

**DIAGNÓSTICO DE FALLA Y DISEÑO DE ESTABILIZACIÓN DE PUNTOS
CRÍTICOS DE LA UNIDAD FUNCIONAL 2 CAUCASIA - ZARAGOZA SECTOR
K0+840 a K2+400, PROYECTO CONEXIÓN NORTE - DEPARTAMENTO DE
ANTIOQUIA, COLOMBIA**



JULIÁN ESTEBAN GALVIS CORREA

INGENIERO CIVIL

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

ESPECIALISTA EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

PROYECTO DE APLICACIÓN DE INGENIERIA DE PAVIMENTOS

2020

**DIAGNÓSTICO DE FALLA Y DISEÑO DE ESTABILIZACIÓN DE PUNTOS
CRÍTICOS DE LA UNIDAD FUNCIONAL 2 CAUCASIA - ZARAGOZA SECTOR
K0+840 a K2+400, PROYECTO CONEXIÓN NORTE - DEPARTAMENTO DE
ANTIOQUIA, COLOMBIA**



JULIÁN ESTEBAN GALVIS CORREA

INGENIERO CIVIL

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

ESPECIALISTA EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS

Tutor: JOSÉ GONZALO RÍOS M. Msc, Esp

Asesor Metodológico e Investigación: Ing. JAIME ECHEVERRÍA R., Msc, Esp

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

PROYECTO DE APLICACIÓN DE INGENIERIA DE PAVIMENTOS

2020

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	14
ABSTRACT.....	15
1. INTRODUCCIÓN.....	16
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
2.1. Formulación de la Pregunta Problema.....	20
3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE APLICACIÓN PRÁCTICO.....	21
3.1. Objetivo General.....	21
3.2. Objetivos Específicos.....	21
4. JUSTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	22
4.1. Criterio de Justificación.....	22
4.2. Limitaciones del Trabajo de Aplicación Práctico.....	23
4.2.1. Territorio.....	23
4.2.2. Tiempo.....	24
5. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	25
5.1. Suelos.....	25
5.1.1. Origen de los Suelos.....	27
5.1.2. Suelos Residuales.....	28
5.1.3. Suelos Sedimentarios (Depósitos).....	29
5.2. Movimientos de Masas.....	31

5.3. Geotecnia.....	36
5.4. Análisis de Estabilidad.....	38
5.5. Taludes.....	43
5.6. Deslizamientos.....	46
5.6.1. Superficie de Falla.....	51
5.6.2. Causas.....	53
5.6.3. Tipos de Terreno.....	53
5.7. Slide Software.....	56
6. DISEÑO METODOLÓGICO.....	58
7. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	62
7.1. Recopilación y Manejo de la Información.....	62
7.2. Análisis de la Información.....	65
7.2.1. Localización.....	65
7.2.2. Registro Fotográfico.....	71
7.2.2.1. Situación Anterior al Evento.....	71
7.2.2.2. Situación Posterior al Evento.....	78
7.2.3. Antecedentes de Comportamiento de la Zona de los Puntos Críticos.....	83
7.2.3.1. Geología Regional.....	83
7.2.3.2. Sísmico.....	85
7.2.3.3. Falla Palestina.....	86
7.2.3.4. Zona de Falla Otú-Pericos.....	86
7.2.3.5. Falla Monteloro.....	87

7.2.3.6. Geología Local.....	87
7.2.4. Precipitación y Temperatura Promedio.....	87
7.2.5. Topografía.....	90
7.2.6. Trazado Geométrico de la Vía.....	91
7.2.7. Estructura de Pavimento.....	94
7.3. Detonantes de Falla.....	94
7.3.1. Identificación de los Movimientos en Masa para el Sitio Crítico.....	94
7.3.2. Tipo de Suelo y Geomorfología.....	95
7.3.3. Factores Relacionados con la Escala Temporal.....	99
7.3.4. Factores Relacionados con su Participación.....	99
7.3.4.1. Contribuyentes Internos.....	100
7.3.4.2. Contribuyentes Externos.....	101
7.4. Análisis de Falla.....	102
7.5. Factor de Seguridad.....	102
7.6. Propuesta Hecha por el Concesionario.....	103
7.7. Diagnóstico de Falla.....	115
7.7.1. Propuesta de Tratamiento Alternativo.....	115
8. CONCLUSIONES.....	125
9. RECOMENDACIONES.....	128
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	130

Lista de Tablas

Tabla 1. Sitio de estudio – Año 2015 K1+145 – K1+650. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	71
Tabla 2. Sitio de estudio – Año 2015 K1+800 – K2+100. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	73
Tabla 3. Sitio de estudio – Año 2015 K2+150 – K2+380. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	76
Tabla 4. Clasificación de Movimientos en Masa – Cruden y Varnes 1996.....	95
Tabla 5. Perforación 5 – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	97
Tabla 6. Perforación 6 – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	98
Tabla 7. Sondeo 5 – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	98
Tabla 8. Factores de Seguridad Básicos Mínimos Directos – NSR – Título H, Tabla H.6.9-1, 2020.....	103

Lista de Figuras

Figura 1. Localización Municipio de Zaragoza (Antioquia) - Google Maps.....	23
Figura 2. Localización Municipio de Caucasia (Antioquia) - Google Maps.....	23
Figura 3. Localización de los Puntos Críticos entre K0+840 a K2+400 Unidad Funcional 2 Caucasia – Zaragoza de Antioquia - Google Earth, 2020.....	24
Figura 4. Esquema general de una ladera en un suelo residual (SUAREZ, 2013).....	29
Figura 5. Esquema de proceso de reptación (SUAREZ, 2013).....	34
Figura 6. Esquema Deslizamiento Rotacional (SUAREZ, 2013).....	35
Figura 7. Ejemplo de un análisis de estabilidad de taludes (Duque, 2017).....	39
Figura 8. Valores de los ángulos de fricción residual (Rigo y otros, 2006).....	42
Figura 9. Nomenclatura de taludes y laderas (SUAREZ, 2013).....	44
Figura 10. Partes generales de un talud o ladera (SUAREZ, 2013).....	45
Figura 11. Procesos de Meteorización (Sancio y otros, 2000).....	46
Figura 12. Representación esquemática del proceso de meteorización (Geological Society Engineering).....	47
Figura 13. Partes de un deslizamiento (SUAREZ, 2013).....	49
Figura 14. Tipos de deslizamiento en suelos residuales (Deere y Patton 1971).....	52
Figura 15. Metodología del Proyecto.....	58
Figura 16. Metodología del Proyecto.....	59
Figura 17. Metodología del Proyecto.....	60

Figura 18. Metodología del Proyecto.....	60
Figura 19. Localización del Proyecto (Agencia Nacional de Infraestructura).....	65
Figura 20. Localización de los Puntos Críticos entre K0+840 a K2+400 Unidad Funcional 2 Caucasia – Zaragoza de Antioquia - Google Earth, 2020.....	66
Figura 21. Punto Crítico 1 entre K0+840 a K1+190 Unidad Funcional 2 Caucasia – Zaragoza de Antioquia - Google Earth, 2020.....	67
Figura 22. Punto Crítico 1 entre K0+840 a K1+190 Unidad Funcional 2 Caucasia – Zaragoza de Antioquia (Perspectiva) - Google Earth, 2020.....	67
Figura 23. Punto Crítico 2 entre K1+300 a K1+450 Unidad Funcional 2 Caucasia – Zaragoza de Antioquia - Google Earth, 2020.....	68
Figura 24. Punto Crítico 2 entre K1+300 a K1+450 Unidad Funcional 2 Caucasia – Zaragoza de Antioquia (Perspectiva) - Google Earth, 2020.....	68
Figura 25. Punto Crítico 3 entre K1+510 a K1+700 Unidad Funcional 2 Caucasia – Zaragoza de Antioquia - Google Earth, 2020.....	69
Figura 26. Punto Crítico 3 entre K1+510 a K1+700 Unidad Funcional 2 Caucasia – Zaragoza de Antioquia (Perspectiva) - Google Earth, 2020.....	69
Figura 27. Punto Crítico 4 entre K1+790 a K2+400 Unidad Funcional 2 Caucasia – Zaragoza de Antioquia - Google Earth, 2020.....	70
Figura 28. Punto Crítico 4 entre K1+790 a K2+400 Unidad Funcional 2 Caucasia – Zaragoza de Antioquia - Google Earth, 2020.....	70
Figura 29. Talud Derecho K1+145 – K1+650. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	72
Figura 30. Talud Izquierdo K1+145 – K1+650. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	72

Figura 31. Talud K1+800 al Inicio del Sector. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	73
Figura 32. Talud K1+800 en el Centro del Sector. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	74
Figura 33. Talud K1+800 Escarpes de la Parte Alta del Talud. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	74
Figura 34. Talud K1+800 Deslizamiento detrás de los gaviones al Final del Tramo. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	75
Figura 35. Talud K1+800 Cuarcitas Meteorizadas al Final del Tramo. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	75
Figura 36. Talud K2+150. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	76
Figura 37. Talud K2+150. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	77
Figura 38. Talud K2+380. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	77
Figura 39. Talud Derecho K1+145 – K1+650 Deslizamiento de Material. Google Earth 2020.....	78
Figura 40. Talud Derecho K1+145 – K1+650 Desgaste del material en la Corona. Google Earth 2020.....	78
Figura 41. Talud K1+800 al Inicio del Sector. Socavación en el apoyo del talud. Google Earth 2020.....	79
Figura 42. Talud K1+800 Perdida del material de Contención de revegetalización en la parte posterior a los gaviones al Final del Tramo. Google Earth 2020.....	79

Figura 43. Talud K1+800 Perdida del material de Contención de revegetalización en la parte posterior a los gaviones al Final del Tramo. Google Earth 2020.....	80
Figura 44. Talud K2+150. Incremento en el movimiento del Talud hacia la Vía. Google Earth 2020.....	80
Figura 45. Talud K2+150. Movimiento de masas del Talud. Google Earth 2020.....	81
Figura 46. Talud K2+150. Sistema de Drenaje Deficiente. Google Earth 2020.....	81
Figura 47. Geología Regional en el Tramo de la Vía Proyectada. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	84
Figura 48. La temperatura máxima y mínima promedio diaria Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	88
Figura 49. Porcentaje de días en los que se observan diferentes tipos de precipitación. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	89
Figura 50. La lluvia promedio (línea sólida) acumulada en un periodo móvil de 31 días centrado en el día en cuestión Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	90
Figura 51. Plano Topográfico sitio crítico – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	90
Figura 52. Plano Topográfico Sección crítica – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	91
Figura 53. Diseño Geométrico Sección crítica 1 – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	92
Figura 54. Diseño Geométrico Sección crítica 2 – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	92
Figura 55. Diseño Geométrico Sección crítica 3 – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	93

Figura 56. Diseño Geométrico Sección crítica 4 – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	93
Figura 57. Falla Rotacional. Movimientos de Masas, (Duque, 2017).....	95
Figura 58. Falla Rotacional. Movimientos de Masas, (Duque, 2017).....	96
Figura 59. Falla Traslacional. Movimientos de Masas, (Duque, 2017).....	97
Figura 60. Perfil Estratigráfico – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	104
Figura 61. Calculo Estático SLIDE V6.0 ($K1+450 - K1+650$) – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	104
Figura 62. Calculo Bajo Sismo SLIDE ($K1+450 - K1+650$) – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	105
Figura 63. Perfil Estratigráfico – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	106
Figura 64. Calculo Estático SLIDE V6.0 ($K1+800 - K1+850$) – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	106
Figura 65. Calculo Estático SLIDE V6.0 ($K1+800 - K1+850$) – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	107
Figura 66. Calculo Bajo Sismo SLIDE V6.0 ($K1+800 - K1+850$) – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	107
Figura 67. Calculo Estático SLIDE V6.0 ($K1+850 - K2+100$) – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	108
Figura 68. Calculo Bajo Sismo SLIDE V6.0 ($K1+850 - K2+100$) – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	108

Figura 69. Perfil Estratigráfico – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	109
Figura 70. Calculo Estático SLIDE V6.0 ($K2+150 - K2+190$) – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	110
Figura 71. Calculo Estático con Anclajes SLIDE V6.0 ($K2+150 - K2+190$) – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	110
Figura 72. Calculo Bajo Sismo con Anclajes SLIDE V6.0 ($K2+150 - K2+190$) – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	111
Figura 73. Calculo Estático con Anclajes SLIDE V6.0 ($K2+190 - K2+240$) – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	111
Figura 74. Calculo Bajo Sismo con Anclajes SLIDE V6.0 ($K2+190 - K2+240$) – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	112
Figura 75. Calculo Estático con Anclajes SLIDE V6.0 ($K2+240 - K2+320$) – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	112
Figura 76. Calculo Bajo Sismo con Anclajes SLIDE V6.0 ($K2+240 - K2+320$) – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	113
Figura 77. Calculo Estático con Anclajes SLIDE V6.0 ($K2+320 - K2+380$) – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	113
Figura 78. Calculo Bajo Sismo con Anclajes SLIDE V6.0 ($K2+320 - K2+380$) – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	114
Figura 79. Sección Crítica entre $K1+790$ a $K2+400$ Unidad Funcional 2 Caucaasia – Zaragoza de Antioquia - Google Earth, 2020.....	116
Figura 80. Sección Crítica entre $K2+300$ Unidad Funcional 2 Caucaasia – Zaragoza de Antioquia - Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	117

Figura 81. Sección Crítica (Esquema) entre K2+300 Unidad Funcional 2 Caucaasia – Zaragoza de Antioquia - Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	118
Figura 82. Sección Crítica entre K2+260 Unidad Funcional 2 Caucaasia – Zaragoza de Antioquia - Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	119
Figura 83. Sección Crítica (Esquema) entre K2+260 Unidad Funcional 2 Caucaasia – Zaragoza de Antioquia - Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	120
Figura 84. Sección Crítica entre K2+200 Unidad Funcional 2 Caucaasia – Zaragoza de Antioquia - Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	121
Figura 85. Sección Crítica (Esquema) entre K2+200 Unidad Funcional 2 Caucaasia – Zaragoza de Antioquia - Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.....	122

RESUMEN

Los proyectos Viales tienen como objeto el diseño, construcción, mantenimiento, operación y administración de la infraestructura pública de un país, mediante el desarrollo de proyectos de asociación público-privada; las vías que están a cargo del proyecto Autopista Conexión Norte de Cuarta Generación tienen una longitud total estimada de 145 kilómetros, uniendo los municipios de Remedios, Segovia, Zaragoza y Caucasia. Este proyecto conecta el sur occidente y centro occidente del país de forma directa con el Puerto de Cartagena, el norte del país y el nordeste de Antioquia con la Concesión Ruta del Sol a través de Puerto Berrío.

A lo largo del año 2018 y 2019 en el Proyecto Conexión Norte se presentaron varios deslizamientos a lo largo de la Unidad Funcional 2 Caucasia – Zaragoza en el sector comprendido entre K0+840 a K2+400, el cual ocasiono cierres parciales y totales en la circulación, producidos por un deficiente diseño de contención de taludes, que no tuvo en cuenta el drenaje y el tipo de suelo; debido a la susceptibilidad a erosión de los materiales por la aparición de esquistos grafitosos (esquistos negros) e incluso después de haber completado la protección de los taludes mediante la revegetalización, con base en esta información, este proyecto busca analizar tanto los diseños y eventos previos a la falla, como también el desarrollo de una propuesta de tratamiento alternativo para los puntos críticos.

Palabras clave: Deslizamiento, Taludes, Drenaje, Erosión, Falla.

ABSTRACT

Road projects are aimed at the design, construction, maintenance, operation and administration of the public infrastructure of a country, through the development of public-private partnership projects; The roads that are in charge of the Fourth Generation North Connection Highway project have an estimated total length of 145 kilometers, linking the municipalities of Remedios, Segovia, Zaragoza and Cauca. This project connects the south west and central west of the country directly with the Port of Cartagena, the north of the country and the northeast of Antioquia with the Ruta del Sol Concession through Puerto Berrío.

Throughout 2018 and 2019 in the North Connection Project there were several landslides along Functional Unit 2 Cauca - Zaragoza in the sector between K0 + 840 to K2 + 400, which caused partial and total closures in the circulation, produced by a deficient design to contain slopes, which did not take into account the drainage and the type of soil; Due to the susceptibility to erosion of the materials due to the appearance of graphite shales (black shales) and even after having completed the protection of the slopes through revegetation, based on this information, this project seeks to analyze both the designs and previous events to failure, as well as the development of an alternative treatment proposal for critical points.

Keywords: Landslide, Slopes, Drainage, Erosion, Fault.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La localización de Colombia se caracteriza por tener una gran variedad climática determinada por sus pisos térmicos, que se encuentran en el país por la variedad de altitudes, en el punto de vista comercial, es benéfico el hecho de ser un punto de conexión entre los países del norte y del sur del continente, debido a esto toda la gama de Proyectos Concesionados de Cuarta Generación buscan unir de forma más eficiente el país; pero enfocando esta descripción a la temática que más adelante se pretende abarcar, esta ubicación también incluye una zona de convergencia de placas tectónicas junto con una geografía bastante joven, por lo que la amenaza sísmica del país es intermedia y alta en algunas regiones, y es ahí en donde empieza un problema natural ligado con las estructuras civiles.

En la Unidad Funcional 2 del Proyecto Concesionado Conexión Norte que comunica los municipios de Remedios, Segovia, Zaragoza y Caucasia, se presentó a lo largo del año 2018 y 2020 varios deslizamientos en el sector comprendido entre K0+840 a K2+400, ocasionando cierres parciales y totales en la circulación, generando erosión y desprendimiento del material, debido a esto con la necesidad de solucionar estos eventos y mitigar los riesgos, el Concesionario inicia replanteos enfocados en los estudios y diseños para atender la emergencia presentada.

Según lo anterior, con el fin de generar alternativas de diseño a la contención de taludes y dar una solución de forma definitiva, este trabajo busca desarrollar un análisis completo de la información previa registrada de la zona, junto con los diseños que no fueron suficientes para la estabilización, Topografía del área, Trazado Geométrico de la calzada, Geología, Geotecnia, Registro Fotográfico y Estructura de Pavimentos; los cuales ayudarán a determinar qué factores no se tuvieron en cuenta, como lo pueden ser la Líneas de flujo, la Morfología y los Movimientos en masa para poder definir de manera clara y puntual el diagnóstico de falla en el terreno. Finalmente, con la información exacta se podrá establecer un Diagnóstico y Diseño como alternativa de estabilización de la zona, el cual garantizará un periodo de diseño a lo largo de la vida útil de la vía Caucasia – Zaragoza.

De acuerdo con el orden lógico y estructural establecido para el presente proyecto, el contenido contempla lo siguiente:

Capítulo 1 – Introducción, Planteamiento del Problema, Objetivos y Justificación: Se establece un contexto introductorio del proyecto y un argumento, especificando cada uno de los contenidos a tratar, adicionalmente se delimita el alcance del proyecto por medio de puntos generales, específicos y generando las necesidades por las cuales se realiza el proyecto.

Capítulo 2 - Fundamentación Teórica, Metodología: Contenido enfocado en las bases teóricas de Suelos, Geotecnia, Movimiento de Masas, Fallas y Análisis de Estabilidad, adicionalmente se contempla la secuencia y práctica para realizar el análisis de la información, Diagnóstico de Falla y Propuesta alternativa a los Puntos Críticos.

Capítulo 3 – Análisis y Resultados, Conclusiones y Recomendaciones: Se desarrolla el análisis de la información, junto con el Diagnostico de Falla y el planteamiento de la alternativa de diseño a los puntos críticos.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El diseño de cualquier tipo de estructura tiene como objetivo adecuar las funciones propias de un material, a partir de sus características naturales específicas y mecánicas, con los costos requeridos para que la obra de como resultado un impacto positivo, generando así un balance entre estos dos parámetros, sin embargo, existen una gran cantidad de factores que pueden no tenerse en cuenta a la hora de desarrollar un diseño, por tanto esa falta de control sobre todas las variables disponibles puede ocasionar problemas sociales, económicos y ambientales a largo plazo.

En la Unidad Funcional 2 del Proyecto Concesionado Conexión Norte que comunica los municipios de Remedios, Segovia, Zaragoza y Caucasia, se ha venido presentado a lo largo de tres años una serie de deslizamientos en el sector comprendido entre K0+840 a K2+400. Inicialmente en el año 2015 no se detectaron puntos críticos en la zona, lo que ocasionó varios desprendimientos de material de los taludes posterior a la construcción de la calzada, debido a esto con la necesidad de solucionar estos eventos y mitigar los riesgos, el Concesionario inicia replanteos enfocados en los estudios y diseños para atender la emergencia presentada, sin embargo tras dos diseños de contención lateral de los puntos críticos en el 2018 y 2019 enfocados en la revegetalización se presentaron deficiencias para las verdaderas condiciones de la zona que constituyen aproximadamente dos kilómetros, comprometiendo la viabilidad y seguridad de la estructura, y poniendo en riesgo a cualquier persona que se desplace entre estos municipios.

2.1. **Formulación de la Pregunta Problema**

A partir de lo anterior, se pretende enfocar la investigación en la siguiente pregunta problema: ¿Cómo realizar un Diagnóstico de falla y Diseño de Estabilización de puntos críticos de la Unidad Funcional 2 Caucaasia – Zaragoza sector K0+840 a K2+400, Proyecto Conexión Norte – Departamento de Antioquia, Colombia?

3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE APLICACIÓN PRÁCTICO

3.1. Objetivo General

- Realizar un diagnóstico de falla y diseñar la estabilización de los puntos críticos de la unidad funcional 2 Caucasia - Zaragoza sector K0+840 a K2+400 Proyecto Conexión Norte - Departamento de Antioquia, Colombia.

3.2. Objetivos Específicos

- Analizar la información que se tiene por parte del Concesionario, en cuanto a la Geología, Geotecnia, Topografía, registro Fotográfico y Dinámica de la zona que presenta Inestabilidad.
- Diagnosticar los tratamientos ya implementados por parte del Concesionario y verificar las causas de falla.
- Diseñar las alternativas de diseño para solucionar los puntos críticos del sector K0+840 a K2+400, mediante de las Herramientas de AutoCad y Slide.

4. JUSTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Criterio de Justificación

El diseño y la construcción de estructuras presentan ciertos inconvenientes en cuanto a los aspectos económicos que intervienen en estas etapas; una de estas fuentes de error radica en la incorrecta elección de la posible solución para contrarrestar los efectos que se tiene en la zona. La sección crítica comprendida entre K0+840 a K2+400 Unidad Funcional 2 Caucasia – Zaragoza (Antioquia), se originó debido al poco conocimiento del material colindante al derecho de vía, adicionalmente el incremento de humedad en la zona ocasionó una marcada erosión a lo largo de toda la margen derecha, afectando la estabilidad del talud, en el que previamente se había aplicado una revegetalización y anclajes dispuestos en los dos kilómetros.

Conforme a lo anterior, los impactos generados tanto en la Unidad Funcional 2 como en los municipios aledaños, indican una solución tanto rápida como eficiente, debido al riesgo que representa esta zona para la vida de todo habitante que circule periódicamente por la vía Concesionada; en la que cualquier afectación, cierre parcial o total ocasiona una gran pérdida socioeconómica, turística entre otras, atribuida a la importancia de la red vial clasificada como de primer orden.

Por último, con el fin de generar una solución a la problemática planteada, es necesario realizar todo un proyecto que comprenda tanto el análisis de los eventos presentados, enfocados en el diagnóstico y origen de la falla, como también la ejecución de un diseño de estabilización alternativo para los puntos críticos, todo esto basándose en la información de estudios,

laboratorios, muestreo, fotografías y diseños provista por la Concesión Autopista Conexión Norte y la Agencia Nacional de Infraestructura.

4.2. Limitaciones del trabajo de Aplicación práctico

4.2.1. Territorio.

El Sitio Crítico se encuentra localizado en el Proyecto Conexión Norte a lo largo de la Unidad Funcional 2 Caucasia – Zaragoza de Antioquia, en el sector comprendido entre K0+840 a K2+400, como limitaciones, es preciso aclarar la transformación que ha tenido el sector a lo largo de la construcción de este proyecto de Cuarta Generación y por tanto al no tener las condiciones iniciales, las posibles soluciones que se debieron tomar previo a las fallas son diferentes a la solución que ahora debe darse a la zona.

