpadas con inclinaciones entre 31° - 45° y longitudes largas, medias y bajas. Estructuralmente las direcciones de foliaciones predominantes se encuentran alrededor del plano $N36^{\circ}E / 20^{\circ}SE$. En el sector hay alta presencia de procesos morfodinámicos en relación con el sector 1 y 2 relacionados con el contenido de humedad y los planos estructurales. presenta una alta densidad de drenajes respecto al sector 1 y 2. El material de corte corresponde a roca 30% y a suelo (material común) 70%. Presenta ruptura planar en la abscisa 14+129, 16+126 y 16+933, alta cantidad de movimientos morfodinámicos, en general cumplen con los factores de seguridad estáticos salvo en la abscisa 17+510, 17+822 y 18+020, geomorfológicamente domina un relieve de montaña, los ensayos arrojaron que el material es frágil , ligeramente plástico, baja compresibilidad y resistencia al corte intermedia a baja.

Para el corredor vial, hay un total de 10 registros geológicos de exploración del subsuelo en donde el perfil de meteorización típico presenta saprolito y transición suelo-roca y en algunos casos espesores de suelo residual.

La clasificación geomecánica de los macizos rocosos concluyo en un RQD de 100 (calidad buena), un RMR entre 80-61 (calidad buena), un Q entre 10-40 (calidad buena).

No fue concluyente para la sectorización por tramos homogéneos factores como la litología y los perfiles de meteorización para discriminar sectores homogéneos.

Para la disposición de materiales sobrantes de corte, se seleccionaron dos zonas que podrían soportar la capacidad de material que satisface las necesidades del proyecto, están ubicadas en la Abscisa 04+400 a 04+800 y en la Abscisa 07+200 a 07+600. Como fuente de materiales a emplearse en la sub-base, la base y la rodadura del corredor vial se seleccionaron la cantera La Ortiz, una fuente 1 y una fuente 2, pues cumplen con los requerimientos granulométricos por el INVIAS, sin embargo hacen falta posteriores estudios.

En la vía Anorí – Primavera, los taludes en general son estables, pero dependen en gran medida de la exposición a aguas lluvias, o de escorrentía, lo que en algunos casos causa su inestabilidad. Las obras que se diseñen y ejecuten, podría generar sistemas de control de aguas (zanjas, canales, cunetas, encoles, alcantarillas, descoles, etc.), y subdrenaje (filtros), que favorezcan y protejan con suficiencia y eficiencia, la estabilidad de los taludes y la estructura del pavimento.

12 BIBLIOGRAFIA.

- Alcaldía de Anorí - Antioquia. (s.f.). *Nuestro Municipio*. Obtenido de Información general: http://www.anori-antioquia.gov.co/informacion_general.shtml
- esri. (2016). *ArcGIS for Desktop*. Obtenido de Dirección de flujo: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-flow-direction-works.htm>
- esri. (2016). *ArcGIS for Desktop*. Obtenido de Orientación: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-aspect-works.htm>
- esri. (2016). *ArcGIS for Desktop*. Obtenido de Funcion de curvatura: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm>
- esri. (2016). *ArcGIS for Desktop*. Obtenido de Pendiente: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-slope-works.htm>
- esri. (2016). *ArcGIS Desktop*. Obtenido de Clasificación de arroyos: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-stream-order-works.htm>
- esri. (2016). *ArcGIS Desktop*. Obtenido de Función sombreado: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/hillshade.htm>
- esri. (2016). *ArcGIS for Desktop*. Obtenido de Acumulación de flujo: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-flow-accumulation-works.htm>
- Farfan, A. C. (2008). En *Patrón de drenaje* (págs. 1-6). Lima.
- IDEAM. (2002). Aproximación a un modelo para la evaluación de la vulnerabilidad de las coberturas vegetales de Colombia ante un posible cambio climático utilizando Sistemas de Información Geográfica SIG. En *Páramos y Ecosistemas Altoandinos de Colombia en Condición Hotspot y Global Climatic Tensor* (pág. 339).
- Ingeominas. (1970). Memoria explicativa escala 1:100.000 Plancha 132 Yolombó- 148 San Carlos- 168 aRGELIA- 188 La Dorada- 117 Amalfí. En *Mapa geológico de Colombia* (págs. 13-123).
- INVIAS. (2012). Normas y especificaciones . En *Capítulo 3- Afirmados, Subbases y Bases* (págs. 1-150).

Inzunza, J. C. (2005). *Clasificación de los climas de Köppen*.

SGC. (2012). Informe unidades geomorfológicas de la plancha 117 Amalfi, escala 1:100.000 departamento de Antioquia. En G. Trejos, & Gustavo. Bogotá.

13 ANEXOS.

ANEXO 1-DESCRIPCIÓN GEOMECÁNICA

ANEXO 2- ENSAYOS DE LABORATORIO

ANEXO 3- DESCRIPCIÓN PERFORACIONES

ANEXO 4- PLANOS