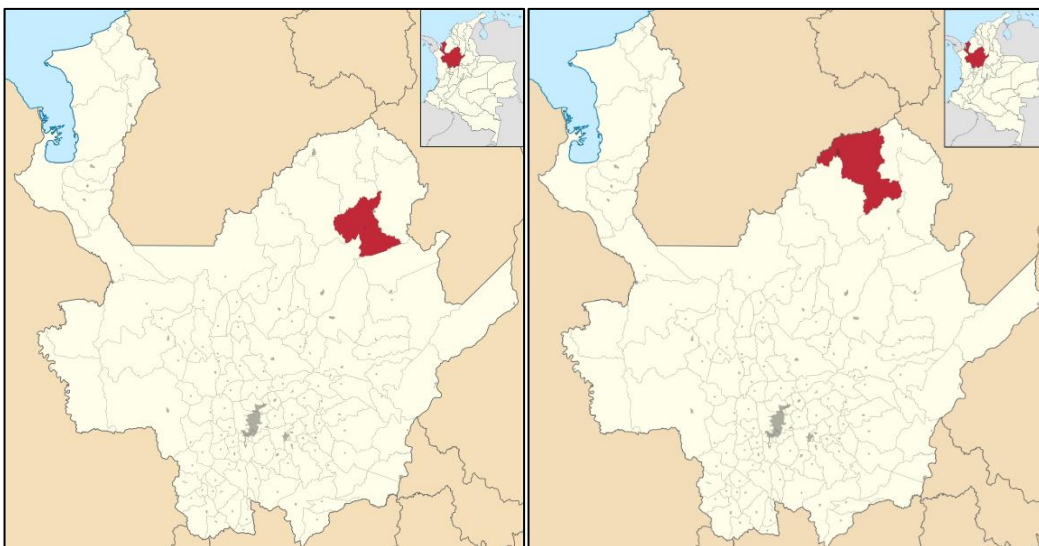


Figura 1. Localización Municipio de Zaragoza (Antioquia) - Google Maps.

Figura 2. Localización Municipio de Caucasia (Antioquia) - Google Maps.

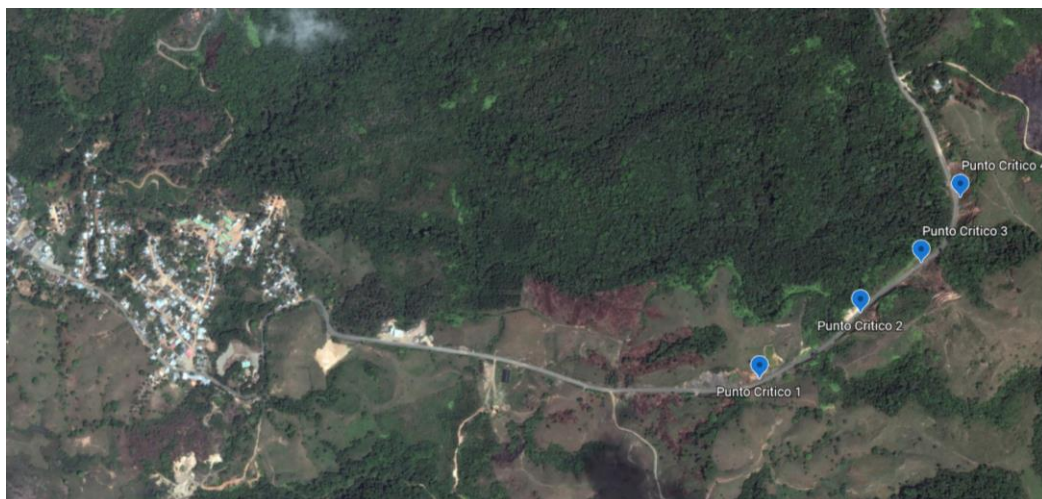


Figura 3. Localización de los Puntos Críticos entre K0+840 a K2+400 Unidad Funcional 2 Cauca – Zaragoza de Antioquia - Google Earth, 2020.

4.2.2. **Tiempo.**

De acuerdo con el Contrato de Concesión No. 009 de 2014, el Proyecto Autopista Conexión Norte tiene varias entregas parciales a lo largo del año 2020 y 2021, sin embargo debido a la Emergencia generada por la pandemia del Coronavirus (COVID – 19), se le otorgó a la Concesión un Evento Eximente de Responsabilidad ampliando las fechas de entrega de las Unidades funcionales, sin embargo el retraso generado por los puntos críticos se viene presentando desde antes de la emergencia, por ende es indispensable dar una solución definitiva para dar viabilidad a la puesta en operación de la vía entre Cauca – Zaragoza.

CAPÍTULO 2

5. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

5.1. Suelos

Los suelos son el material de construcción más abundante dentro de la rama de ingeniería Civil, el cual constituye la base de las estructuras como edificios, puentes, vías, túneles, entre muchos otros, además es muy utilizado como material de construcción para la conformación de diques, muros en tierra reforzada, rellenos y terraplenes; con el único fin de mejorar la infraestructura de toda una sociedad. (Duque, 2017)

Los suelos también están presentes en la conformación de los taludes de corte y de terraplenes viales, siendo estructuras que cumplen diferentes objetivos en los proyectos, estabilización, control de pendientes, canales y protección de revegetalización. Por estas razones es necesario realizar un estudio de suelos enfocado en las diferentes necesidades que se plantea la Ingeniería Civil, dentro de las cuales tenemos la estabilidad, que cumple un papel fundamental en todo tipo de proyectos ya que permiten la viabilidad de una cimentación en una estructura; la saturación en los suelos determina el resultado de la inestabilidad, la cual esta entrelazada a la erosión o cambio volumétrico que modifica considerablemente la resistencia del suelo. Es importante entender los comportamientos mecánicos del suelo para poder dar una solución a los problemas fundamentales de Ingeniera. (Duque, 2017)

La Mecánica de Suelos busca establecer herramientas que permitan solucionar los problemas de la ingeniería de suelos, por tanto, es importante conocer el origen y la formación, para establecer un análisis sectorizando de las formaciones litológicas; al relacionarlas se permite conocer los pesos, volúmenes y variaciones del suelo intrínsecamente dependientes del cambio de humedad. Para realizar una clasificación de los suelos se utilizan los laboratorios tanto de granulometría como de plasticidad, donde se identifican las propiedades de los suelos, dependiendo de la cantidad, frecuencia, tamaño y cualidad; el agua y el suelo tienen una relación muy estrecha, según la ausencia de agua se presenta un material seco y opuestamente el exceso satura el material, ejerciendo un sobre peso que altera la resistencia y modifica el volumen. (Duque, 2017)

El suelo debe ser un elemento confiable de apoyo en los proyectos de Ingeniería, y su funcionalidad está vinculada con un equilibrio en humedad plasticidad para poder soportar las cargas y conservar todas las cualidades que permiten la estabilidad del terreno; Terzaghi menciona: *“La mecánica de suelos es la aplicación de las leyes de la mecánica y la hidráulica a los problemas de ingeniería que tratan con sedimentos y otras acumulaciones no consolidadas de partículas sólidas, producidas por la desintegración mecánica o la descomposición química de la roca, independiente que tengan o no materia orgánica.”*

La mecánica de suelos está constituida por los siguientes fundamentos, la teoría sobre el comportamiento de los suelos sujetos a cargas, la investigación de las propiedades físicas de los suelos y la aplicación del conocimiento teórico y empírico de los problemas prácticos. En los suelos se presentan más variables que se deben tener en cuenta, a diferencia de los materiales en estructuras como el acero y concreto (con un módulo de elasticidad y resistencia a la rotura); se

presenta una gran variabilidad, donde los procesos naturales que forma los suelos están por fuera del control total del Ingeniero. Conforme a lo anterior es de vital importancia el tratamiento de las muestras, sean alteradas o inalteradas, clasificándolos en propiedades como color, olor, textura, tamaños y plasticidad, en cuanto a la obtención de los parámetros mecánicos, es muy importante la aplicación de la mecánica de suelos a los problemas de diseño. (Duque, 2017)

5.1.1. Origen de los Suelos.

La historia de la Mecánica de Suelos está fundamentada en la necesidad de plantear soluciones a los retos socioambientales con nuevas estructuras como, vías, taludes, canales, edificios y muchas otras obras, a lo cual la recopilación, revisión y análisis de las experiencias y datos preexistentes han contribuido a la consolidación de la Ingeniería como una disciplina de aplicación, también se tiene el desarrollo de nuevas tecnologías y técnicas asociadas a procesos que conllevan a soluciones de Ingeniería. La Ingeniería de suelos debe conocer y entender el contexto geológico de la zona, el clima de la región y el relieve; para disminuir la cantidad de incertidumbres que pueden resultar en pérdidas y evitar sucesos no contemplados en el diseño. (Duque, 2017)

El suelo en Ingeniería Civil se representa como los sedimentos no consolidados de la alteración de las rocas por medio del transporte con agua, viento y cambios abruptos de temperatura, adicionalmente es un cuerpo natural heterogéneo, en el que se estudia las propiedades, el comportamiento y la utilización del suelo como material estructural, de tal forma que las deformaciones y resistencia buscan ofrecer seguridad y durabilidad a lo largo de la vida

útil de un Proyecto. El proceso que inicia la alteración mecánica del suelo ocurre cuando las placas tectónicas inducen esfuerzos que deforma y dividen la roca; la fracturación de este material y su permeabilidad determinan la meteorización capaz de transformar los minerales de la roca que están en contacto con el agua. (Duque, 2017)

5.1.2. **Suelos residuales.**

Los suelos residuales son los que se forman en el sitio por procesos de meteorización física y química y se desarrollan principalmente, en condiciones tropicales húmedas, de meteorización química intensa; algunos autores los denominan “suelos tropicales”; sin embargo, debe tenerse en cuenta que los suelos residuales también se encuentran en zonas no tropicales, aunque en menor proporción. (SUAREZ, 2013)

Se conoce que el comportamiento ingenieril de los suelos residuales es muy diferente al de los suelos transportados y depositados, sus propiedades especiales son una respuesta a la combinación de los ambientes encontrados en los trópicos, relacionados con el clima, la lluvia, los regímenes de temperatura, la litología del material de roca parental, el movimiento del agua, las condiciones de drenaje, el relieve, la vegetación, la edad y los niveles de meteorización, entre otros factores. (SUAREZ, 2013)

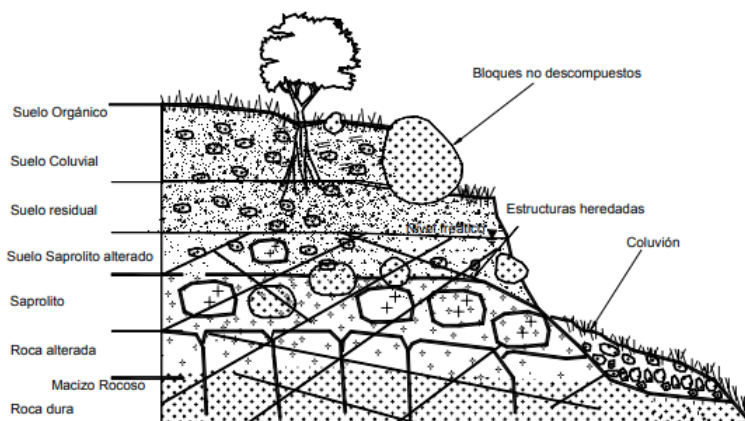


Figura 4. Esquema general de una ladera en un suelo residual (SUAREZ, 2013)

La mayoría de los deslizamientos de suelos residuales son los deslizamientos poco profundos y rápidos del suelo residual sobre el saprolito (Roca algo meteorizada) o la roca, pero cuando los perfiles de meteorización del suelo residual son muy profundos, se pueden presentar también deslizamientos rotacionales. (SUAREZ, 2013)

5.1.3. Suelos Sedimentarios (Depósitos).

Los suelos sedimentarios están compuestos por partículas que han sido transportadas tanto por el viento como por el agua (también se debe tener en cuenta el hielo y la modificación por medio del hombre), por ende, la topografía tiende a ser ondulada, con una buena cantidad de material orgánico en la primera capa superficial; las zonas de sedimentación son diversas y ocurren en todo tipo de cuerpos de agua, la cual puede tener dos características, ya sea dulce o salina. (SUAREZ, 2013)

La Ingeniería de suelos debe reconocer todas las propiedades que pueden presentar los depósitos y realizar una diferenciación de las expuestas por los suelos residuales, entre las que se tiene la densidad, compresibilidad, resistencia, permeabilidad y la plasticidad (dependiendo del tipo de material), conforme a lo expuesto anteriormente, se debe diferenciar según su origen, los materiales que son movilizados, transportados y depositados, por un medio que da como resultado propiedades particulares:

- Los depósitos coluviales son transportados ladera abajo gracias a la gravedad, alcanzando humedades altas, con una textura y estructura que está definida por las fuerzas de la gravedad.
- Los depósitos eólicos son transportados por el viento, en el transporte y posteriormente en el depósito se clasifican según su tamaño y densidad, para lo cual establecerán una conformación estratigráfica del material sedimentado.
- Los depósitos aluviales se forman gracias al del transporte de partículas por la acción del agua y su sedimentación.

Las características que definen un depósito son el resultado de la energía y densidad del flujo (viento o agua), determinando así los tamaños de cada una de las partículas, presentando un comportamiento lógico, establecido por el tipo de suelo; aclarando la información previa se presentan depósitos arcillosos en zona donde la energía es baja y depósitos granulares de arenas y gravas cuando la energía del agua es más alta. (SUAREZ, 2013)

5.2. **Movimiento de Masas**

Los movimientos de masas de suelos están relacionados a los esfuerzos externos a este, tanto en el análisis de la magnitud y dirección, siendo de vital importancia para establecer una solución a las estructuras subterráneas de cualquier proyecto, como lo son el drenaje y estructuras de contención. Todas las prácticas de la mecánica de suelos se basan en aproximaciones del material que compone la fundación, por medio de los laboratorios se identifican y caracterizan los materiales que integran todas las áreas de los proyectos, con ayuda de la instrumentación se determina la medición de variables de deformación, presiones laterales, presión de poros y perturbaciones dinámicas. (SUAREZ, 1998)

En medio del criterio establecido por los movimientos del terreno, se deben diferenciar por flujos rápidos y deslizamientos, es decir la consecuencia por la cual se manifiesta el transporte del material; representado como avalanchas, flujos (generados por la humedad de la zona) y deposición de material. Los desplazamientos de masas se dan en consecuencia a los desprendimientos, deslizamientos y subsidencias (erosión del terreno) del material. Adicionalmente la rapidez de un deslizamiento se debe considerar como una característica fundamental, se le conoce con el termino de flujo y es de gran importancia en el desarrollo e implementación de taludes y contenciones laterales. (SUAREZ, 1998)

Estos procesos son esencialmente gravitatorios, en los que una parte de la masa del terreno se desplaza, sin un medio de transporte, tan solo se genera una fuerza estabilizadora. Este tipo de procesos se encuentran relacionados con las precipitaciones altas, de tal forma las lluvias torrenciales son uno de los factores que pueden activar los movimientos en masa; por lo general

los movimientos de masas se pueden determinar cómo deslizamientos, derrumbes, desprendimientos y desplomes. (SUAREZ, 1998)

Los movimientos están descritos por la Ecuación de Esfuerzo o Resistencia al Cortante Tangencial, por ende para realizar un estudio de la estabilidad de una ladera, se requiere estimar la resistencia del suelo ante los esfuerzos de cortante, la cual consiste en la modelación física y establecimiento de la resistencia máxima del suelo al movimiento de cada una de las partículas; la fuerza que se opone al deslizamiento depende de la cohesión entre partículas y por la resistencia friccional entre ellas cuando se les fuerza a deslizarse (Gray y Sotir, 1996; Suárez, 1998).

Según la teoría de Charles Auguste de Coulomb (propuesta en 1773) en la cual se establece que un material falla cuando el esfuerzo cortante en una dirección iguala la resistencia a la cortante dirección contraria, lo cual depende intrínsecamente de la cohesión y la fricción interna entre los granos del suelo, el esfuerzo cortante depende de la Ley de Coulomb

$$S = C + sn * \tan (F)$$

Donde S es el esfuerzo cortante o resistencia al cortante tangencial, C es la cohesión del suelo, sn es el esfuerzo normal crítico, tan F es el coeficiente de fricción y F es el ángulo de fricción interna del suelo. Adicionalmente Terzaghi (1925) estableció la importancia de la presión de los poros por agua sobre el esfuerzo cortante; modificando la ecuación anterior para agregar este factor se establece la ecuación de esfuerzo cortante de Coulomb-Hvorslev

$$S = C' + s' * \tan (F')$$

Donde C' es la cohesión efectiva del suelo (atracción entre partículas), s' es el esfuerzo normal efectivo y F' es el ángulo efectivo de la fricción. El esfuerzo efectivo es descrito por:

$$s' = s - U$$

Siendo s' el esfuerzo efectivo (intergranular), s es el esfuerzo total y U es la presión de los poros con agua. En las arcillas la cohesión depende de la magnitud de preconsolidación que haya tenido en su historia geológica, de su composición mineralógica y de su contenido de humedad.

En cuanto a estudios geotécnicos, no se tiene en cuenta la influencia de las plantas en el incremento de la cohesión del suelo, el efecto de refuerzo mecánico se relaciona con la resistencia del suelo a esfuerzos de cortante, ya que se mejora la cohesión; además el anclaje que proporcionan las raíces y la penetración del tallo, es bastante similar a una pilote o anclaje de refuerzo que contrarresta las fuerzas paralelas a la pendiente, adicionalmente el peso de la vegetación ejerce sobre el suelo una componente vertical que aumenta la carga normal y por ende la resistencia al deslizamiento. (SUAREZ, 1998)

Este efecto de la vegetación sobre la estabilidad del suelo se debe a que, este sistema conforma una malla densa de fibras resistentes que refuerza la capa de suelo manteniéndola en su sitio, estableciendo una unión en capas más estables, mientras la raíz actúa como un anclaje en forma de columna que evita el desplazamiento. El ángulo de Fricción interna se encuentra asociado a las magnitudes más altas del índice de plasticidad, lo que muestra la influencia que tiene la composición mineralógica; por otro lado, el contenido de agua de dichos suelos y la velocidad de aplicación de las cargas, junto con las condiciones de drenaje, dan como resultado variaciones importantes en la fricción interna. Lo anterior implica, que los deslizamientos en zonas de laderas

son dependientes de la fuerza de gravedad, la cohesión del suelo (la cual puede ser modificada con el sistema de la vegetación a lo largo de la superficie), el ángulo de fricción interna (depende de la mineralogía) y de la cantidad de contenido de humedad de la zona. (SUAREZ, 1998)

Se pueden diferenciar tres tipos de volcamiento, la reptación o creep consiste en movimientos del suelo subsuperficial desde muy lentos a extremadamente lentos sin una superficie definida de falla, la profundidad del movimiento puede ser desde pocos centímetros hasta varios metros. Generalmente, el desplazamiento horizontal es de unos pocos centímetros al año y afecta a grandes áreas de terreno. La reptación puede preceder a movimientos más rápidos como los flujos o deslizamientos traslacionales, comúnmente ocurre en las laderas con pendiente baja a media, se les atribuye a las alteraciones climáticas relacionadas con los procesos de humedecimiento y secado en los suelos, usualmente arcillosos, muy blandos o alterados, con características expansivas. (SUAREZ, 2013)

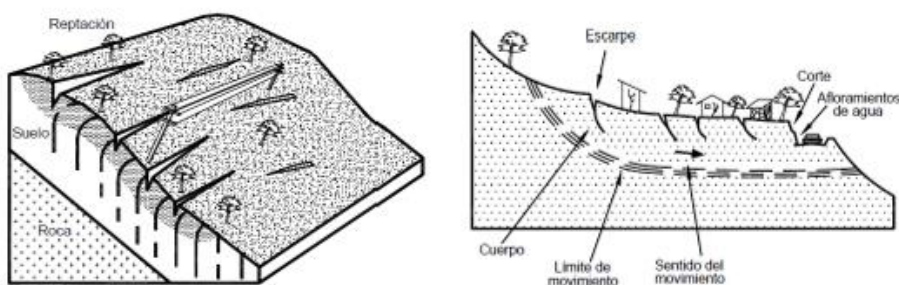


Figura 5. Esquema de proceso de reptación (SUAREZ, 2013)

En un desplazamiento rotacional, la superficie de falla es cóncava hacia arriba y el movimiento es rotacional con respecto al eje paralelo a la superficie y transversal al deslizamiento, el centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo del movimiento. Visto

en planta, el deslizamiento de rotación posee una serie de agrietamientos concéntricos y cóncavos en la dirección del movimiento, el movimiento produce un área superior de hundimiento y otra inferior de deslizamiento, lo cual genera, comúnmente, flujos de materiales por debajo del pie del deslizamiento, la cabeza del movimiento bascula hacia atrás y los árboles se inclinan, de forma diferente, en la cabeza y en el pie del deslizamiento. (SUAREZ, 2013)

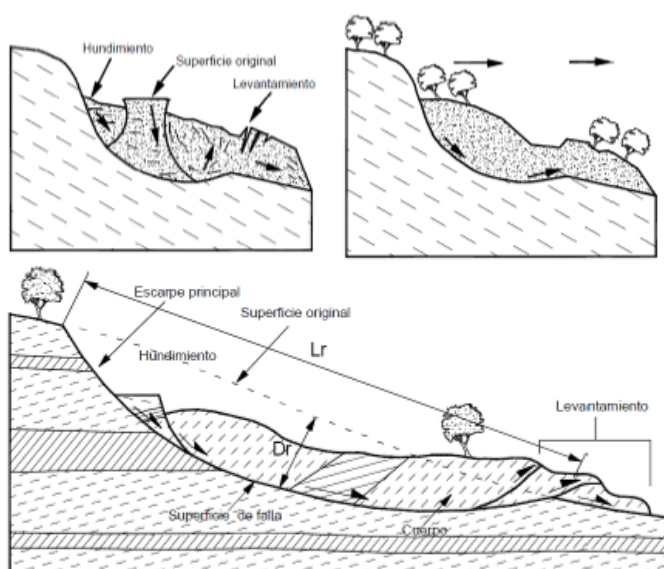


Figura 6. Esquema Deslizamiento Rotacional (SUAREZ, 2013)

En el desplazamiento de traslación la masa se desliza hacia afuera o hacia abajo, a lo largo de una superficie más o menos plana o ligeramente ondulada y tiene muy poco o nada de movimiento de rotación o volteo. Los movimientos traslacionales generalmente, tienen una relación D_r/L_r de menos de 0.1, en muchos desplazamientos de traslación, la masa se deforma y/o se rompe y puede convertirse en flujo, especialmente en las zonas de pendiente fuerte. (SUAREZ, 2013)

5.3. Geotecnia

La Geotécnica es una rama de la ingeniería civil que se encarga del estudio de las propiedades mecánicas, hidráulicas y resistencia a lo largo de distintos tipos de suelos, esta área busca analizar el suelo y las rocas ubicadas por debajo de la superficie, para poder establecer sus propiedades y diseñar las cimentaciones para cualquier tipo de estructuras; este conocimiento geotécnico permite conocer las condiciones bajo las cuales los materiales de fundación fueron depositados y creados, al igual que determinar el mejor uso para un diseño en la Ingeniería. (Duque, 2017)

La investigación del riesgo que conlleva la geotecnia esta enlazado con los fenómenos ambientales naturales como deslizamientos de terreno, hundimientos, flujos y caída de rocas; la idea es eliminar y minimizar las incertidumbres que se puedan establecer en el terreno de manera sostenible y segura. La misión esencial de la geotecnia es proporcionar de cierta forma una imagen completa de los fenómenos geológico-geotécnicos que pueden presentarse al interactuar y las características geológicas de la zona en la que puede ubicar un proyecto. (Duque, 2017)

La geotecnia vial es la especialidad de la ingeniería geotécnica que se enfoca en resolver los problemas de la infraestructura vial relacionados con el suelo y las rocas como medio de soporte de las obras viales (Estructuras de pavimentos, terraplenes, túneles, taludes, muros de contención, etc.). Las restricciones geológico-geotécnicas del entorno definen y trazan cierto camino para las etapas de diseño, construcción y mantenimiento de las obras; ya que el tema hidráulico en aguas superficiales y subsuperficiales son de gran importancia para establecer un buen diseño. (Duque, 2017)

La capacidad de soporte de subrasantes para proyectos viales, como mejoramiento de subrasantes por medio de compactación, estabilización, sustitución o reforzamiento, cada uno de ellos depende del conocimiento intrínseco de la geotecnia, en la cual se fundamenta todo el conocimiento y soporte; en el análisis de estabilidad de laderas, taludes, muros anclados y muros de contención, rellenos, compresibilidad, consolidación, licuación de suelos, cimentaciones, pantallas y pilotes. (Duque, 2017)

El entorno donde se plantean los proyectos viales puede verse influenciados por diferentes tipos de amenazas naturales, en la mayoría de los casos donde cada proyecto tiene una longitud bastante extensa (encargada de comunicar centros económicos importantes) es normal que el trazado se vea afectado por diferentes amenazas; los principales campos de estudio de la geotecnia son:

- La ingeniería geológica, encargada de la invención en conjunto con a la interacción con el medio geológico donde habita.
- La mecánica de rocas, enfocándose en el comportamiento de las piedras, macizos rocosos, en conjunto con su conocimiento teórico y aplicado.
- El estudio de los suelos, conocimiento enfocado en comprender la reacción al estrés, la tensión y a otras condiciones fisicoquímicas.
- La mecánica de los suelos, parecida al punto anterior, pero aplicada a las leyes de la física, ciencias naturales, al estudio de las fuerzas actuantes en la capa superficial de los suelos.

A nivel general las principales restricciones asociadas a las rutas de montaña son los deslizamientos, flujos de lodo, la inestabilidad de suelos y la caída de rocas, en cuanto a las zonas

planas las restricciones se enfocan más en las inundaciones, erosión, socavación, compresibilidad, expansividad, licuación y los flujos de lodo. Todas estas limitaciones si son identificadas a tiempo, pueden ser solucionadas realizando diseño previo en etapas iniciales, con el fin de evitar problemas que pudieron solucionarse desde el inicio, pudiendo determinar la probabilidad de ocurrencia y determinar su impacto. (Duque, 2017)

La falta de información sobre el subsuelo y la información defectuosa dan como resultado un proyecto con costos mayores, por ende, lo más indicado al realizar un estudio geotécnico completo para garantizar una estabilidad tanto económica como técnicamente.

5.4. Análisis de Estabilidad

La modelación matemática de los taludes es parte de la práctica de la ingeniería geotécnica, con el objeto de analizar las condiciones de estabilidad de los taludes naturales y la seguridad y funcionalidad del diseño en los taludes artificiales. Existe una gran cantidad de metodologías para la modelación matemática, la cual depende del objetivo del análisis y de los resultados que se deseen obtener, los objetivos principales del análisis matemático de los taludes son los siguientes:

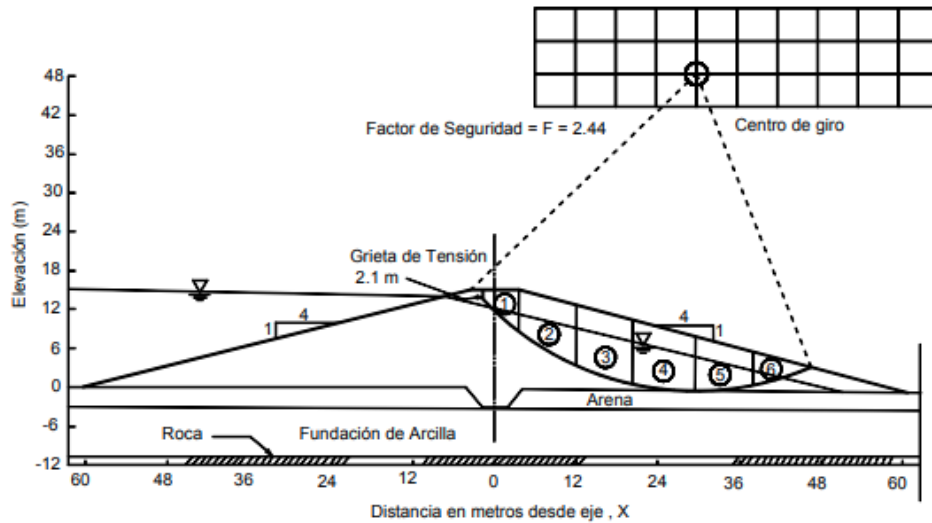


Figura 7. Ejemplo de un análisis de estabilidad de taludes (Duque, 2017)

- Determinar las condiciones de estabilidad del talud (si es estable o inestable y el margen de estabilidad).
- Investigar los mecanismos potenciales de falla (analizar cómo ocurre la falla).
- Determinar la sensibilidad o susceptibilidad de los taludes a diferentes mecanismos de activación (Efecto de las lluvias, sismos, etc.).
- Comparar la efectividad de las diferentes opciones de remediación o estabilización y su efecto sobre la estabilidad del talud.
- Diseñar los taludes óptimos en término de seguridad, confiabilidad y economía.

La técnica de análisis que se escoja depende de las características de los sitios y del modo potencial de falla; dando especial consideración a las fortalezas, las debilidades y las limitaciones de cada metodología de análisis, hasta el año 1975, la mayoría de los análisis de estabilidad se realizaban en forma gráfica o utilizando calculadoras manuales. Con la llegada del computador los

análisis se pudieron realizar en forma más detallada; recientemente con programas de software, los cuales cada día son más poderosos. (SUAREZ, 2013)

Teniendo en cuenta la gran cantidad de aplicaciones numéricas disponibles en la actualidad, es esencial que el ingeniero entienda las fortalezas y limitaciones inherentes a cada metodología. Existen una gran cantidad de herramientas informáticas para el análisis de estabilidad de taludes, dentro de estas herramientas, los métodos de equilibrio límite son los más utilizados; sin embargo, los métodos esfuerzo - deformación utilizando elementos finitos, han adquirido gran importancia. (SUAREZ, 2013)

La estabilidad de los suelos residuales muy meteorizados se puede analizar utilizando las teorías tradicionales de la mecánica de suelos, con cierto grado de confiabilidad; sin embargo, a medida que se profundiza en el perfil, las propiedades de los materiales cambian sustancialmente. Según Massey y Pang (1988) el comportamiento y la resistencia al corte de los materiales son una función de:

- La naturaleza de la roca original.
- La mineralogía derivada de los procesos de meteorización física y química.
- El grado de saturación y los cambios inducidos por modificaciones del contenido de humedad.
- La presencia, orientación, espaciamiento, persistencia e imperfecciones de las discontinuidades heredadas, junto con la naturaleza de los rellenos o coberturas.
- La presencia, forma y distribución de material de roca menos meteorizada en forma de bloques o bandas dentro de la matriz más fuertemente meteorizada.

La cohesión y la fricción entre las partículas o bloques varían considerablemente de acuerdo con el tipo de suelo, meteorización, heterogeneidad, contenido de minerales, tamaño y forma de las partículas, humedad, presión de poros y la historia de la formación del material. Adicionalmente, cuando ha ocurrido anteriormente un movimiento, la cohesión y la fricción han disminuido especialmente cerca de las superficies de falla o fractura. (SUAREZ, 2013)

La resistencia al cortante generalmente es menor en el suelo, que en el saprolito o en la roca, pero las formaciones residuales tienen superficies de discontinuidad equivalentes a superficies de debilidad de baja resistencia que facilitan la posibilidad de movimientos. Es común que la resistencia al cortante sea menor a lo largo de las discontinuidades heredadas, que en la matriz del material residual y se reportan casos en los cuales la resistencia, a lo largo de la discontinuidad, puede ser muy pequeña, comparada con la resistencia a través del suelo en sí, especialmente cuando las discontinuidades se encuentran rellenas. (SUAREZ, 2013)

Las deformaciones pequeñas inducidas durante el muestreo pueden debilitar las uniones y disminuir la resistencia al cortante. Brand (1985) sugirió que los saprolitos a bajas presiones efectivas, tienen resistencias más altas que las obtenidas en ensayos triaxiales con envolvente de falla de línea recta.

La cohesión es una propiedad determinante en el comportamiento de un suelo residual, en los suelos no saturados, hay una cohesión aparente, la cual es el producto de las tensiones negativas en el agua de poros, la cual desaparece por saturación; sin embargo, en muchos casos, la cohesión es debida a la cementación de productos precipitados (Sowers,1985). La cohesión generalmente

no es continua a lo largo de una superficie y desaparece con frecuencia por la abertura de las discontinuidades, debida a fuerzas de tensión o a presión de poros. (SUAREZ, 2013)

El valor del ángulo de fricción interna de los materiales disminuye con el avance del proceso de meteorización, en ensayos realizados en materiales de granitos y neises en Colombia se encuentran variaciones entre 26° a 38° , similares a los indicados por Deere y Patton (1971); para materiales de lutitas entre 10° y 35° y para materiales de areniscas entre 25° y 45° , en concordancia con los valores propuestos por Sowers. (1981).

En los materiales derivados de areniscas, el autor ha encontrado ángulos de fricción a lo largo de discontinuidades rellenas de arcilla con valores de 10 a 15° , cuando los ángulos de fricción de discontinuidades sin relleno dan valores de 35° a 38° en el mismo talud. Esta realidad dificulta la evaluación del comportamiento de los suelos residuales utilizando los modelos de la mecánica de suelos tradicional. El ángulo de fricción residual de los suelos tropicales depende principalmente de la mineralogía, la distribución de tamaños de las partículas, los esfuerzos efectivos, el tipo de roca parental, el grado de meteorización entre otros factores. El ángulo de fricción residual (ϕ_r') varía generalmente de 5° a 33° (Rigo y otros, 2006).

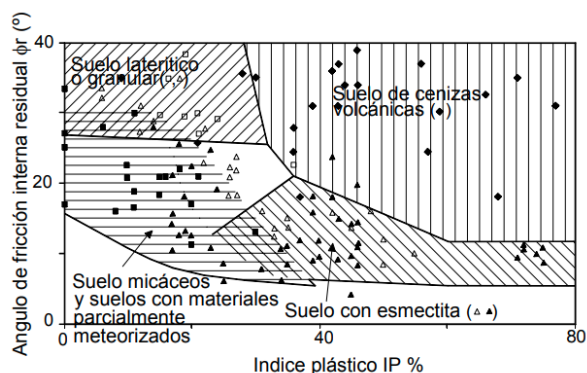


Figura 8. Valores de los ángulos de fricción residual (Rigo y otros, 2006)

El ángulo de fricción de los suelos provenientes de rocas sedimentarias se correlaciona con el contenido de arcilla y el tipo de arcilla presente, cuando el contenido de arcilla es mayor del 40%, las partículas de arcilla tratan de orientarse y esto puede disminuir la resistencia. El ángulo de fricción residual ϕ_r' puede variar de 5° y 20° , dependiendo del tipo de mineral de arcilla. Los minerales que más afectan la ocurrencia de valores bajos de ángulos de fricción residual ϕ_r' son la presencia de esmectita y la presencia de mica, cuando el contenido de arcilla es menor del 15%, la resistencia residual ϕ_r' es típicamente mayor de 25° y la resistencia depende principalmente de la interacción entre las partículas gruesas (Lupini y otros, 1981).

En los suelos residuales la envolvente de falla puede tener una forma no lineal, especialmente en el rango de presiones bajas, Brand (1985) presenta el caso de los suelos residuales derivados de granitos en Hong Kong, donde la envolvente de falla presenta una curva en los niveles de esfuerzos normales bajos sin que se presente un intercepto de cohesión.

5.5. Taludes

Los taludes se asocian a cualquier superficie inclinada respecto a un punto horizontal que hayan de adoptado las estructuras de tierra, pueden ser naturales o artificiales; se les denomina comúnmente como laderas formadas por un medio natural a través del tiempo sin la interferencia del ser humano, con respecto al segundo se le denomina talud, debido a que por medio de la modificación del hombre y con ayuda de la Ingeniería se crean para dar solución a un diseño de construcción. (SUAREZ, 2013)

Los taludes se pueden agrupar en tres categorías generales: los terraplenes, los cortes de laderas naturales y los muros de contención, se pueden presentar combinaciones de los diversos tipos de taludes y laderas. Las laderas o taludes que han permanecido estables por muchos años pueden fallar debido a cambios topográficos, sísmicos, a los flujos de agua subterránea, a los cambios en la resistencia del suelo, la meteorización o a factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad, un talud estable puede convertirse en un deslizamiento. (SUAREZ, 2013)

Existen algunos términos para definir las partes de un talud, el talud comprende una parte alta o superior convexa con una cabeza, cima, cresta o escarpe, donde se presentan procesos de denudación o erosión; una parte intermedia semirrecta y una parte baja o inferior cóncava con un pie, pata o base, en la cual ocurren principalmente procesos de deposición. (SUAREZ, 2013)

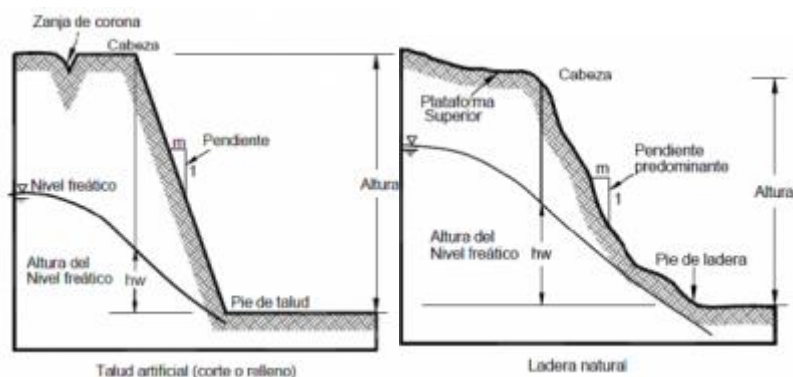


Figura 9. Nomenclatura de taludes y laderas (SUAREZ, 2013)

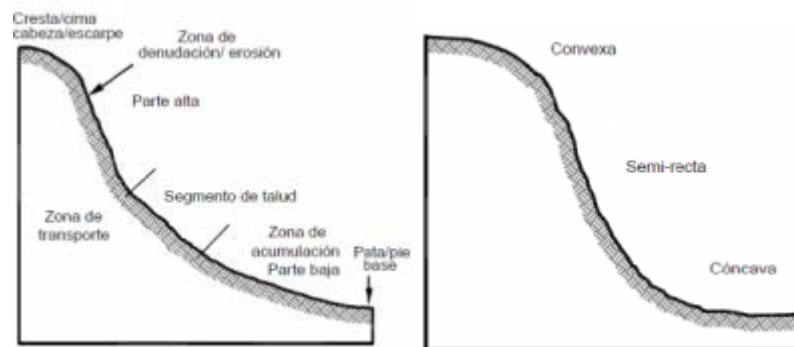


Figura 10. Partes generales de un talud o ladera (SUAREZ, 2013)

En un talud o ladera se definen los siguientes elementos constitutivos:

- Pie, pata o base, el pie corresponde al sitio de cambio brusco de la pendiente en la parte inferior del talud o ladera, la forma del pie de una ladera es generalmente cóncava.
- Cabeza, cresta, cima o escarpe, la cabeza se refiere al sitio de cambio brusco de la pendiente en la parte superior del talud o ladera, cuando la pendiente de este punto hacia abajo es semi- vertical o de alta pendiente, se le denomina escarpe. Los escarpes pueden coincidir con coronas de deslizamientos, la forma de la cabeza generalmente es convexa.
- Altura, es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales, pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza generalmente no son accidentes topográficos bien marcados.
- Altura de nivel freático, es la distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua (la presión en el agua es igual a la presión atmosférica), la altura del nivel freático se acostumbra a medirla debajo de la cabeza del talud.
- Pendiente, es la medida de la inclinación de la superficie del talud o ladera, puede medirse en grados, en porcentaje o en relación m:1, en la cual m es la distancia horizontal que

corresponde a una unidad de distancia vertical. Ejemplo: $45^\circ = 100\% = 1H:1V$. Los suelos o rocas más resistentes generalmente forman laderas de mayor pendiente y los materiales de baja resistencia o blandos, tienden a formar laderas de baja pendiente.

(SUAREZ, 2013)

5.6. Deslizamientos

Los Deslizamientos comprenden una de las problemáticas más importantes en las vías, estas son desencadenadas por la meteorización, erosión y hundimiento; debido a su importancia ya que al generarse puede ocasionar graves daños económicos y de comunicación. La meteorización física o mecánica es un proceso de fragmentación que incide particularmente en los deslizamientos, el cual consiste en que se abren las discontinuidades y se desintegra la roca, formándose nuevas discontinuidades por fracturación; y las partículas se parten, aumentando la relación de vacíos y la permeabilidad y disminuyendo la cohesión.

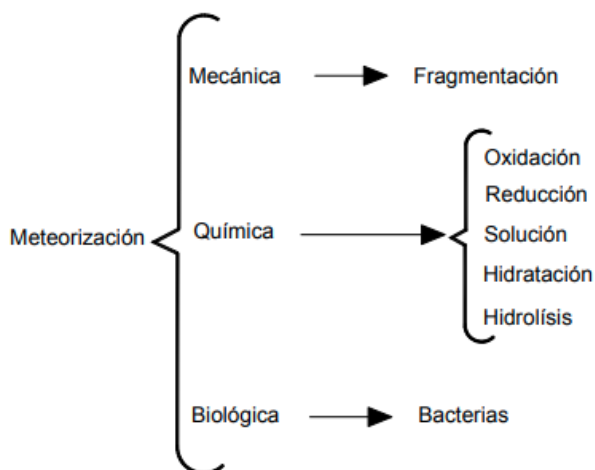


Figura 11. Procesos de Meteorización (Sancio y otros, 2000)

La descomposición puede ser ocasionada por procesos químicos o biológicos. Los procesos principales de meteorización química dependen de los procesos del agua y en algunos casos de la disponibilidad de agua para mantener la química requerida en el proceso. Con una disponibilidad alta de agua, las soluciones son más diluidas y pueden atacar más fácilmente los minerales. Cuando la disponibilidad de agua es muy baja, las soluciones se saturan con los productos de las reacciones. De igual manera, a menos que los productos químicos sean arrastrados por el agua, pueden generar una barrera a la meteorización adicional (Bell, 1992).

La meteorización generalmente avanza hacia abajo de la superficie y a través de las juntas y demás conductos de percolación, produciendo variaciones de intensidad, de meteorización y dejando bloques internos de material no descompuesto.

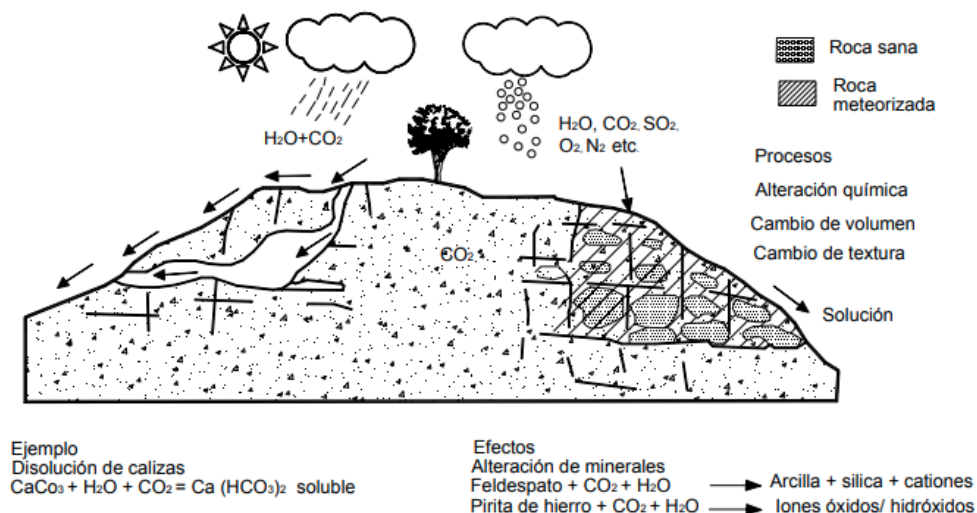


Figura 12. Representación esquemática del proceso de meteorización
 (Geological Society Engineering)

En ambientes tropicales dominados por temperaturas altas y cambiantes y por lluvias abundantes, la meteorización de los materiales es muy fuerte, caracterizándose por la

descomposición rápida de feldespatos y minerales ferromagnesianos, la concentración de óxidos de hierro y aluminio y la remoción de sílice y de las bases Na_2O , K_2O , CaO , y MgO (Gidigas, 1972).

La meteorización conduce al deterioro de la calidad de la masa de roca en relación con la resistencia y los módulos de deformación, la descomposición a su vez incrementa el potencial de ciertos modos de falla. En forma similar, las características hidrogeológicas son más complejas en el suelo residual que en la roca parental. Cuando el perfil del suelo contiene estructuras heredadas y materiales débiles, es mucho más frecuente que ocurran problemas de erosión interna. (SUAREZ, 2013)

En el diseño vial los taludes son parte fundamental de su estructura, por ende, los deslizamientos no representan una gran problemática, sin embargo, todo depende del tipo de suelo y las propiedades para la construcción. En cuanto a los taludes naturales, los problemas son mayores, debido a las fallas del terreno, la inclinación de su pendiente natural, el nivel freático y el tipo de clima recurrente en la zona (los deslizamientos de taludes son los hechos más costosos para un proyecto).

Tipos de deslizamientos:

- Caída: Inicia con el desprendimiento de tierra o rocas en una pendiente muy inclinada, el material desciende principalmente a través del aire por caída, rebotando.
- Volcamiento: Consiste en el giro hacia delante de una masa de tierra, causado por la acción de la gravedad o por presiones del agua.

- Deslizamiento: Comienza con el desprendimiento de una ladera, el cual ocurre principalmente cuando hay debilidad del terreno.
- Flujos de tierra: Es un movimiento lento de materiales blandos, frecuentemente arrastran parte de la capa vegetal.
- Flujos de lodo: Ocurren cuando la intensidad de las lluvias y su duración es larga, debilitando la tierra y la vegetación.
- Reptación: Es la deformación que sufre el suelo como consecuencia de movimientos causados por la gravedad. Se suele manifestar por la inclinación de los árboles, postes y la aparición de grietas.

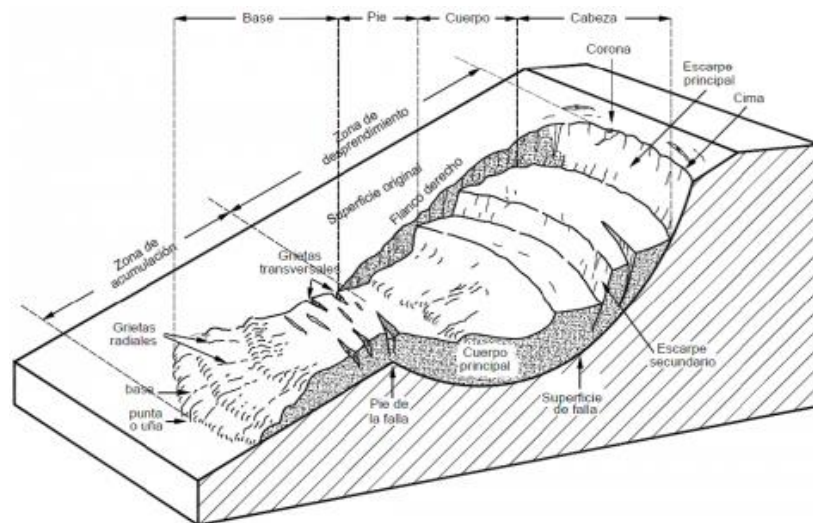


Figura 13. Partes de un deslizamiento (SUAREZ, 2013)

- Cabeza, parte superior de la masa de material que se mueve, la cabeza del deslizamiento no corresponde necesariamente a la cabeza del talud, arriba de la cabeza está la corona.

- Cima, el punto más alto de la cabeza, en el contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
- Corona, el material que se encuentra en el sitio, (prácticamente inalterado), adyacente a la parte más alta del escarpe principal, por encima de la cabeza.
- Escarpe principal, superficie muy inclinada a lo largo de la periferia posterior del área en movimiento, causado por el desplazamiento del material.
- Escarpe secundario, superficie muy inclinada producida por el desplazamiento diferencial dentro de la masa que se mueve, en un deslizamiento pueden formarse varios escarpes secundarios.
- Superficie de falla, área por debajo del movimiento y que delimita el volumen del material desplazado, el suelo por debajo de la superficie de la falla no se mueve, mientras que el que se encuentra por encima de esta, se desliza, en algunos movimientos no hay superficie de falla.
- Pie de la superficie de falla, la línea de interceptación (algunas veces tapada) entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.
- Base, el área cubierta por el material perturbado abajo del pie de la superficie de falla.
- Punta o uña, el punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima.
- Cuerpo principal del deslizamiento, el material desplazado que se encuentra por encima de la superficie de falla, se pueden presentar varios cuerpos en movimiento.
- Superficie original del terreno, la superficie que existía antes de que se presentara el movimiento.

- Costado o flanco, un lado (perfil lateral) del movimiento, se debe diferenciar el flanco derecho y el izquierdo.
- Derecha e izquierda, para describir un deslizamiento se recomienda utilizar la orientación geográfica (Norte, Sur, Este, Oeste); pero si se emplean las palabras derecha e izquierda, deben referirse al deslizamiento observado desde la corona hacia el pie.

Los deslizamientos pueden ser extremadamente lentos, teniendo una velocidad de $10E^{-7}$ mm/s o muy rápidas alcanzando una velocidad de $10E^4$ mm/s, según su actividad en el medio se pueden clasificar en Fósiles, Activos e Inactivos; los deslizamientos activos consisten en taludes en constante movimiento o se tienen registros en donde se señala que en las últimas temporadas se han ido moviendo, las superficies de falla, con fácil reconocimiento. Los deslizamientos inactivos son los cuales no se tienen registro de movimientos o pruebas que evidencien movimiento de estos taludes en las últimas temporadas, pueden ser reactivados por factores naturales como el clima, o los movimientos telúricos; por ultimo los deslizamientos fósiles son inmóviles y no pueden reactivarse al menos que la mano del hombre ayude en este proceso. (SUAREZ, 2013)

5.6.1. Superficie de falla.

Las superficies de falla o de ruptura son características que distinguen a los deslizamientos de otros movimientos de suelo como, por ejemplo, la erosión. Esta superficie se reconoce debido a que divide el talud entre los materiales de suelo que pueden deslizarse y el suelo que no se mueve al ocurrir el deslizamiento.

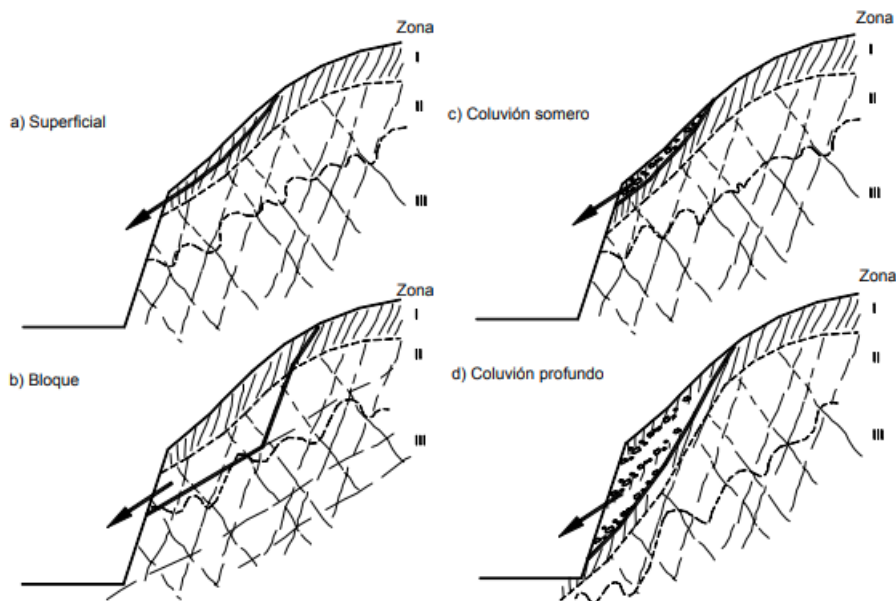


Figura 14. Tipos de deslizamiento en suelos residuales (Deere y Patton 1971).

Cuando una masa de talud es isotrópica, la forma de la superficie de falla posee una tendencia de superficie circular a logarítmica, sin embargo, en las rocas y en los suelos residuales, el talud puede tender a fallar a lo largo de las discontinuidades o superficies de debilidad, generándose superficies de falla no circulares. En las formaciones de suelos residuales generalmente existen superficies preferenciales por las cuales el talud tiende a fallar, se pueden indicar las siguientes, discontinuidades heredadas, zonas de cambio de permeabilidad, espejos de falla, los contactos suelo – roca, los suelos subsuperficiales o poco profundos, fallas, planos de estratificación e intrusiones, contactos coluvión - suelo residual. (SUAREZ, 2013)

5.6.2. **Causas.**

Según datos estadísticos se sabe que el 40 % de deslizamientos ocurren a causa del incremento de humedad, en el estudio de los deslizamientos ocurridos se hace mediante los métodos tradicionales de análisis de estabilidad tomando como ingreso que el suelo se encuentra saturado.

Actualmente, existen otros métodos como el de tomar un modelo de corte del talud con su estado de esfuerzos actual, sin modificar sus propiedades como tomarlo saturado o con la presión de poros actuando en compresión; este último modelo se hace debido a que existen estudios que demuestran que existen deslizamientos ocurriendo en las zonas no saturadas del talud. Adicionalmente existe una fuerte relación entre lo que dura una intensa precipitación de lluvia y la variación de la presión de poros en el suelo, el estudio de suelos no saturados aplicado en la agricultura es de gran ayuda y sus modelos son utilizados para analizar la responsabilidad de la hidrología en la estabilidad de taludes. (Duque, 2017)

5.6.3. **Tipos de Terreno.**

La mayor parte de los suelos naturales se componen por la mezcla de dos o más de estos elementos, y pueden contener por añadidura material orgánico parcial o completamente descompuesto. A las gravas y las arenas se les llama suelos de grano grueso, y a los limos y a las arcillas suelos de grano fino, la distinción radica en que puedan diferenciarse las partículas a simple vista; por ende, las partículas que tienen un tamaño mayor que aproximadamente 5 mm se clasifican como grava, sin embargo, si el diámetro excede de aproximadamente 200mm, se aplica

usualmente el nombre de boleto, pero si los granos son visibles a simple vista pero menores a 5mm el suelo se describe como arena, esta puede ser gruesa, media y fina. (Duque, 2017)

Ejecutando las pruebas pertinentes de clasificación y determinando las propiedades índices correspondientes, el ingeniero adquiere medios para describir con precisión un suelo dado sin usar descripciones verbales que están sujetas a mal interpretaciones, las propiedades del suelo en conjunto, dependen de la estructura y disposición de las partículas en la masa del suelo, aunque comúnmente se usan las propiedades de los granos para fines de identificación, el ingeniero debe saber que las propiedades del terreno en conjunto tienen una mayor influencia en el comportamiento desde el punto de vista técnico del suelo. (Duque, 2017)

En los suelos un material es permeable, cuando contiene huecos o intersticios continuos, todos los suelos y todas las rocas satisfacen esta condición habiendo grandes diferencias en el grado de permeabilidad de los diferentes materiales térreos, en general el coeficiente de permeabilidad se incrementa al aumentar el tamaño de los intersticios, que a su vez crece al aumentar el tamaño de los granos. El nivel que toma el agua en los pozos de observación hechos en los depósitos de suelos se conoce con el nombre de nivel del agua subterránea, superficie libre del agua, o bien nivel freático. (Duque, 2017)

Las características de esfuerzo-deformación de un suelo o de una roca, determinan la base que una estructura dada puede experimentar, los asentamientos de las estructuras construidas sobre mantos de arcilla blanda, que algunas veces están enterrados profundamente, debajo de materiales más resistentes y menos compresibles, pueden producirse lentamente y alcanzar grandes

magnitudes. La relación entre la presión vertical, el asentamiento y el tiempo, se investigan en el laboratorio por medio de una prueba de compresión confinada. (Duque, 2017)

Se determina según la topografía predominante en el tramo de estudio, es decir que a lo largo de una carretera se pueden presentar tramos homogéneos en diferentes tipos de terreno. (INVIAS, 2008).

El Terreno plano presenta pendientes longitudinales normalmente menores al 3%. Exigen un mínimo movimiento de tierras durante la construcción por lo que no presenta grandes dificultades ni en el trazado ni en su explanación, sus pendientes transversales al eje de la vía son menores de 5°. El terreno ondulado tiene pendientes transversales al eje de la vía entre seis y trece grados (6° - 13°), requiere moderado movimiento de tierras durante la construcción, lo que permite alineamientos más o menos rectos, sin mayores dificultades en el trazado y en la explanación. Sus pendientes longitudinales se encuentran entre tres y seis por ciento (3% - 6%). (INVIAS, 2008).

El terreno montañoso presenta pendientes transversales al eje de la vía entre trece y cuarenta grados (13°- 40°), generalmente requiere grandes movimientos de tierra durante la construcción, razón por la cual presenta dificultades en el trazado y en la explanación. Sus pendientes longitudinales predominantes se encuentran entre seis y ocho por ciento (6% - 8%). El Terreno escarpado tiene pendientes transversales al eje de la vía generalmente superiores a cuarenta grados (40°), exigen el máximo movimiento de tierras durante la construcción, lo 30 que acarrea grandes dificultades en el trazado y en la explanación, puesto que generalmente los alineamientos se encuentran definidos por divisorias de aguas. Generalmente sus pendientes longitudinales son superiores a ocho por ciento (8%). (INVIAS, 2008).

En puentes las construcciones deseables requieren evitar inconvenientes del terreno, como zonas inundables, zonas de protección ambiental como humedales, cuando se presenta densidad de servicios públicos en la parte baja, patrón densos de calles locales o colectoras, o cuando es antieconómico construirla deprimida (Marín & Rojas, 2015), su cálculo depende de la ingeniería estructural, aunque su diseño depende de los requerimientos del tránsito, el derecho de vía, la topografía, el suelo de fundación, el desarrollo urbanístico, disponibilidad de materiales y consideraciones económicas. Las pilas se ubican de manera tal que permitan espacios libres en la zona a nivel destinados a otras necesidades viales o urbanísticas. (INVIAS, 2008)

5.7. **Slide Software**

Slide es un software de análisis de Estabilidad de Taludes en 2D que utiliza métodos de equilibrio límite para el cálculo de la estabilidad, incluye análisis de agua subterránea por elementos finitos en estado estacionario, e integra capacidades de análisis de sensibilidad, probabilísticos y análisis retrospectivos. (ROCSCIENCE, 2020)

Su ámbito de aplicación en minería y obra civil es muy variado, permitiendo evaluar un gran número de problemáticas geotécnicas, tales como estabilidad de terraplenes, presas, taludes en excavaciones mineras o en edificaciones, efectos de cargas externas, sísmicas, eficiencia de elementos de refuerzo, entre otros; es un software potente y flexible desarrollado por Rocscience, empresa puntera a nivel mundial en modelización geotécnica. (ROCSCIENCE, 2020)

El programa Slide ha ido creciendo de manera continua al mismo ritmo que se expandía la capacidad de análisis geotécnico por ordenador en los últimos años, este continuo esfuerzo en investigación y actualización, y la solvencia que proporciona su trayectoria, lo convierten en un software de referencia. Prueba de ello es el hecho de ser uno de los programas más reconocidos y utilizados que existen en el mercado. (ROCSCIENCE, 2020)

A través de una interfaz muy efectiva el programa permite plantear análisis multi escenario, desarrollar modelos de geometrías complejas, desarrollar análisis de sensibilidad, análisis probabilísticos o plantear back-analysis o analizar problemas de desembalse rápido. Asimismo, permite resolver redes de filtración como un fin en sí mismo o para incorporar en el análisis de estabilidad las distribuciones de presiones de poro obtenidas como resultado. La interfaz de análisis de resultados es muy eficaz, habilita entre otras opciones la posibilidad de plantear optimizaciones permitiendo el desarrollo de diseños y análisis muy calibrados. (ROCSCIENCE, 2020)

Hoy en día existe una creciente variedad de software de modelización geotécnica a nivel general, y también en relación con la estabilidad de taludes, sin embargo, no todos los programas cuentan con la capacidad de cálculo y fiabilidad de Slide. Este programa destaca, entre otros programas del mercado, por una interfaz clara y sencilla, y por un manejo muy intuitivo de las diversas capacidades que ofrecen los menús de análisis. (ROCSCIENCE, 2020)

6. DISEÑO METODOLÓGICO

La metodología por implementar para el presente proyecto se apoyará en la recopilación y organización de la información otorgada por la Agencia Nacional de Infraestructura y la Concesión, posteriormente se procederá a realizar un análisis para poder diagnosticar las fallas y por último generar una propuesta de tratamiento.

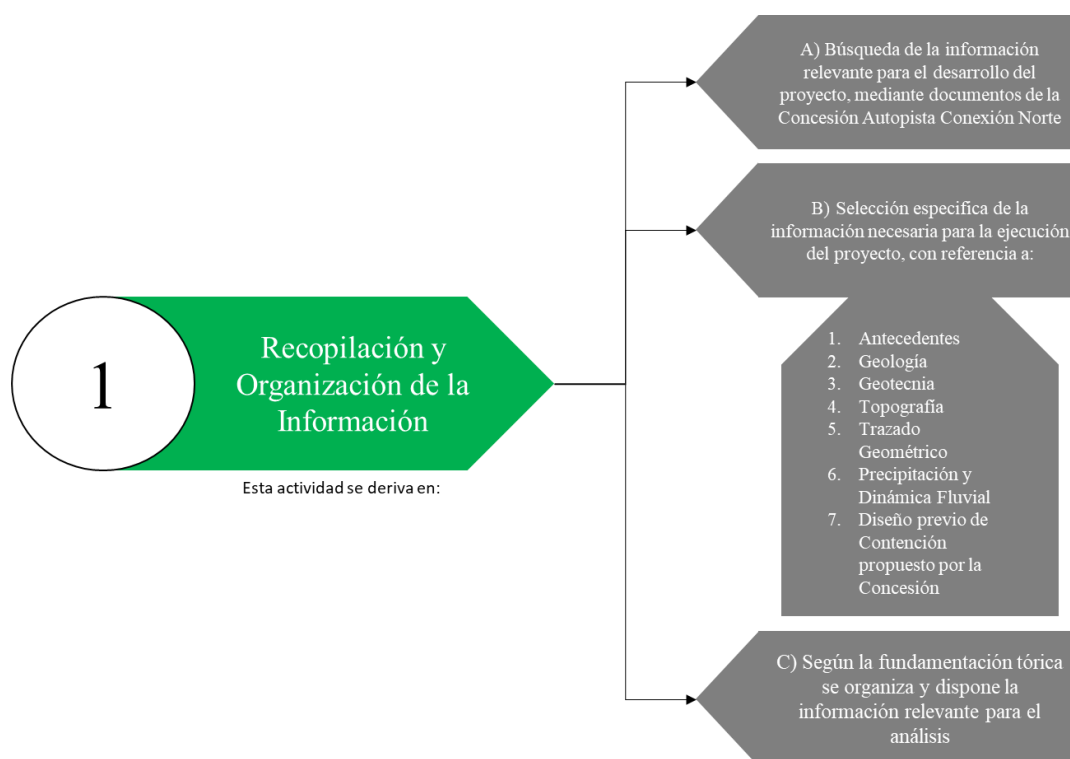


Figura 15. Metodología del Proyecto

Mediante este desarrollo, se realiza la recopilación y organización de toda la información contenida dentro del Proyecto Conexión Norte, contrato de Concesión No. 009 de 2014.

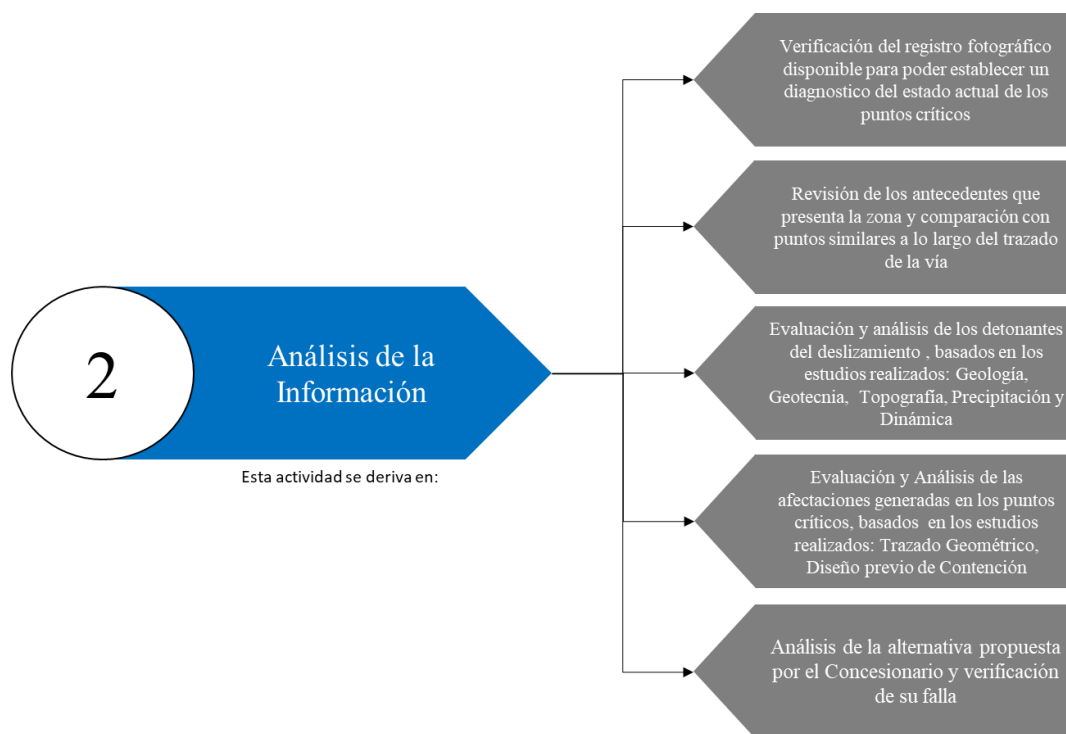


Figura 16. Metodología del Proyecto

Para el desarrollo del análisis del proyecto, se iniciará a partir de la información y documentación previa, con la cual se definirá y diagnosticará los puntos críticos, para poder estudiar y establecer los antecedentes en conjunto con los parámetros de Geología, Geotecnia, Topografía, Precipitación y Dinámica, Trazado Geométrico y Diseño previo,

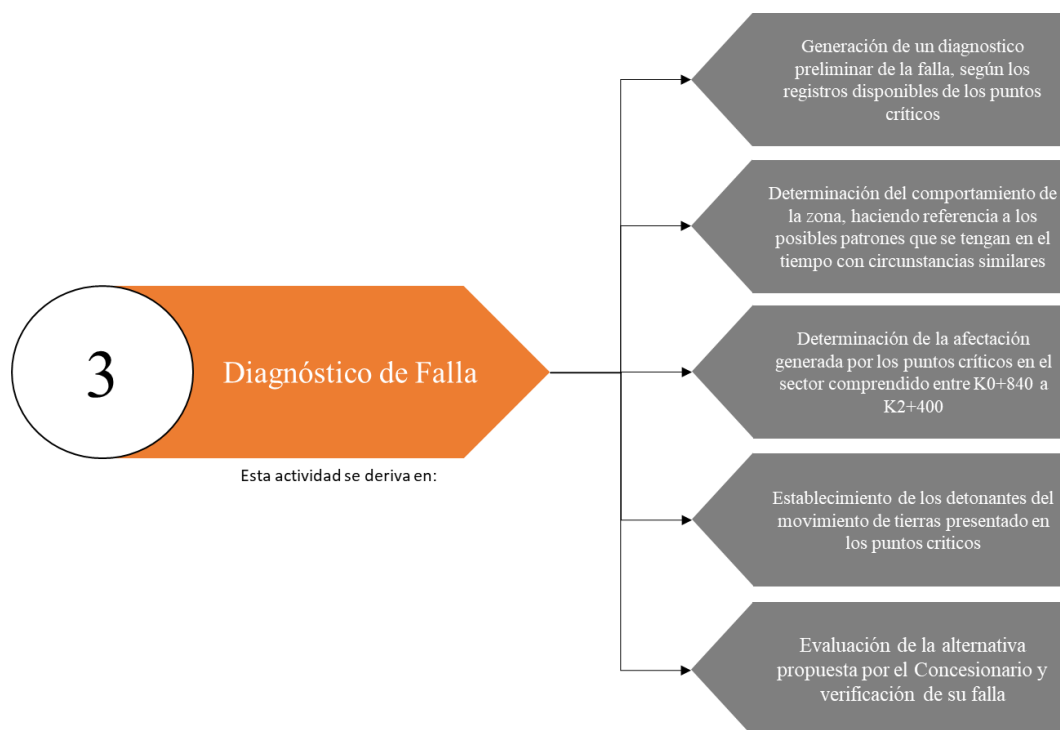


Figura 17. Metodología del Proyecto

Basándose en el Análisis de la información, se establecerá un Diagnóstico de la Falla en los puntos críticos, teniendo en cuenta los antecedentes y procedimientos anteriores por parte del Concesionario.



Figura 18. Metodología del Proyecto

Por último, en base a los antecedentes de los puntos críticos, análisis de la información y diagnóstico de falla, se genera una propuesta de diseño para dar solución a los Puntos Críticos localizados entre el K0+840 a K2+400 de la Unidad Funcional 2 Cauca – Zaragoza de Antioquia.

CAPÍTULO 3

7. ANÁLISIS Y RESULTADOS

7.1. Recopilación y Manejo de la Información

El Proyecto Conexión Norte comprende la construcción de una nueva vía en calzada sencilla entre los municipios de Remedios y Zaragoza, el Mejoramiento de la calzada actual del tramo Zaragoza-Caucasia y la Construcción de una nueva variante en calzada sencilla en el municipio de Cauca.

Las vías objeto del proyecto Autopista Conexión Norte, tienen una longitud total estimada de 145 kilómetros y su recorrido discurre íntegramente en el departamento de Antioquía, el Proyecto Autopista Conexión Norte une los municipios de Remedios, Segovia, Zaragoza y Cauca. El objetivo de esta concesión es conectar el sur occidente y centro occidente del país de forma directa con el Puerto de Cartagena, el norte del país y el nordeste de Antioquia con la Concesión Ruta del Sol a través de Puerto Berrío, proyectando que se convierta en uno de los corredores viales más importantes del país.

La documentación que conforma al proceso de Contratación Autopista Conexión Norte - Contrato de Concesión No. 009 de 2014, contiene los siguientes temas:

- Proyecto de Pliego de Condiciones y Pliego de Condiciones definitivo.

- Contrato 009 de 2014 Autopista Conexión Norte parte General y Especial, apéndices Técnicos, Financiero, Operativo, Indicadores, Especificaciones, Predial, Social, Ambiental, Obras, Redes, pólizas y Otrosí.
- Información pertinente a la fase de construcción del proyecto por parte de la Interventoría y el Concesionario.
- Estudios y Diseños propuestos por la Concesión encargada del Proyecto Concesionado.

Como el objetivo principal del presente proyecto y enfocando la problemática generada por los puntos críticos, la selección objetiva de información requiere específicamente todos los Estudios y Diseños proporcionados el Concesionario, para los cuales se presenta la siguiente documentación:

- *Estudios y Diseños Primera Calzada UF2 – Volumen de Tránsito, Diseño Geométrico, Fundaciones, Taludes.* Investigación de subsuelo, reconocimiento de campo, identificación de unidades geológicas, procesos geomorfológicos, tectónicas, actividad sísmica, revisión imágenes de satélite, levantamiento topográfico planimétrico, batimétrico, georreferenciación al sistema IGAC, Análisis y Evaluación de la geometría en planta, perfil y sección transversal.
- *Estudios y Diseños Primera Calzada UF2 – Modificación Diseño de Taludes K0+840 a K2+400.*
- *Volumen I – Estudio de Transporte, Versión 3:* Tres tomos con sus respectivos planos y cálculos.

- *Volumen IV – Estudio de Suelos para el diseño de fundaciones de puentes, obras de drenaje y otras estructuras de Contención, Versión 3:* Tres tomos con sus respectivos planos y cálculos.
- *Volumen V – Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes, Versión 4:* Tres tomos con sus respectivos planos y cálculos.
- *Proceso Constructivo de las Obras propuestas - Deslizamiento de taludes en el K2+300 de la Unidad Funcional 2.*
- *Proceso Constructivo de las Obras propuestas y Estado - Deslizamiento de taludes en el Taludes ubicados en los sectores K0+840, K1 +500, K1 +650, K1+865, K1 +970, K2+050, K2+150, K2+200, K2+350 y K2+400 de la Unidad Funcional 2.*
- *Observaciones y modificaciones al Volumen V - Estudio de Estabilidad y Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes, Versión 5:* Tres tomos con sus respectivos planos y cálculos.

Teniendo en cuenta el alcance del proyecto se tiene en cuenta principalmente la información presentada como Estudios y Diseños, los cuales aportan información esencial para la evaluación, ejecución y solución al problema planteado, adicionalmente se contempla el uso en paralelo del Apéndice Técnico del proyecto para tener un punto de referencia y obtener una descripción detallada de la propuesta de tratamiento para distintos eventos en el Proyecto.

Con la información adecuada para ser aplicada en el proyecto (ya seleccionada y filtrada), se procede a hacer una clasificación en las siguientes categorías:

- Apéndice Técnico.

La Unidad Funcional II – Zaragoza – Caucasia, del proyecto de Concesión 4G – Conexión Norte, comprende el mejoramiento de la vía existente de 89 km, de los que aproximadamente 5 km corresponden al sector en variante, que es una vía nueva que se va a construir en calzada sencilla (Variante de Caucasia), que conectará con el Grupo 4 Norte de las Concesiones de Cuarta Generación. El mejoramiento de la carretera actual tiene como fin adaptarla a la velocidad de diseño de 80 km/h y cumplir con lo estipulado en la Ley 105 de 1993. Este tramo cuenta con unas características geométricas aceptables debido a las características suaves del relieve.



Figura 20. Localización de los Puntos Críticos entre K0+840 a K2+400 Unidad Funcional 2 Caucasia – Zaragoza de Antioquia - Google Earth, 2020.

En la figura anterior, se representa la ubicación de los cuatro puntos críticos de la Unidad Funcional 2 entre el K0+840 al K2+400 comunicado Caucasia con Zaragoza, en la cual la sección vial ya se encuentra construida, pero en la que se siguen presentado fallas en la contención lateral.



Figura 21. Punto Crítico 1 entre K0+840 a K1+190 Unidad Funcional 2
Caucasia – Zaragoza de Antioquia - Google Earth, 2020.



Figura 22. Punto Crítico 1 entre K0+840 a K1+190 Unidad Funcional 2
Caucasia – Zaragoza de Antioquia (Perspectiva) - Google Earth, 2020.

En la Figura 21 y la Figura 22 se establece el área afectada y la sección en la cual se presentó el movimiento de masa del Punto Crítico, esto teniendo en cuenta la configuración del Diseño Geométrico de la vía.



Figura 23. Punto Crítico 2 entre K1+300 a K1+450 Unidad Funcional 2
Caucasia – Zaragoza de Antioquia - Google Earth, 2020.

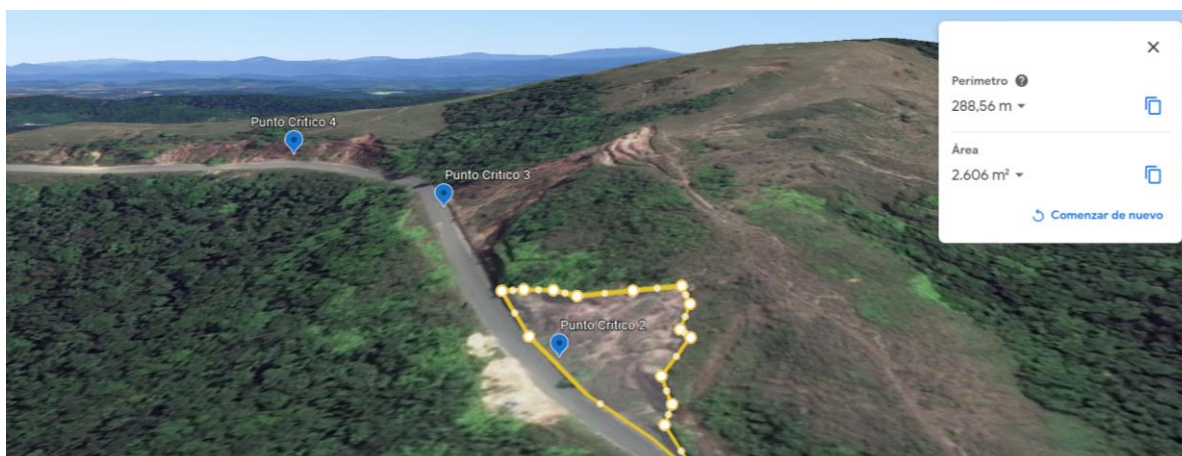


Figura 24. Punto Crítico 2 entre K1+300 a K1+450 Unidad Funcional 2
Caucasia – Zaragoza de Antioquia (Perspectiva) - Google Earth, 2020.

En la Figura 23 y la Figura 24 se establece el área afectada y la sección en la cual se presentó el movimiento de masa del Punto Crítico, esto teniendo en cuenta la configuración del Diseño Geométrico de la vía; se aclara que este punto ha presentado más de dos deslizamientos de material.

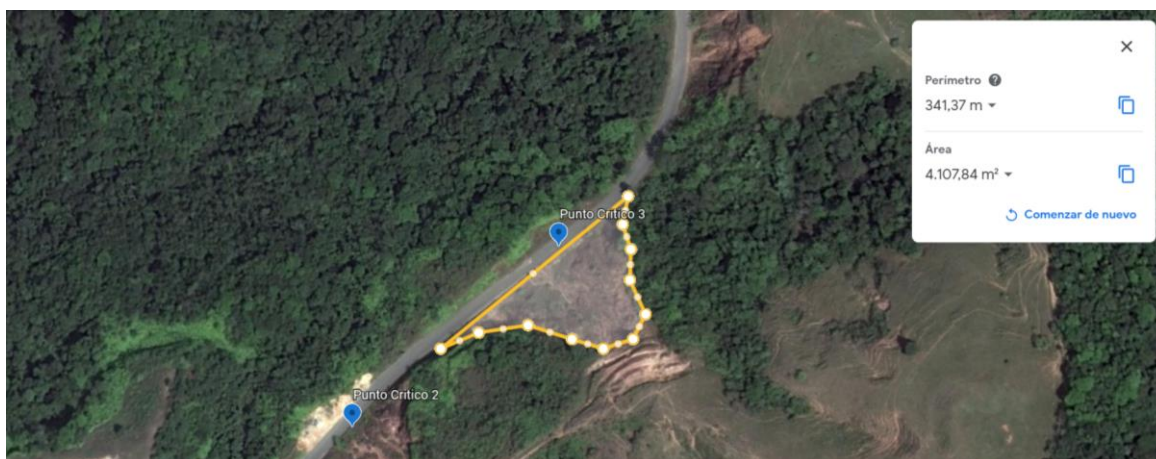


Figura 25. Punto Crítico 3 entre K1+510 a K1+700 Unidad Funcional 2
Caucasia – Zaragoza de Antioquia - Google Earth, 2020.

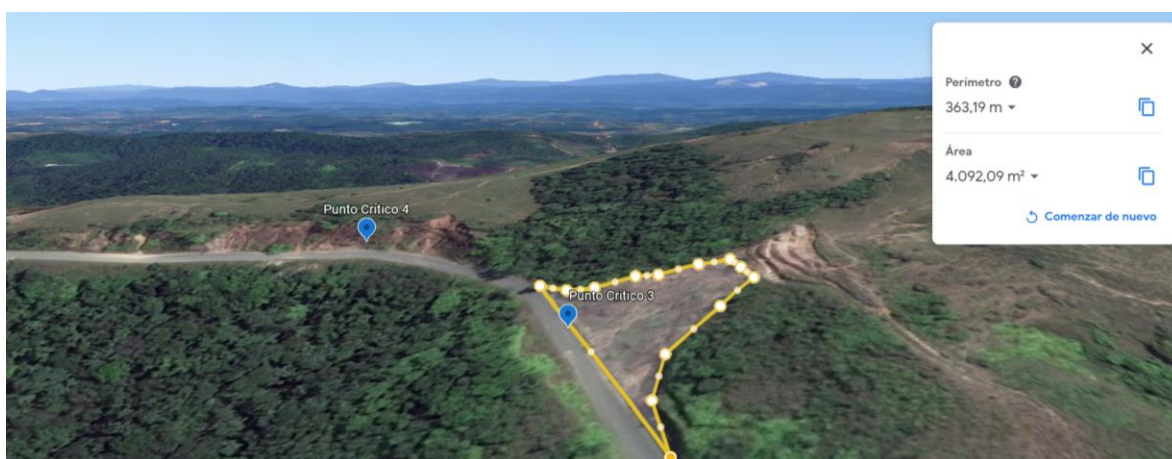


Figura 26. Punto Crítico 3 entre K1+510 a K1+700 Unidad Funcional 2
Caucasia – Zaragoza de Antioquia (Perspectiva) - Google Earth, 2020.

En la Figura 25 y la Figura 26 se establece el área afectada y la sección en la cual se presentó el movimiento de masa del Punto Crítico, esto teniendo en cuenta la configuración del Diseño Geométrico de la vía; se aclara que este punto ha presentado más de dos deslizamientos de material.



Figura 27. Punto Crítico 4 entre K1+790 a K2+400 Unidad Funcional 2
Caucasia – Zaragoza de Antioquia - Google Earth, 2020.



Figura 28. Punto Crítico 4 entre K1+790 a K2+400 Unidad Funcional 2
Caucasia – Zaragoza de Antioquia - Google Earth, 2020.

En la Figura 27 y la Figura 28 se establece el área afectada y la sección en la cual se presentó el movimiento de masas del Punto Crítico, esto teniendo en cuenta la configuración del Diseño Geométrico de la vía; dentro de los cuatro puntos este ha generado más controversia debido a su falta de consenso entre el método adecuado de contención lateral (se han presentado cuatro deslizamientos).

Con el fin de esquematizar y analizar los puntos presentados, a continuación, se relaciona el Registro Fotográfico anterior a la falla y posterior del tramo, todo esto tomado de Estudios de la Concesión, Interventoría, ANI (Agencia Nacional de Infraestructura) e imágenes satelitales Google Maps.

7.2.2. Registro Fotográfico.

7.2.2.1. Situación anterior al Evento.

Estado de los taludes, sitio de estudio – Año 2015 K1+145 – K1+650.

Severidad	Media
Longitud Afectada	130 m aproximadamente
Altura de Talud/Terraplén en Inclinación	12 m aproximadamente Taludes 1H:1V y 0.5H:1V
Litología/Suelo	Perfil de meteorización sobre esquistos. La resistencia al penetrómetro de bolsillo en el nivel de saprolito es de 4.25Kg/cm ²
Discontinuidades	Foliación perpendicular a diagonal al talud; dirección de buzamiento de la foliación (DB-f): 87/67°, 96/40°, se identifica diaclasamiento diagonal (266/64°), que incide en el fracturamiento del macizo rocoso.
Causas	El mecanismo de falla está asociado con la meteorización y el alto grado de fracturamiento de la roca. Los procesos de erosión concentrada arrastran suelo y detritos, acumulándolos como conos en la base del talud, sobre la vía. Falta de Obras de manejo de agua superficial en los taludes.
Nacimientos de Agua	Si – En algunos puntos de la foliación.
Obras de Recuperación Recomendadas	Descarga de materiales sueltos o colgados en los taludes. Terracear los taludes. Instalar Disipadores y Zanjas de Coronación.

Tabla 1. Sitio de estudio – Año 2015 K1+145 – K1+650. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.



Figura 29. Talud Derecho K1+145 – K1+650. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.



Figura 30. Talud Izquierdo K1+145 – K1+650. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

Estado de los taludes, sitio de estudio – Año 2015 K1+800 – K2+100.

Severidad	Alta
Longitud Afectada	200 m aproximadamente
Altura de Talud/Terraplén en Inclinación	30 m aproximadamente Taludes 0.5H:1V a Subvertical en escarpes
Litología/Suelo	Perfil de meteorización desarrollado sobre cuarcitas, el grado de meteorización es alto, así como el fracturamiento. La resistencia al penetrómetro de bolsillo en el nivel de saprolito de la cuarcita es de 1.25 a 1.5Kg/cm ²
Discontinuidades	Foliación (bandeamiento), desfavorable, diagonal al talud DB-f: 335/50°
Causas	Talud demasiado alto conformado por el perfil de meteorización profundo, con roca meteorizada y fracturada, en la base del corte. Los procesos de erosión concentrada originados por la escorrentía desde el escarpe del talud acumulan los materiales erosionados y trasladados sobre la vía. Falta de obras de manejo de agua superficial en los taludes
Nacimientos de Agua	Si – En algunos puntos del corte
Obras de Recuperación Recomendadas	Descarga de materiales sueltos o colgados en los taludes. Terracear los taludes. Instalar Pernos de Soporte, si se requiere. Instalar disipadores y Zanjas de Coronación.

Tabla 2. Sitio de estudio – Año 2015 K1+800 – K2+100. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.



Figura 31. Talud K1+800 al Inicio del Sector. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.



Figura 32. Talud K1+800 en el Centro del Sector. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.



Figura 33. Talud K1+800 Escarpes de la Parte Alta del Talud. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.



Figura 34. Talud K1+800 Deslizamiento detrás de los gaviones al Final del Tramo. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.



Figura 35. Talud K1+800 Cuarcitas Meteorizadas al Final del Tramo. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

Estado de los taludes, sitio de estudio – Año 2015 K2+150 – K2+380 Costado Derecho.

Severidad	Alta
Longitud Afectada	80 m aproximadamente
Altura de Talud/Terraplén en Inclinación	15 m aproximadamente Taludes 1H:1V a 0.5H:1V
Suelo/Roca	Rocas Metamórficas Fracturadas (Cuarcitas)
Discontinuidades	Foliación diagonal a desfavorable y dos familias de diaclasas claras.
Causas	Talud demasiado alto en macizo rocoso fracturado. Tendencia Cinemática a la Falla en Cuña, por interacción de planos de discontinuidad. Ausencia de Obras de Drenaje Superficial.
Obras de Recuperación Recomendadas	Descarga de materiales sueltos colgados. Cortes con terraceo. Instalar Zanjas de Coronación Instalar Disipadores en Drenajes Naturales en el Talud.

Tabla 3. Sitio de estudio – Año 2015 K2+150 – K2+380. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.



Figura 36. Talud K2+150. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.



Figura 37. Talud K2+150. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.



Figura 38. Talud K2+380. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

7.2.2.2. *Situación posterior al Evento.*

Estado de los taludes, sitio de estudio – Año 2018 K1+145 – K1+650.



Figura 39. Talud Derecho K1+145 – K1+650 Deslizamiento de Material. Google Earth 2020.



Figura 40. Talud Derecho K1+145 – K1+650 Desgaste del material en la Corona. Google Earth 2020.

Estado de los taludes, sitio de estudio – Año 2018 K1+800 – K2+100.



Figura 41. Talud K1+800 al Inicio del Sector. Socavación en el apoyo del talud. Google Earth 2020.



Figura 42. Talud K1+800 Perdida del material de Contención de revegetalización en la parte posterior a los gaviones al Final del Tramo. Google Earth 2020.



Figura 43. Talud K1+800 Perdida del material de Contención de revegetalización en la parte posterior a los gaviones al Final del Tramo. Google Earth 2020.

Estado de los taludes, sitio de estudio – Año 2018 K2+150 – K2+380 Costado Derecho.



Figura 44. Talud K2+150. Incremento en el movimiento del Talud hacia la Vía. Google Earth 2020.



Figura 45. Talud K2+150. Movimiento de masas del Talud. Google Earth 2020.



Figura 46. Talud K2+150. Sistema de Drenaje Deficiente. Google Earth 2020.

Según las imágenes, se puede establecer un recuento del Registro Fotográfico de las secciones críticas de estudio, en las que se realizó una comparación de su estado a través de los años, 2015 - anterior al evento, 2018 - posterior al evento, presentando fallas en los diseños de contención como:

- En el año 2015, se presentaban varias incidencias de futuras fallas y deslizamientos si no se realizaba un buen diseño de contención de taludes a lo largo de las secciones críticas.
- En el año 2018, a mitad de año se presentaron varios desprendimientos a lo largo del eje vial el más representativo y el cual ocasionó un cierre de la circulación es el Talud K2+150, afectando de manera directa la estructura del pavimento y desplazando lentamente la banca.
- En el año 2019 y 2020, se evidencia que, aunque se han implementado varios sistemas de contención como revegetalización, geotextiles y anclajes, aún no se atiende la emergencia, teniendo como consecuencia la gran inestabilidad que representa en la temporada de lluvias, generando un desgaste tanto en la estructura de pavimentos como en la banca de la vía.
- K1+450 – k1+650: Flujos de detritos por carcavamiento, desarrollado desde el escarpe del talud de corte.
- K1+800 – k2+100: Flujos de suelo y detritos y pequeños deslizamientos, desprendidos desde el escarpe del talud de corte y acumulados desde la parte media hasta la pata del talud. El mantenimiento retira la parte baja del depósito, lo cual acarrea el desconfinamiento del material acumulado.
- K2+150 – K2+380: Talud afectado por erosión concentrada, flujos de detritos y caídas de bloques de roca.

7.2.3. **Antecedentes de Comportamiento de la Zona de los Puntos Críticos.**

7.2.3.1. *Geología Regional.*

La conformación geológica del tramo Zaragoza – Caucasia muestra la transacción desde la estribación norte de la cordillera central hacia la llanura Caribe. El sector montañoso se restringe a los primeros kilómetros, prácticamente hasta el cauce del río Nechí. Esta zona montañosa está conformada por metamórficas paleozoicas, que constituyen el núcleo de la cordillera Central, el sector entre los ríos Nechí y Cauca, con rumbo general al noroeste, con relieve entre colinado y ondulado, es desarrollado sobre una antigua llanura aluvial, conformada por la incisión sobre sedimentitas neógenas.

La zona cercana al río Cauca está conformada por franjas de terrazas aluviales escalonadas a lo largo del cauce del río, las unidades litológicas que conforman el área comprenden rocas metamórficas de medio y alto grado de metamorfismo, pertenecientes al Grupo Cajamarca, rocas ígneas ácidas, de los batolitos Antioqueños y de Segovia, sedimentitas friables del Neógeno (Terciario Superior), terrazas y depósitos aluviales del Cuaternario; los depósitos de vertiente son escasos y puntuales.

Las litologías más antiguas han sido fracturadas por la actividad tectónica y por los movimientos de las fallas geológicas, dando lugar a macizos rocosos de diferentes calidades. Las principales fallas con las de Otú-Pericos y la de Monteloro, además de numerosas fallas menores y lineamientos satélites.

Las rocas en la región han sufrido diferentes grados de meteorización física y química hasta alcanzar la composición y textura de suelos residuales, donde ocurren la mayoría de los procesos morfodinámicos, las principales fuentes de materiales corresponden a depósitos aluviales de gravas, bolos y arenas, algunos de ellos con cambios antrópico, generado por la intensa actividad minera en la zona (Colas de dragado).

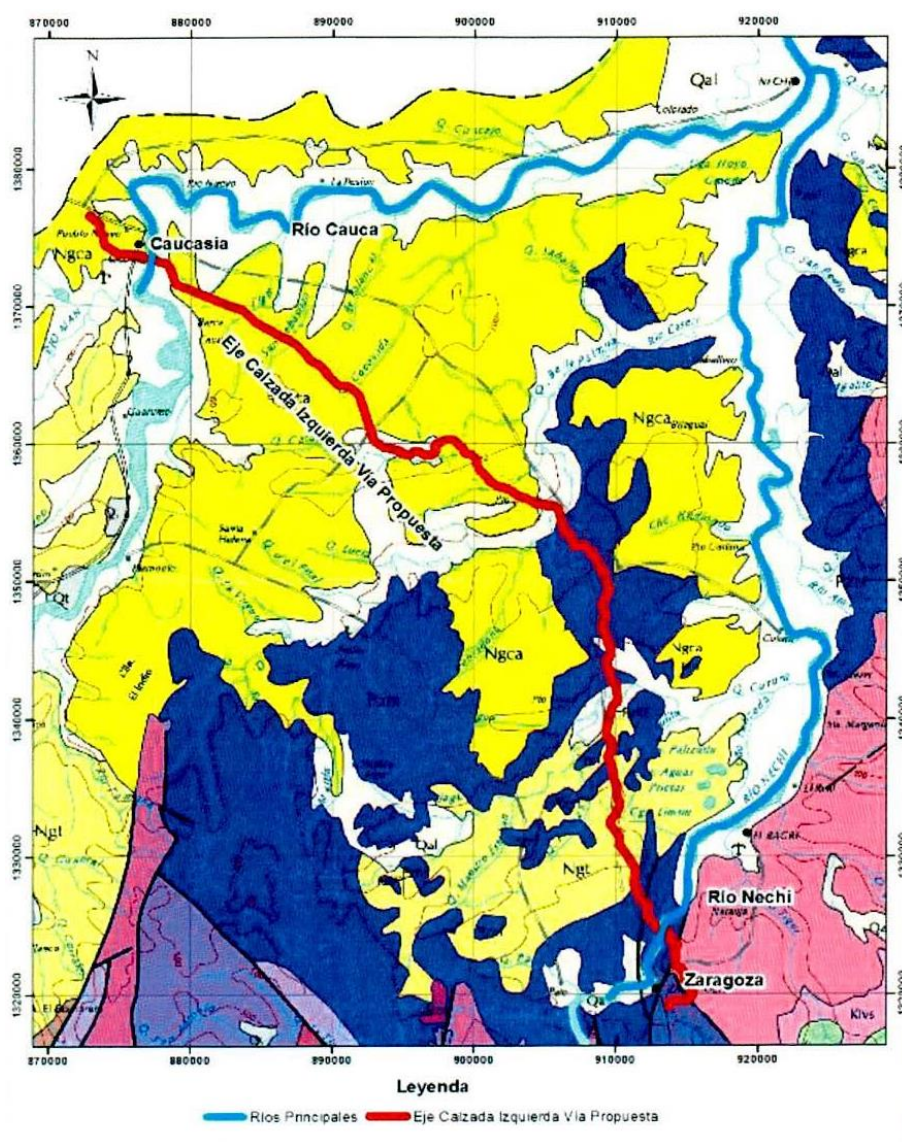


Figura 47. Geología Regional en el Tramo de la Vía Proyectada. Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

7.2.3.2. *Sísmico.*

El departamento de Antioquia está enmarcado dentro de dos grandes sistemas de fallas aproximadamente perpendiculares entre sí, el primer sistema está representado por las fallas de Palestina y Mulalo al Este y Cauca-Romeral al Oeste con dirección entre NNE-SSW y NE-SW, las cuales coinciden con las direcciones generales de los sistemas tectónicos de la cadena andina. El segundo sistema tiene dirección aproximada NW-SE a E-W y está constituido por las fallas Monteloro, Nare, Nus, Caldera, Balseadero y el Bizcocho y los alineamientos de los ríos San Bartolomé y Arma.

En la Unidad Funcional 2, en un contexto regional se presenta una tectónica controlada por el sistema de fallas de Palestina, aun cuando la falla Palestina en partículas no cruce el proyecto en ningún punto, dentro de este marco se dice que la estructura cortical está determinada por la interacción de un sistema complejo de grandes fallas, resultando en un sistema complejo, que produce fallamiento recurrente y plegamiento a lo largo de estructuras antiguas durante episodios múltiples de deformación. Las deformaciones en el Neógeno y el Cuaternario, están localizadas a lo largo de zonas de cizalladura antiguas que constituyen zonas de subducción, tales como las de Dolores, Palestina y Atrato; estas zonas atraviesan el noroccidente colombiano.

De manera particular, las fallas más importantes que inciden directamente en el proyecto son la falla Otú-Pericos y la falla Monteloro; a continuación, se da una breve descripción de cada una de ellas:

7.2.3.3. *Falla Palestina.*

La totalidad del sistema Palestina tiene un rumbo de N10° a 20°E y una longitud aproximada de 500 km, la falla Palestina se presenta como una depresión inicial marcada, formada por valles alargados y alineados, y boquerones profundos en las crestas de los cerros.

La falla afecta sustancialmente a rocas metamórficas y desplaza unidades litológicas por 20 km, en sentido lateral derecho, en la zona se localiza al oriente de San José de Nus, se halla adicionalmente evidencia de actividad cuaternaria, mientras que la tasa de desplazamiento para la zona de falla de Palestina como un todo es superior a 0.2 mm/año.

7.2.3.4. *Zona de Falla Otú-Pericos.*

En la zona de la Unidad Funcional 2 el trazado de esta falla afecta tanto a rocas metamórficas como las del batolito de Segovia, tiene una gran expresión morfológica, donde el bloque oriental se destaca más, las rocas de los respaldos se encuentran notablemente afectadas, bien de manera dúctil o frágil. La zona de falla dúctil se caracteriza por el desarrollo de bandas discretas de milonitas, y pliegues de arrastre, los cuales presentan una cinemática con una componente dominante lateral y una componente inversa subordinada.

A la deformación dúctil se ha sobrepuesto una deformación frágil, manifestada por abundantes bandas de deformación de cuarzo y la presencia de cataclasitas y brechas de falla; en estas últimas se observan discontinuamente a lo largo del cañón del río Pocuné y sus tributarios.

Estas zonas de falla frágil a escala de afloramiento y mapas son interpretadas como estructuras de segundo orden, asociados a la actividad de la falla.

7.2.3.5. *Falla Monteloro.*

Esta falla tiene dirección N 70°W y marca el contacto con las rocas granodioríticas del batolito Antioqueño, en campo presenta un claro alineamiento de varios deslizamientos y/o escarpes asociados en la misma dirección y un cambio fuerte de la pendiente de la vertiente Norte del río Nus.

7.2.3.6. *Geología Local.*

Las Unidades aflorantes en el corredor son, en orden de aparición en la vía, cuarcitas y esquistos del Paleozoico (Grupo Cajamarca), Formación Tarazá (Ngt), Formación Caucasia (Ngca), terrazas aluviales (Qt1 y Qt2) y depósitos aluviales.

7.2.4. *Precipitación y Temperatura Promedio.*

En Zaragoza, los veranos son cortos y muy caliente; los inviernos son largos, caliente y mojados y está opresivo y nublado durante todo el año, durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 24 °C a 32 °C y rara vez baja a menos de 23 °C o sube a más de 36 °C.

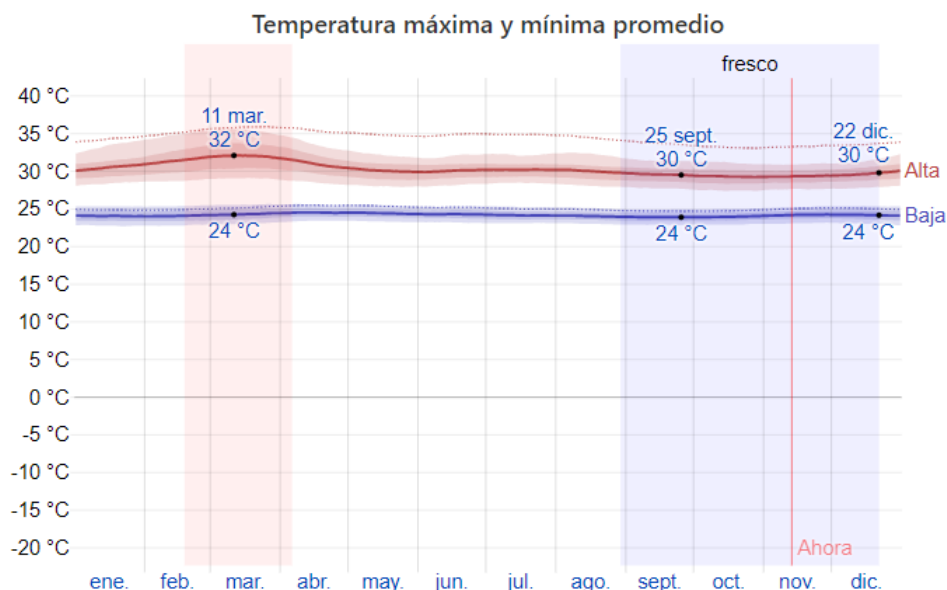


Figura 48. La temperatura máxima y mínima promedio diaria Volumen V
Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

Un día húmedo es un día con por lo menos 1 milímetro de líquido o precipitación equivalente a líquido, la probabilidad de días mojados en Zaragoza varía muy considerablemente durante el año. La temporada más húmeda dura 8,2 meses, de 29 de marzo a 4 de diciembre, con una probabilidad de más del 46 % de que cierto día será un día húmedo, la probabilidad máxima de un día mojado es del 74 % el 13 de mayo.

La temporada más seca dura 3,8 meses, del 4 de diciembre al 29 de marzo, la probabilidad mínima de un día húmedo es del 19 % el 21 de enero. Entre estos días, distinguimos entre los que tienen solo lluvia, solamente nieve o una combinación de las dos, en base a esta categorización, el tipo más común de precipitación durante el año es solo lluvia, con una probabilidad máxima del 74 % el 13 de mayo.

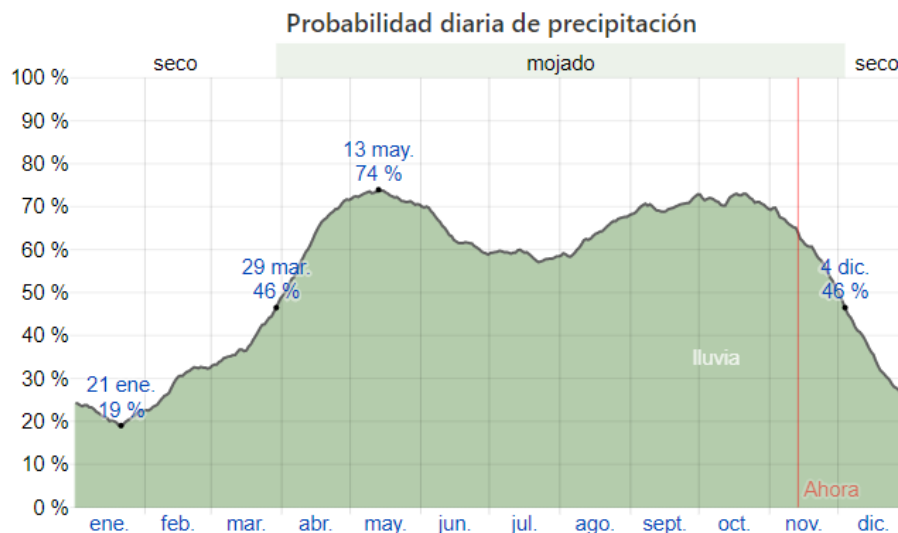


Figura 49. Porcentaje de días en los que se observan diferentes tipos de precipitación.
Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

Para mostrar la variación durante un mes y no solamente los totales mensuales, mostramos la precipitación de lluvia acumulada durante un período móvil de 31 días centrado alrededor de cada día del año; Zaragoza tiene una variación extremada de lluvia mensual por estación. Lluvia durante el año en Zaragoza, la mayoría de la lluvia cae durante los 31 días centrados alrededor del 12 de mayo, con una acumulación total promedio de 216 milímetros.

La fecha aproximada con la menor cantidad de lluvia es el 13 de enero, con una acumulación total promedio de 38 milímetros.

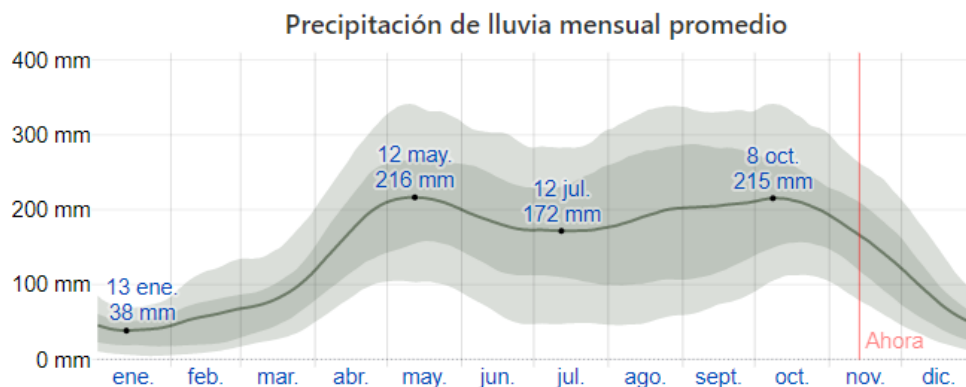


Figura 50. La lluvia promedio (línea sólida) acumulada en un periodo móvil de 31 días centrado en el día en cuestión Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

7.2.5. Topografía.

A lo largo de la vía se identificaron varios puntos críticos por problemas de estabilidad de la ladera superior derecha o por fallas en la banca de la vía, en las cuales la sección es desplazada y ocasiona desprendimientos de material a lo largo del eje; K1+450 - K1+650, K1+800 – K2+100, K2+150 – K2+380.

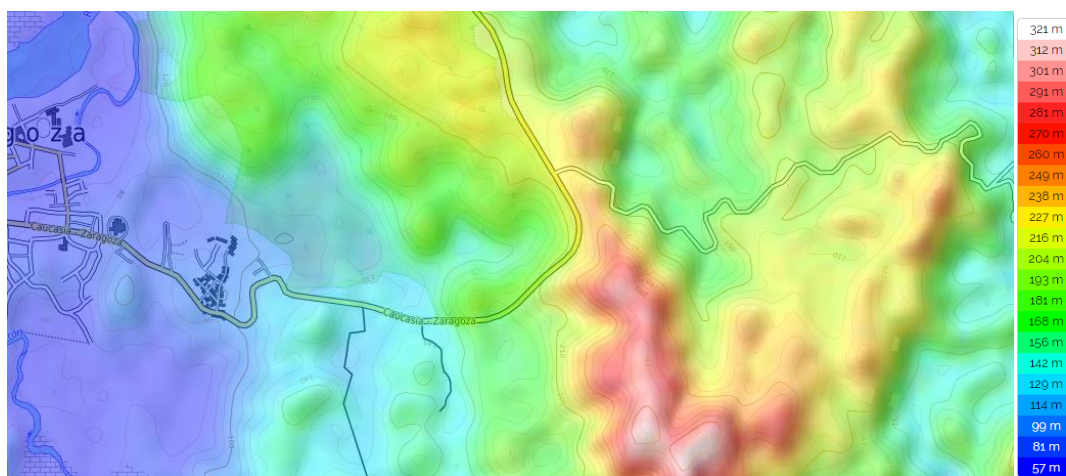


Figura 51. Plano Topográfico sitio crítico – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

7.2.6. Trazado Geométrico de la vía.

En la Unidad Funcional 2 del Proyecto Concesionado Conexión Norte que comunica los municipios de Remedios, Segovia, Zaragoza y Caucasia, la sección comprendida entre el entre K0+840 a K2+400 presenta el siguiente trazado Geométrico y disposición de sección de vía según las curvas de nivel:



Figura 52. Plano Topográfico Sección crítica – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.



Figura 53. Diseño Geométrico Sección crítica 1 – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.



Figura 54. Diseño Geométrico Sección crítica 2 – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

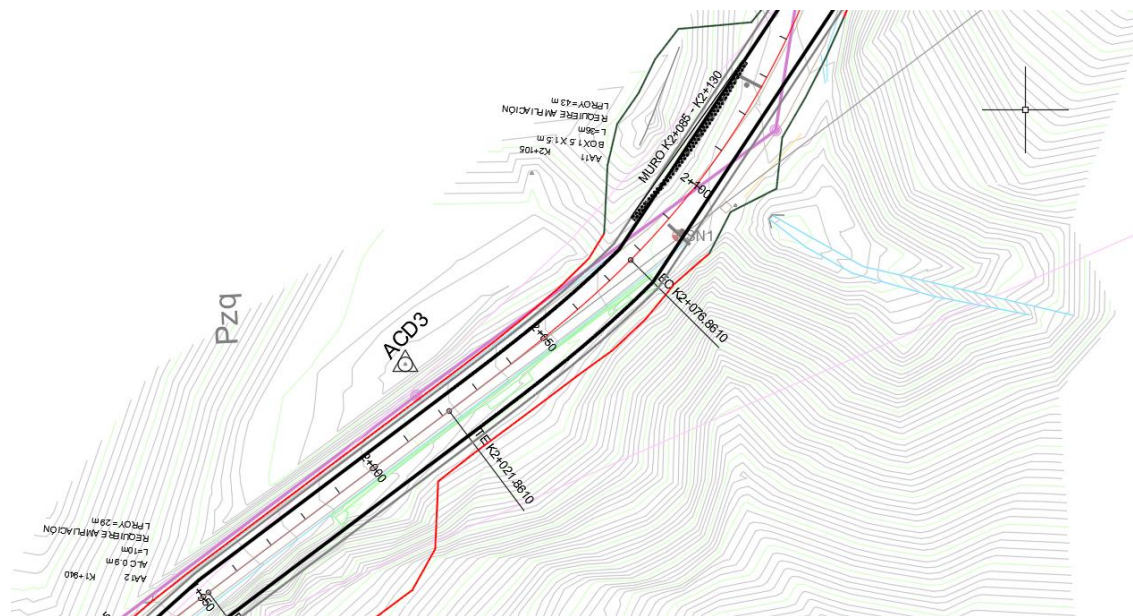


Figura 55. Diseño Geométrico Sección crítica 3 – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

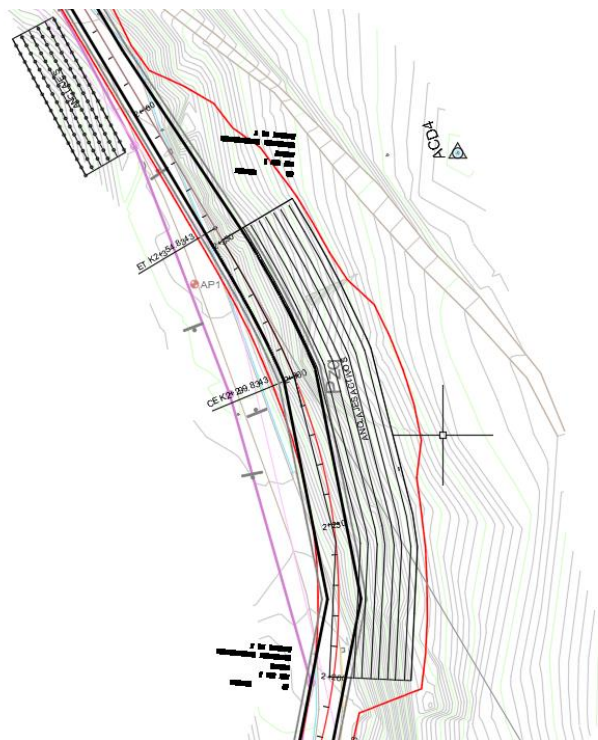


Figura 56. Diseño Geométrico Sección crítica 4 – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

7.2.7. Estructura de Pavimento.

En la Unidad Funcional 2 del Proyecto Concesionado Conexión Norte que comunica los municipios Zaragoza y Caucasia fue pavimentada en el año 2013 por medio de las alcaldías correspondientes de la zona, mediante una configuración de estructura de Pavimento flexible, sobre una capa de Base Granular y Subbase; para el análisis de Tránsito se emplearon las series históricas de las estaciones del INVIAS proporcionadas para el desarrollo del proyecto 4G (adicionalmente se realizaron varias proyecciones para la futura Vía de la Prosperidad), en particular la estación de Caucasia que cuenta con un buen tiempo de registro (aproximadamente 15 años).

7.3. Detonantes de Falla

7.3.1. Identificación de los Movimientos en masa para el Sitio crítico.

Teniendo en cuenta el Registro Fotográfico para este evento en cuestión y basándonos en el sistema de Cruden – Varnes (1996), se determina la posible clasificación del movimiento de masas presentado para el sitio crítico.

Tipo de movimiento	Tipo de Material		
	Roca	Suelo	
		De grano fino	De grano grueso
Caidas	Caida de rocas	Caida de detritos	Caida de suelos
Basculamientos	Basculamiento de rocas	Basculamiento de detritos	Basculamiento de suelos
Deslizamientos	Rotacionales	Deslizamiento rotación de rocas	Deslizamiento rotación de suelos
	Traslacionales	Deslizamiento traslacional de rocas	Deslizamiento traslacional de suelos
Separaciones laterales	Separación lateral en roca	Separación lateral en detritos	Separación lateral en suelos
Flujos	Flujo de rocas	Flujo de detritos	Flujo de suelos
Complejos	Combinación de dos o más tipos		

FUENTE: CRUDEN & VARNES (REPORT 247 TRB, 1996)

Tabla 4. Clasificación de Movimientos en Masa – Cruden y Varnes 1996.

Con base en las imágenes de registro de los puntos crítico, la forma de su falla, el tipo de material y la forma de su desplazamiento,

- *Punto Crítico (K1+145 – K1+650)*: El mecanismo de falla está asociado con la meteorización y el alto grado de fracturamiento de la roca, los procesos de erosión concentrada arrastran suelo y detritos, acumulándolos como conos en la base del talud, sobre la vía. Falta de Obras de manejo de agua superficial en los taludes.

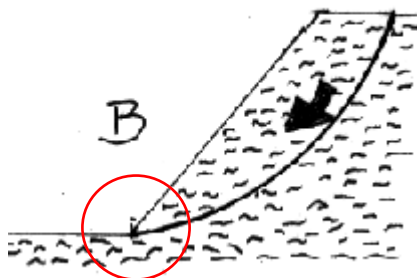


Figura 57. Falla Rotacional. Movimientos de Masas, (Duque, 2017).

- *Punto Crítico (K1+800 – K2+100)*: Talud demasiado alto conformado por el perfil de meteorización profundo, con roca meteorizada y fracturada, en la base del corte, los procesos de erosión concentrada originados por la escorrentía desde el escarpe del talud acumulan los materiales erosionados y trasladados sobre la vía. Falta de obras de manejo de agua superficial en los taludes.

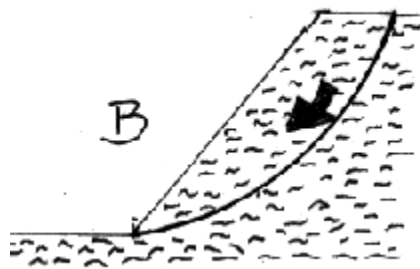


Figura 58. Falla Rotacional. Movimientos de Masas, (Duque, 2017).

- *Punto Crítico (K2+150 – K2+380)*: Talud demasiado alto en macizo rocoso fracturado, Se previó en los diseños una tendencia cinemática a la Falla en Cuña, sin embargo, el buzamiento del macizo rocoso no indica este mecanismo de falla, por el contrario la ausencia de Obras de Drenaje han generado una sobrepresión y meteorización a lo largo de todo el macizo, ocasionando pequeños deslizamientos de material al costado de la vía.

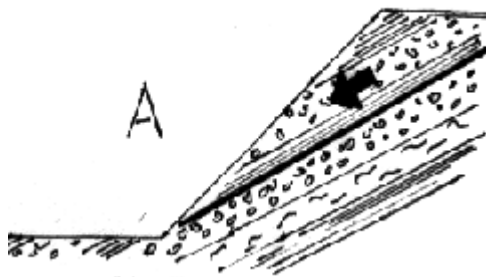


Figura 59. Falla Traslacional. Movimientos de Masas, (Duque, 2017).

7.3.2. Tipo de Suelo y Geomorfología.

Según el Estudio Geológico de los Puntos Críticos, se establece que la exploración del subsuelo reportó en las perforaciones número 5 y 6 (perforaciones características de toda la Sección Crítica) lo siguiente:

Tabla 7 Perfil MURO – K1+325 Perforación 5

Profundidad (m)	DESCRIPCIÓN	N (golpes/pie)
0,0 – 0,40	Arena limosa gris	-
0,40 – 1,75	Conglomerado arenoso con cuarzo café	50 a 59
1,75 – 5,30	Limo con gravas habano	Rechazo
5,30 – 6,40	Arcilla limosa café	32
6,40 – 20,0	Roca meteorizada cuarzosa	-

El nivel freático se encontró a 1.50 m de profundidad.

Tabla 5. Perforación 5 – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

Tabla 8 Perfil MURO – K2+16 Perforación 6

Profundidad (m)	DESCRIPCIÓN	N (golpes/pie)
0,00 – 0,25	Capa vegetal	-
0,25 – 1,70	Limo arcilloso rojizo	19
1,70 – 3,60	Gravas	13 a Rechazo
3,60 – 13,00	Roca meteorizada	-

No se reporta nivel freático.

Tabla 6. Perforación 6 – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

Teniendo en cuenta los resultados del perfil del terreno de ambas perforaciones, la presencia de limos y arcillas se encuentra en la parte superficial dentro del rango de los 0.3m a 5m, posteriormente se presenta una capa rocosa meteorizada desde los 6 m. Adicionalmente de realizo un análisis del RQD de la roca en una de estas secciones para poder determinar el índice de calidad de la Roca.

Los estudios de perforación realizados en el primer Diseño por parte del Concesionario no previeron un mejor procedimiento al realizar la toma de muestreo, ya que por medio de sondeos el macizo sufre fracturamiento y modifica el verdadero resultado del RQD; adicionalmente para conocer el perfil del terreno una toma de núcleos de poca profundidad en el talud generaría un resultado mucho mas preciso y viable.

Tabla 24 Valores de RQD del basamento rocoso Muro K1+325

Sondeo	Profundidad	Tipo de Roca	RQD (%)
5	9,85 – 11,35	Roca meteorizada	10,0
5	17,50 – 18,50	Roca meteorizada	26,7

Tabla 7. Sondeo 5 – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

7.3.3. Factores relacionados con la escala temporal.

Los eventos de Movimientos de

sucedan por la influencia de varios factores que actúan de simultáneamente sobre el sector de afectación, para la sección crítica en evaluación se establece que:

- *Factor Condicionante:* en el cual se infiere la efectividad que tiene cada uno de los factores dinámicos como la Socavación, Meteorización y Lluvia; se dispone de manera relevante la condición litológica del terreno y la estructural del Macizo rocoso.
- *Factor preparatorio:* depende principalmente de la predisposición que tiene una ladera a generar movimiento, por medio de Meteorización, Cambio de Temperatura abrupto y Acciones humanas; haciendo referencia en este proyecto a la intervención antrópica y la variación del nivel freático del terreno, por medio de la disposición de la vía.
- *Factor detonante:* representado por un carácter activo y determina el inicio del movimiento, para el caso del proyecto tanto la Socavación como el Agua son las principales razones.
- *Factor sustentador:* Se representa con una sección inestable, con una duración, velocidad de movimiento y forma de sección para este Proyecto.

7.3.4. Factores relacionados con su participación.

Relacionando los Factores de la escala temporal entre ellos los Desencadenantes o Detonantes, se establece a continuación los factores que contribuyen directamente sobre el inicio y desarrollo del movimiento de masa en cuestión:

7.3.4.1. Contribuyentes Internos.

Causas Geológicas:

Las Características de los materiales de los cuales está compuesta la ladera (entre ellos la Estructura, Composición Mineralógica y Litología), representando un factor de resistencia; para este caso de las Gravas y la Roca meteorizada Cuarzosa.

El Grado de meteorización, comprende los procesos físicos, químicos y biológicos, que establecen la desintegración y formación de suelos; para el proyecto se evidencia una exposición del sitio crítico a la intemperie.

Taludes y laderas:

Con la Geometría y Topografía de cada una de las secciones críticas del proyecto, se relacionan la altura, pendiente, curvatura, largo y ancho (tanto de taludes, como de laderas), con sus respectivos esfuerzos totales; para este proyecto los taludes de cada uno de los puntos presentan una pendiente bastante pronunciada, los cuales inicialmente se encontraba protegida por una capa de vegetación, pero posterior a su intervención y erosión fue disminuyendo.

Antrópicos:

Uno de ellos es la generación de taludes artificiales con excavaciones que modifican el perfil base, con sobrecargas que afectan los esfuerzos actuantes antecedentes y generan un nuevo comportamiento en su capacidad portante; los cambios de uso en el suelo son bastante comunes en proyectos a gran escala como las vías, que cumplen la función de comunicar una región sin

embargo, ese cambio debe estar también influenciado por el tipo de material y sus propiedades no solo por el diseño que se llevará a cabo.

7.3.4.2. Contribuyentes externos.

Hidro climatológicos:

Uno de los factores más incidentes es la Lluvia, ya que principalmente actúa como el factor detonante de los movimientos en masa, bajo un concepto crítico de precipitación, enfocándolo en el proyecto, se indica la fuerte temporada de lluvias entre el mes de mayo y octubre.

Sismológicos:

Los eventos sísmicos influyen sobre la estabilidad de los taludes, sin embargo, aunque directamente no se ha generado antecedentes por este evento, la zona establece un historial activo sísmicamente que puede presentar en un futuro un suceso y por ende los diseños deben contemplar cargas sísmicas.

Antrópicos:

Una de ellas es la modificación de las condiciones naturales del drenaje superficial del terreno, ya que se genera una alteración y eliminación de escorrentías originales del terreno, por medio de construcción de cunetas, zanjas, represas, entre otras; adicionalmente la modificación del drenaje subsuperficial por cortes causa cambios en las diferentes líneas de flujo, concentrando posibles filtraciones y sobrepresiones. Por último, todo tipo de vibración generado por los procesos constructivos contribuye a la modificación del terreno.

7.4. Análisis de Falla

Para el estudio Geotécnico de la sección Crítica, se evidencia la verificación de los posibles mecanismos de falla que se pueden presentar a lo largo del sector, mediante análisis estereográfico se puede determinar el corte adecuado para un talud, con la finalidad de generar futuras obras de mitigación, por ende, se genera una relación para cada una de las secciones:

- *Punto Crítico (K1+145 – K1+650)*: Sección representativa aproximada de 130m de longitud, en los que se recomienda el uso de Taludes 1.0V:1.0H, en secciones con longitudes menores puede aplicarse 1V:0.5H.
- *Punto Crítico (K1+800 – K2+100)*: Sección representativa aproximada de 30m de longitud, en los que se recomienda el uso de Taludes 1.0V:0.5H.
- *Punto Crítico (K2+150 – K2+380)*: Sección representativa aproximada de 15m de longitud, en los que se recomienda el uso de Taludes 1.0V:1.0H y 1V:0.5H, sin embargo, al ser el Punto Crítico con más incidencia se recomienda el uso adecuado del Factor de Seguridad.

7.5. Factor de Seguridad

El análisis presentado en este proyecto se realizó teniendo en cuenta los límites mínimos de Factor de Seguridad dispuestos por la norma NSR-10 Tabla H.6.9.-1 Factores de Seguridad Indirectos mínimos (Cuadro No. 25), Título H.

Tabla H.2.4-1
Factores de Seguridad Básicos Mínimos Directos

Condición	F _{SBM}		F _{SBUM}	
	Diseño	Construcción	Diseño	Construcción
Carga Muerta + Carga Viva Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	1.25	1.10	1.40	1.15
Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Seudo estático	1.10	1.00 (*)	No se permite	No se permite
Taludes – Condición Estática y Agua Subterránea Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Taludes – Condición Seudo-estática con Agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de Diseño	1.05	1.00 (*)	No se permite	No se permite

(*) Nota: Los parámetros sísmicos seudo estáticos de Construcción serán el 50% de los de Diseño

Tabla 8. Factores de Seguridad Básicos Mínimos Directos – NSR – Título H,
 Tabla H.6.9-1, 2020

7.6. Propuesta hecha por el Concesionario

Con el fin de determinar las obras requeridas en los Puntos Críticos a desarrollar, se tiene en cuenta la magnitud de los límites aceptables para los Factores de seguridad (Según la NSR-10) tanto en condición estática como dinámica. Por lo cual el Concesionario realizó las siguientes modelaciones en el programa SLIDE V6.0.

K1+450 – K1+650

El Primer Diseño realizado por el Concesionario entre el K1+450 – K1+650 se enfocó en realizar ciertos cortes en terraceo en la margen derecha de la vía, sin embargo, no se tuvo en cuenta un sistema de drenaje y la disposición del material, lo que desencadenó una intrusión en la roca que conforma el talud, generando una sobrepresión y meteorización, que con el tiempo generaron un arrastre del material, siendo depositado periódicamente al costado de la vía.

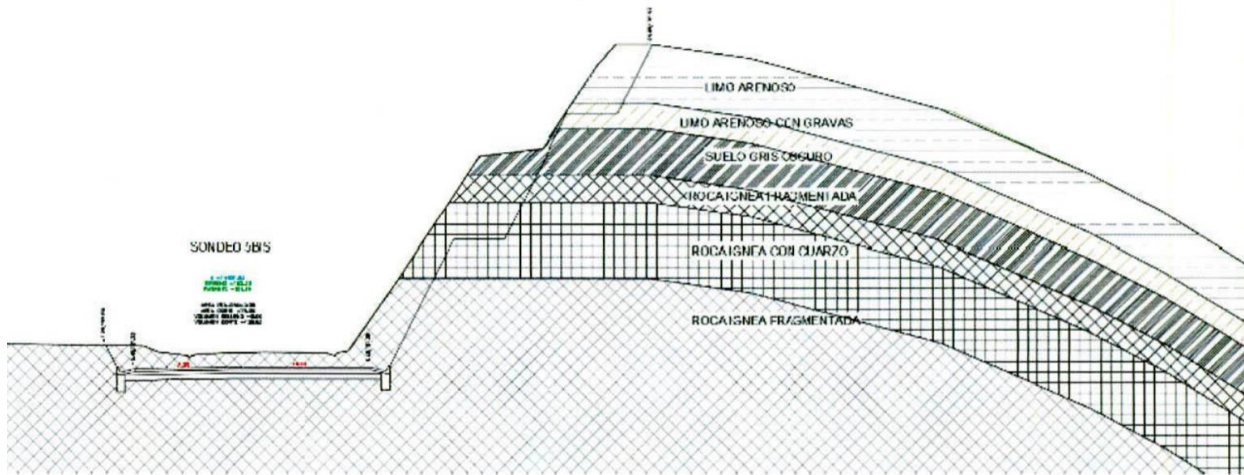


Figura 60. Perfil Estratigráfico – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

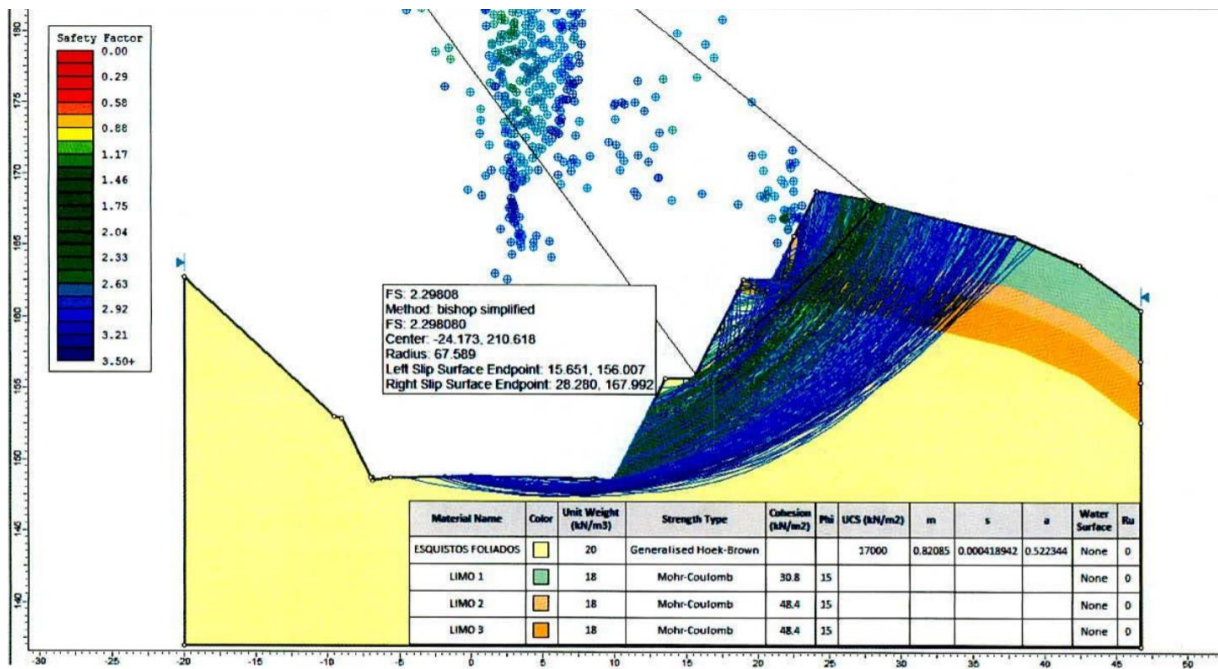


Figura 61. Calculo Estático SLIDE V6.0 (K1+450 – K1+650) – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

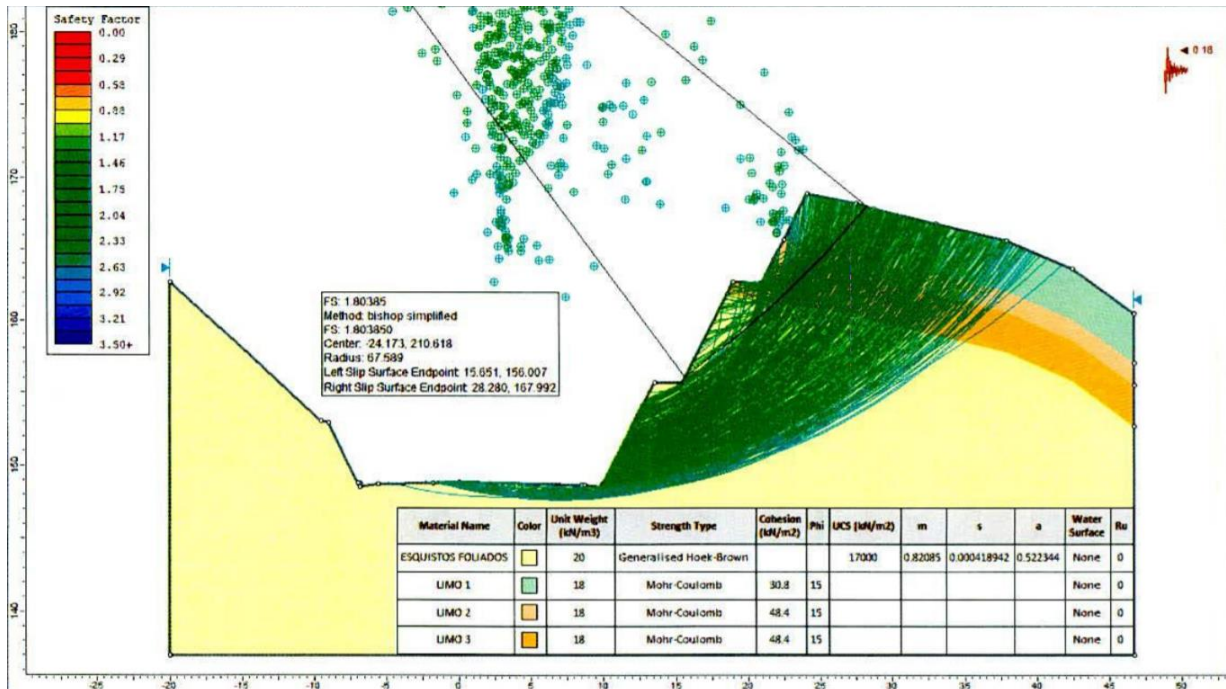


Figura 62. Calculo Bajo Sismo SLIDE (K1+450 – K1+650) – Volumen V
Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

K1+800 – K2+000

El Primer Diseño realizado por el Concesionario entre el K1+800 K2+000 se enfocó en realizar ciertos cortes en terraseo en la margen derecha de la vía, sin embargo, no se tuvo en cuenta un sistema de drenaje, y la disposición del material, lo que desencadenó una intrusión en la roca que conforma el talud, generando una sobrepresión y meteorización. Adicionalmente estos diseños realizados en Slide se realizaron por el Método de Bishop Simplificado, por lo tanto asumieron que el material que conforma el talud es suelo, por ende no tuvieron en cuenta la presencia del macizo rocoso que debió calcularse inicialmente con propiedades de roca previamente valoradas por núcleos extraídos en campo.

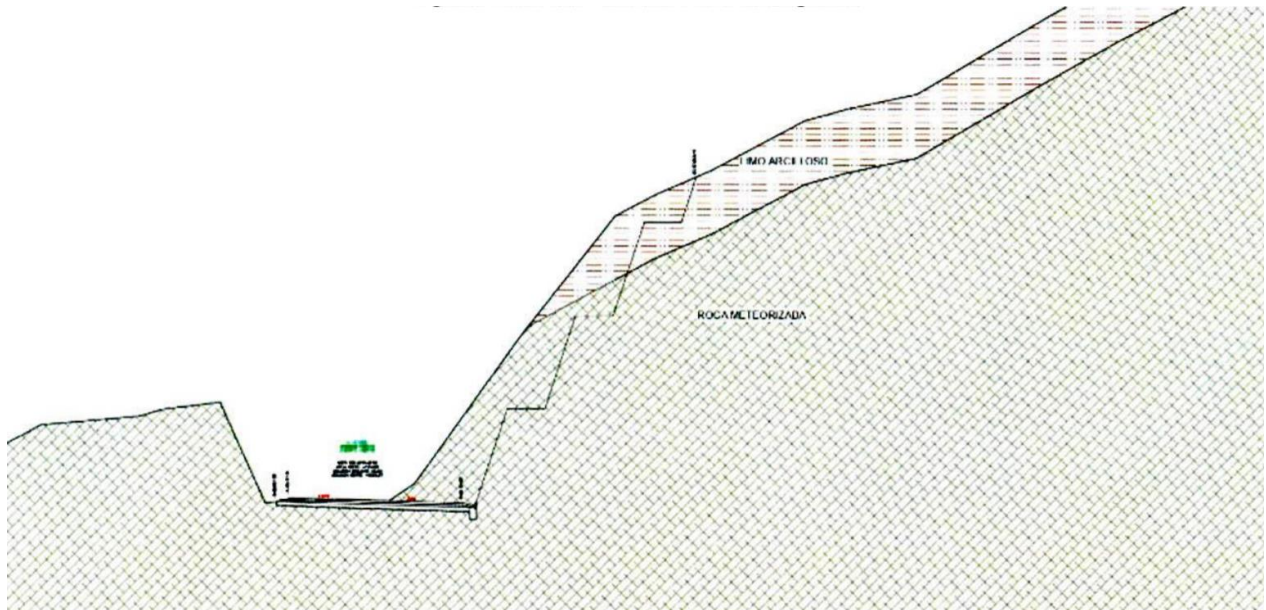


Figura 63. Perfil Estratigráfico – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

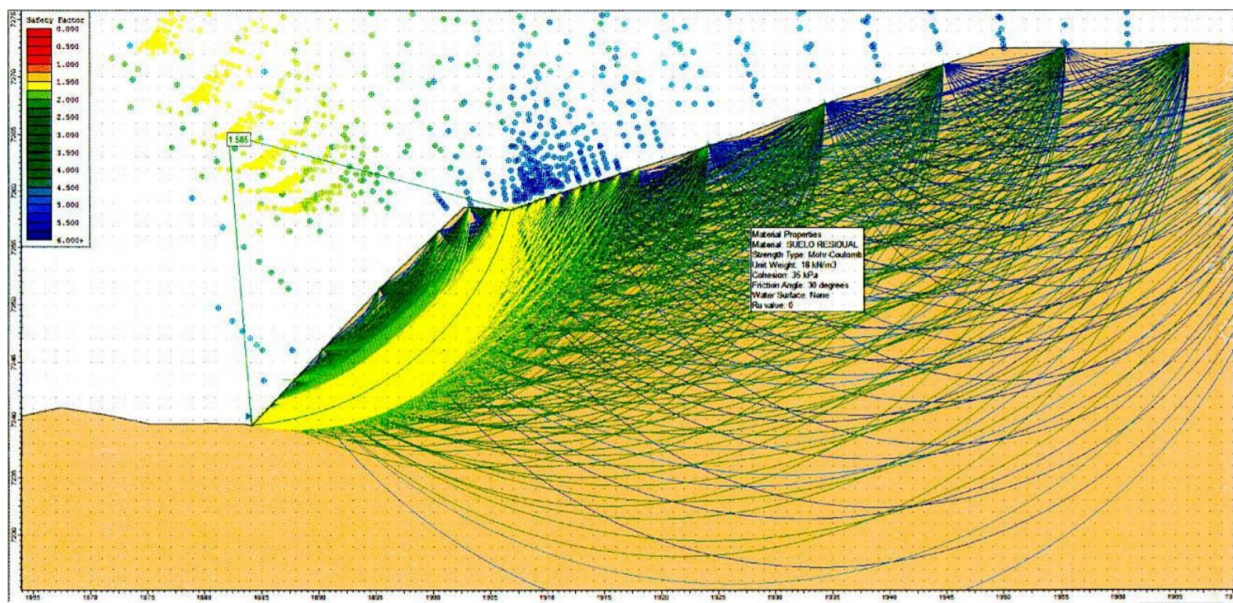


Figura 64. Calculo Estático SLIDE V6.0 (K1+800 – K1+850) – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

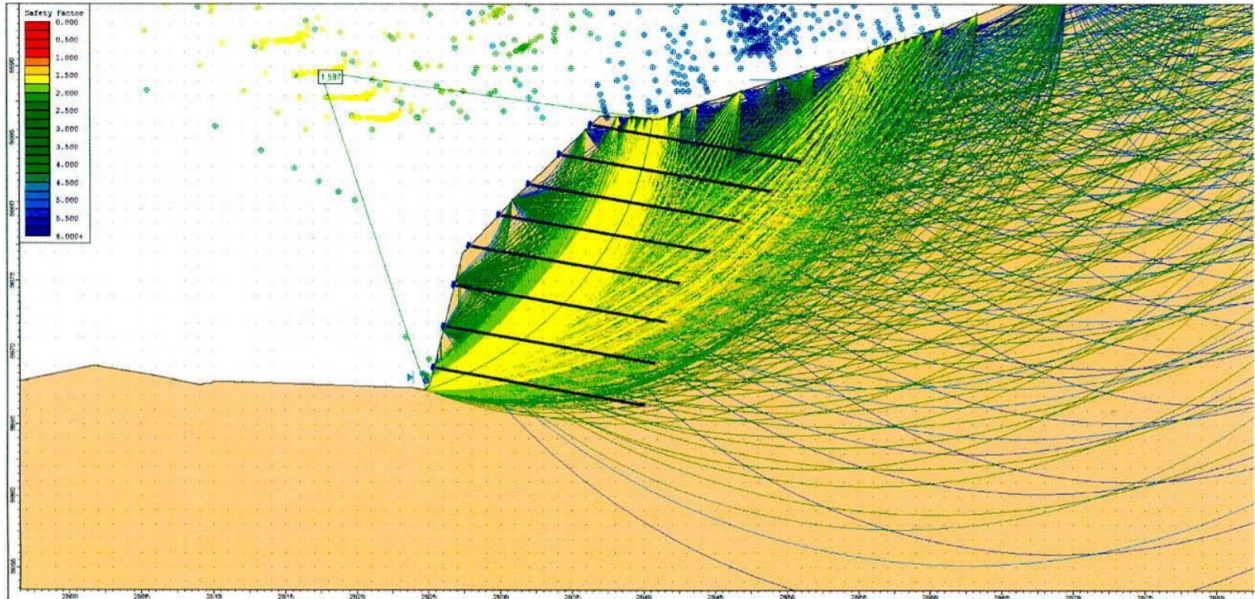


Figura 65. Calculo Estático SLIDE V6.0 ($K1+800 - K1+850$) – Volumen V
Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

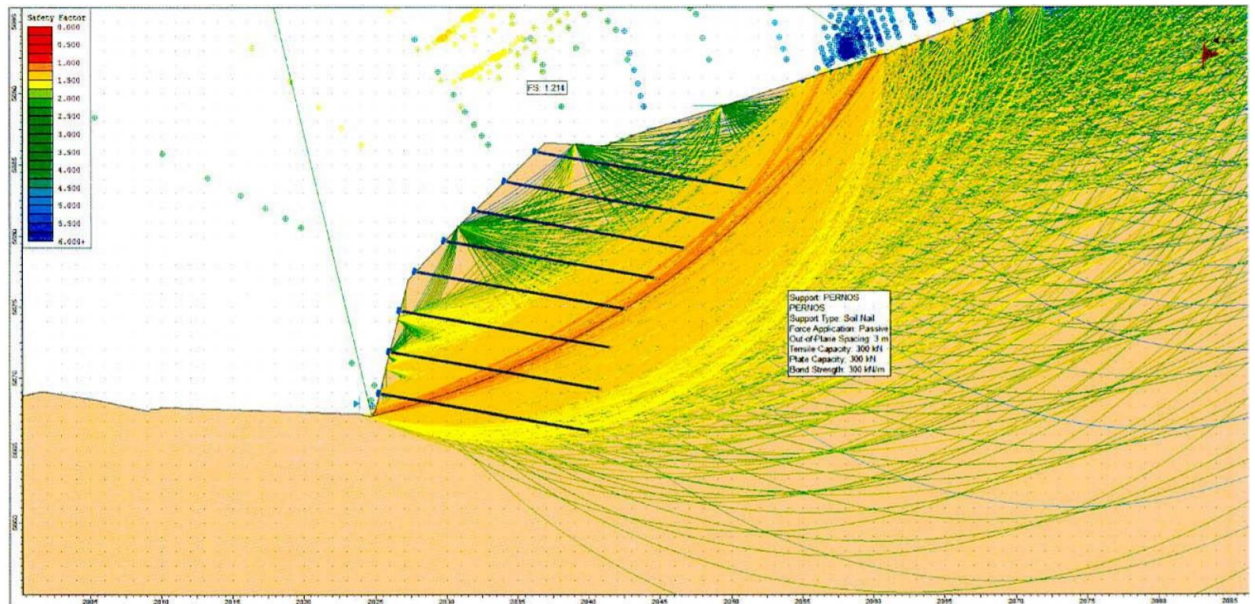


Figura 66. Calculo Bajo Sismo SLIDE V6.0 ($K1+800 - K1+850$) – Volumen V
Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

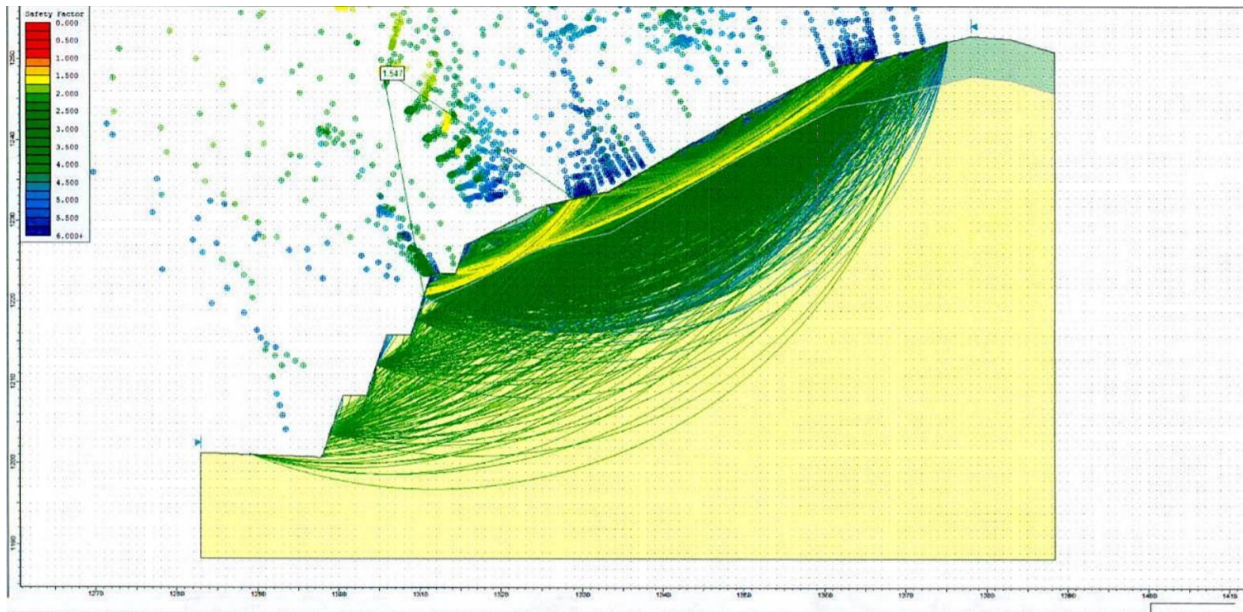


Figura 67. Calculo Estático SLIDE V6.0 ($K1+850 - K2+100$) – Volumen V
Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

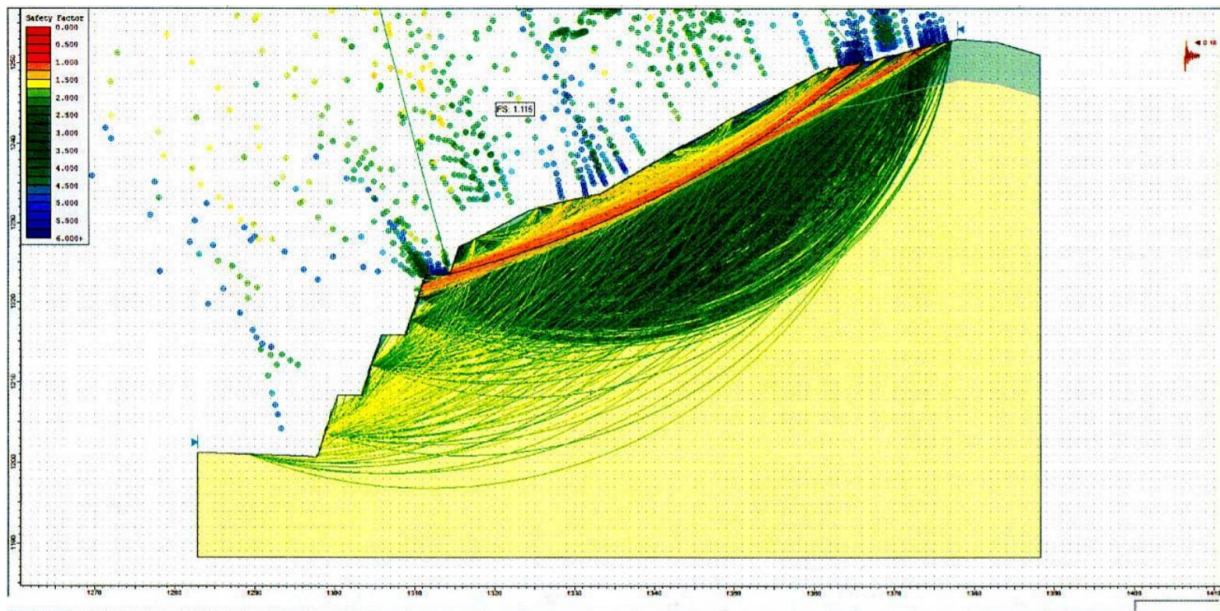


Figura 68. Calculo Bajo Sismo SLIDE V6.0 ($K1+850 - K2+100$) – Volumen V
Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

K2+150 – K2+380

El Primer Diseño realizado por el Concesionario entre el K2+150 K2+380 se enfocó en realizar ciertos cortes en terracedo en la margen derecha de la vía, sin embargo, no se tuvo en cuenta un sistema de drenaje, y la disposición del material, lo que desencadenó una intrusión en la roca que conforma el talud, generando una sobrepresión y meteorización. Adicionalmente es evidente que el material del talud originalmente presentaba una condición estable y no era necesario realizar el diseño geométrico atravesando el material, ya que en la margen izquierda de la vía existe una longitud adecuada para poder diseñar el ancho de vía.

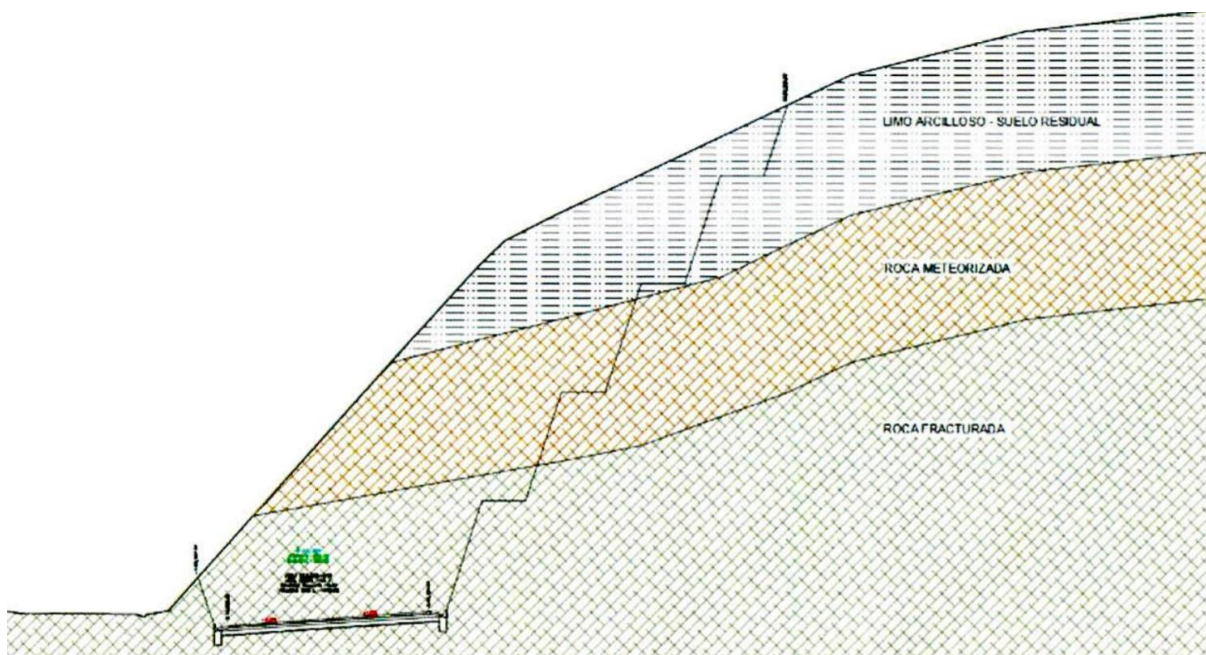


Figura 69. Perfil Estratigráfico – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

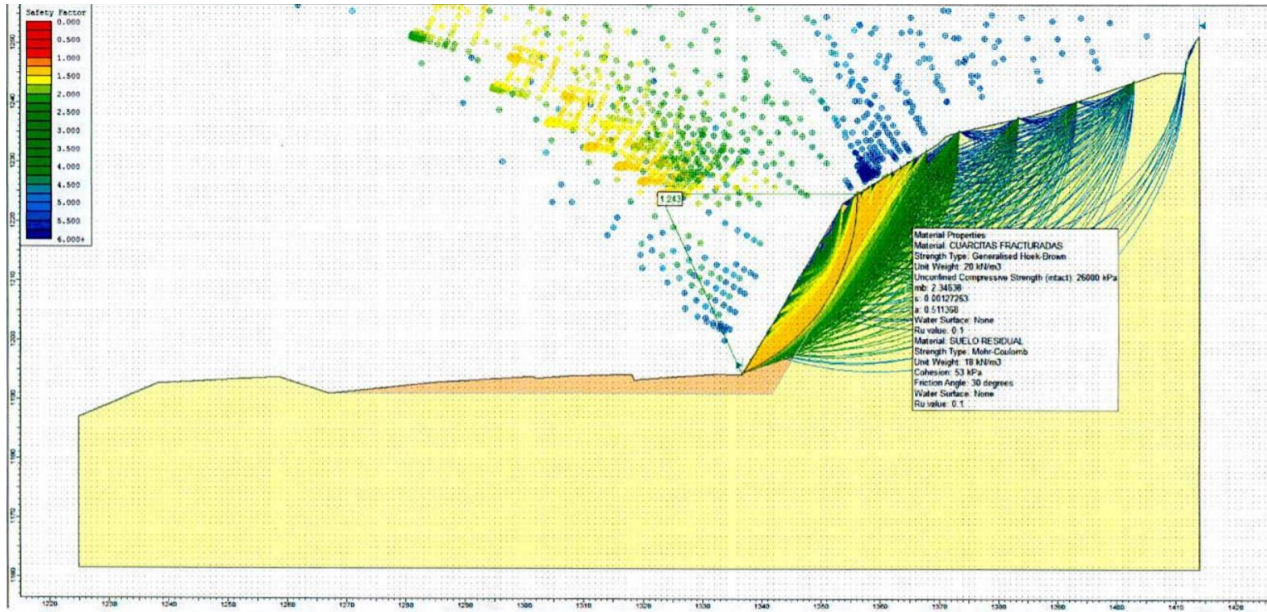


Figura 70. Calculo Estático SLIDE V6.0 (K2+150 – K2+190) – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

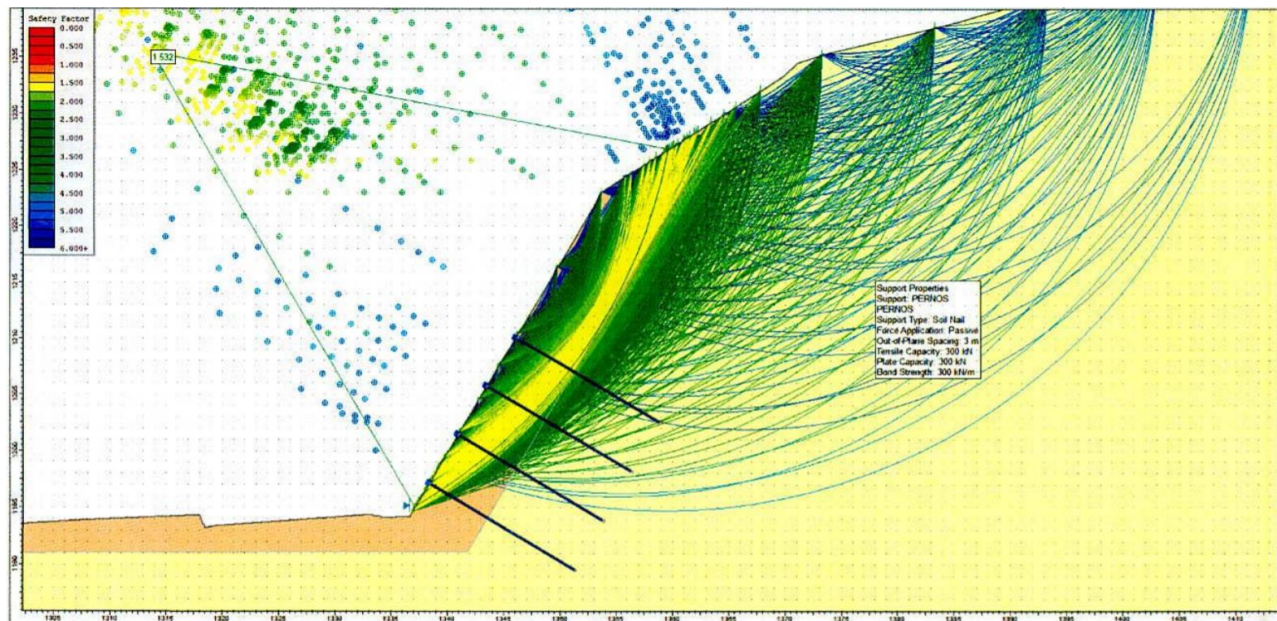


Figura 71. Calculo Estático con Anclajes SLIDE V6.0 (K2+150 – K2+190) – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

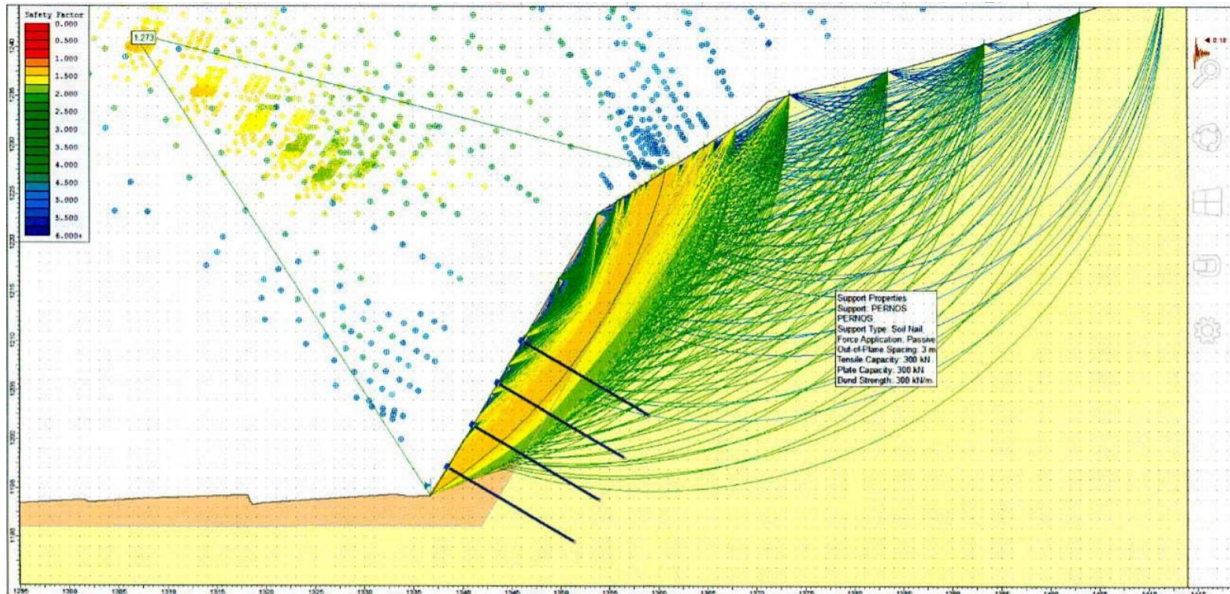


Figura 72. Calculo Bajo Sismo con Anclajes SLIDE V6.0 (K2+150 – K2+190)
– Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

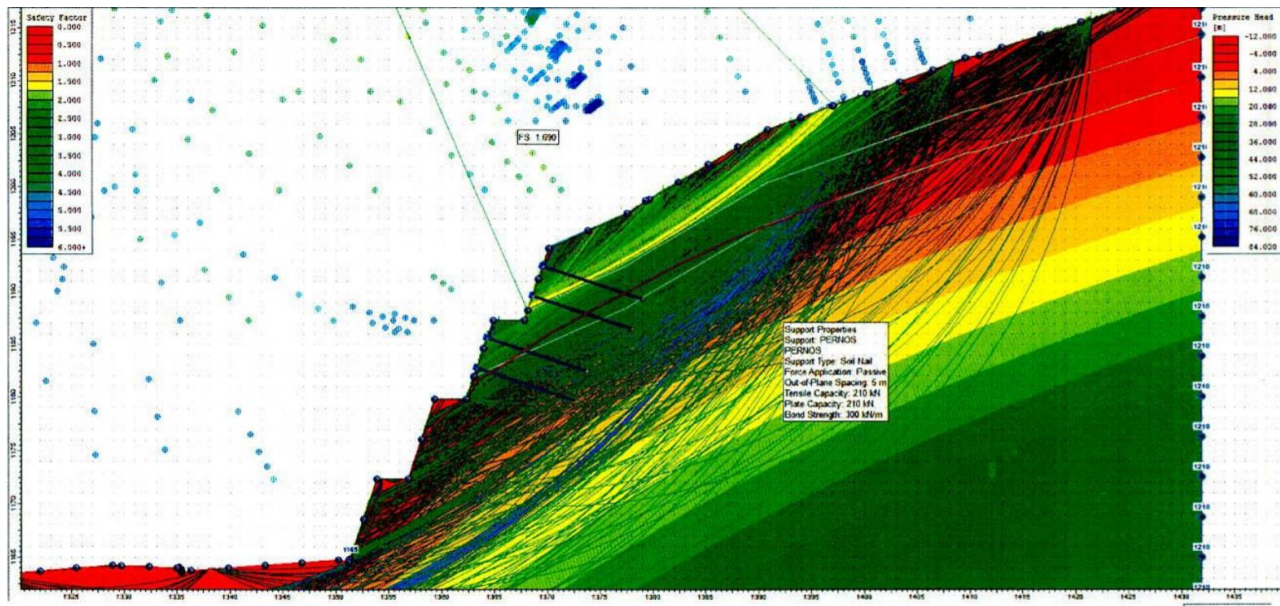


Figura 73. Calculo Estático con Anclajes SLIDE V6.0 (K2+190 – K2+240) –
Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

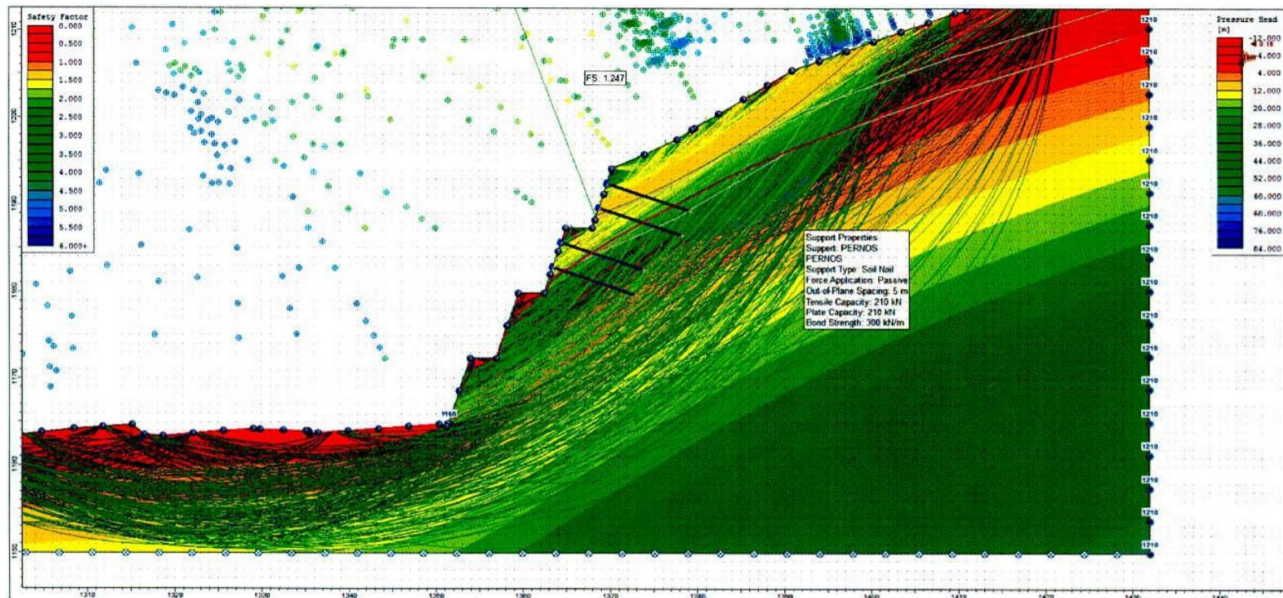


Figura 74. Calculo Bajo Sismo con Anclajes SLIDE V6.0 ($K2+190 - K2+240$)
– Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

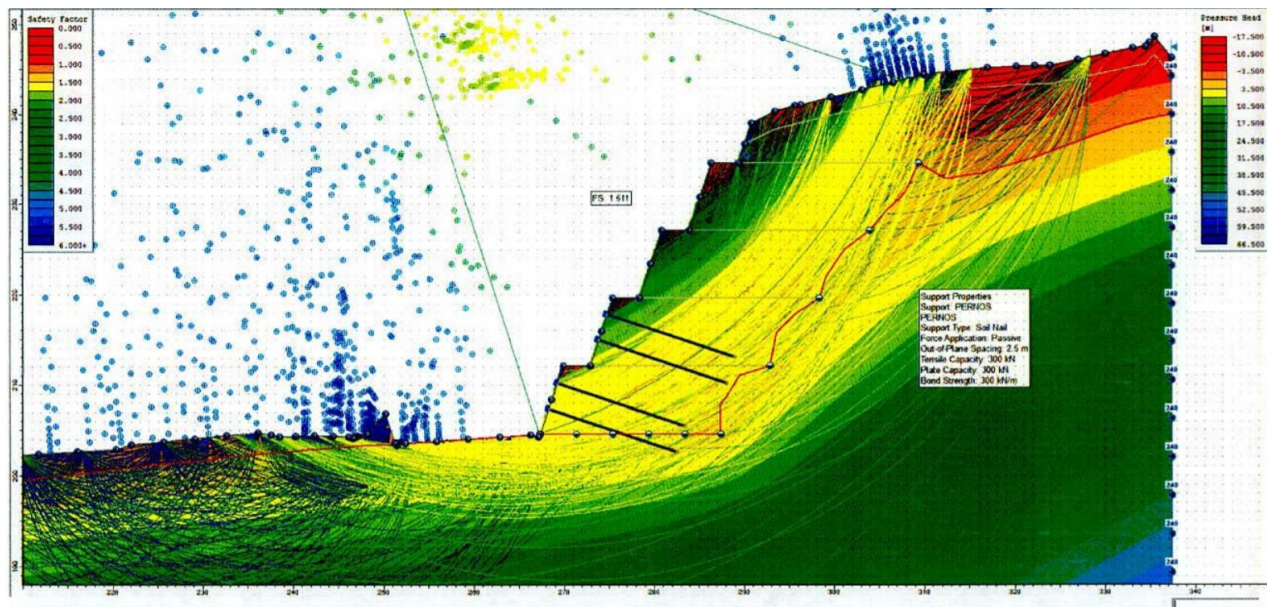


Figura 75. Calculo Estático con Anclajes SLIDE V6.0 ($K2+240 - K2+320$) –
Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

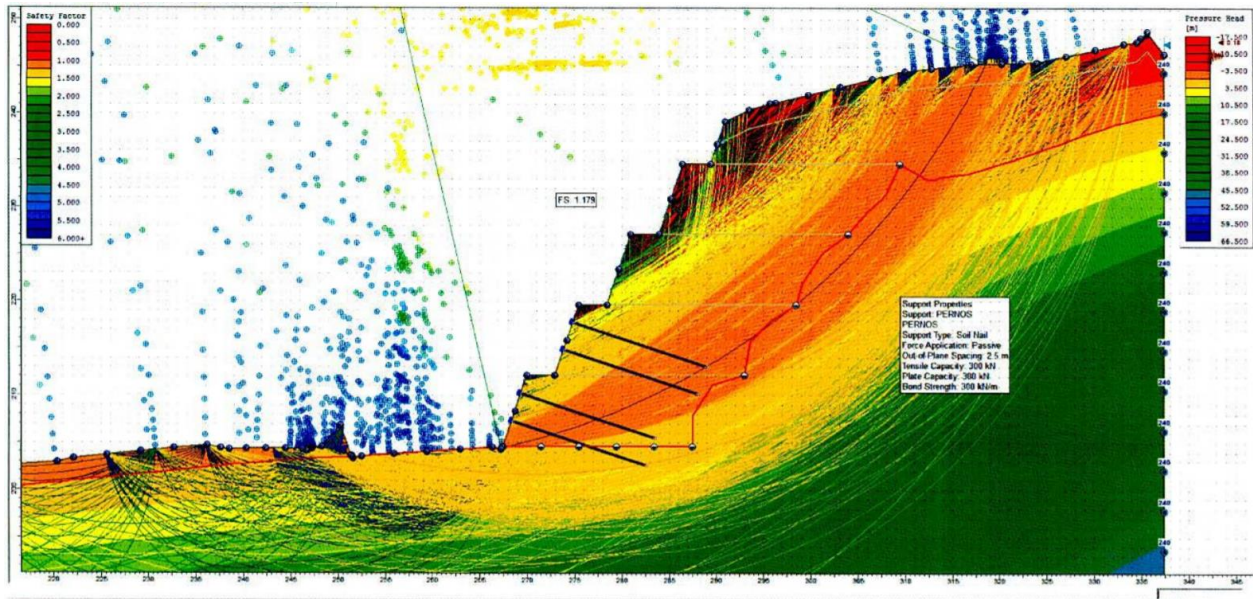


Figura 76. Calculo Bajo Sismo con Anclajes SLIDE V6.0 (K2+240 – K2+320) – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

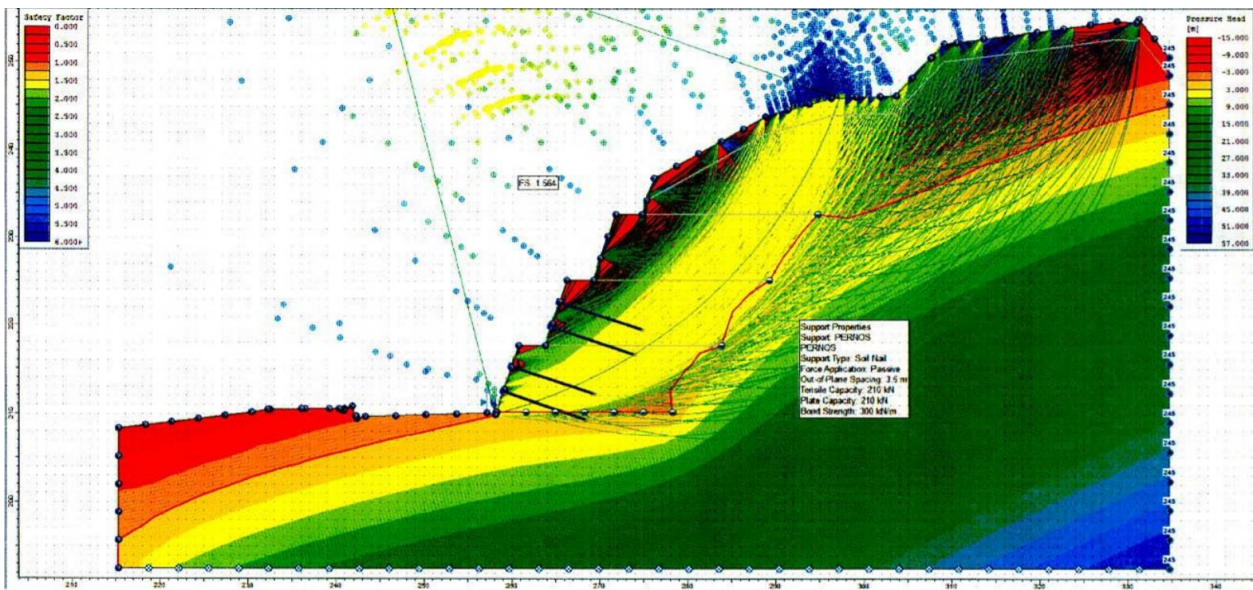


Figura 77. Calculo Estático con Anclajes SLIDE V6.0 (K2+320 – K2+380) – Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

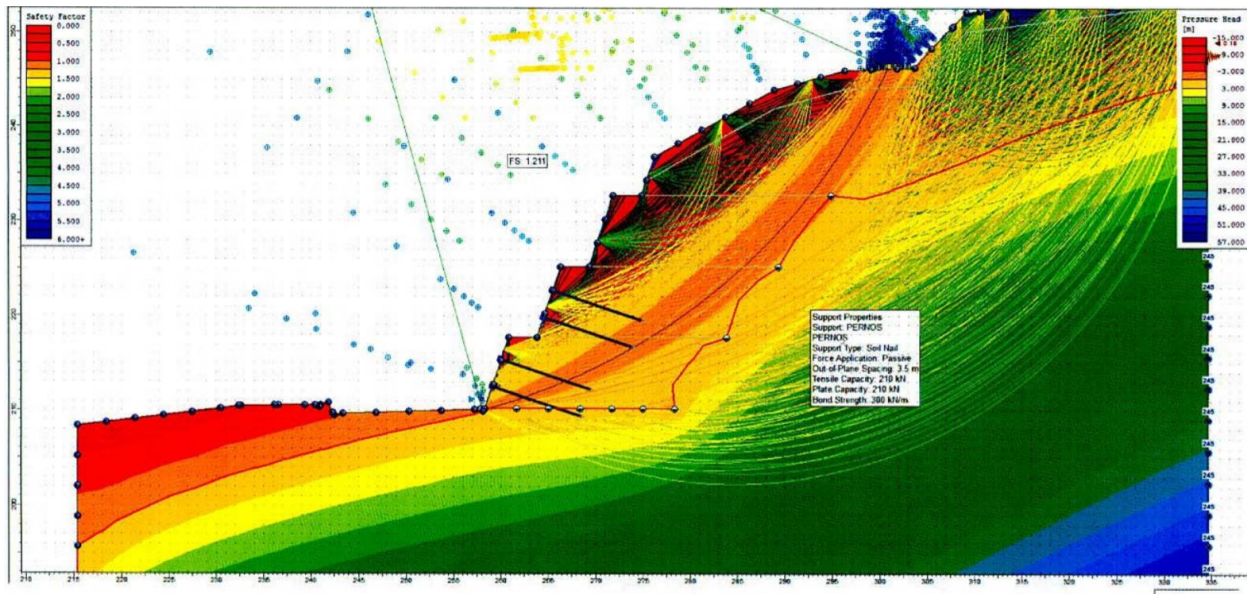


Figura 78. Calculo Bajo Sismo con Anclajes SLIDE V6.0 (K2+320 – K2+380)
– Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

Cada uno de las soluciones generadas por el primer Diseño de Contención para los Puntos Críticos tuvieron grandes deficiencias tanto en información inicial como en aplicación; esto se debe a un enfoque equivocado del comportamiento del macizo rocoso del talud, inicialmente no se contó con información puntual del material presente en la zona, el Diseño Geométrico debió evitar realizar cortes en el terreno ya que disponía de otras soluciones menos invasivas (como disponer la vía en la margen izquierda).

Al generar cortes en forma de terrazas en el talud se dio vía libre a la erosión y meteorización, que genera el agua sobre la roca, adicionalmente al cambio de temperatura, la sobrepresión y arrastre de material generaron pequeños deslizamientos. Un Diseño viable debió contener un estudio más completo del material de la zona y evitar lo mas posible modificar el Angulo de reposo del talud, con lo cual una geomembrana y un muro en un pequeño corte en la

parte baja del talud, en conjunto con un sistema de drenaje cumpliría con todos los requisitos de estabilización de la zona.

7.7. Diagnóstico de Falla

Teniendo en cuenta el Análisis realizado en el anterior Registro Fotográfico, junto con los Antecedentes de comportamiento, Diseño Geométrico, Topografía, Tipos de Falla y parámetros detonantes de los puntos Críticos, se determinará un diagnóstico de los eventos, con ayuda de todos los soportes como Planos, Imágenes de los puntos Críticos y antecedentes de los deslizamientos presentados.

7.7.1. Propuesta de Tratamiento Alternativo.

De acuerdo con la cartografía geológica los puntos críticos no se encuentran localizados sobre ninguna de las trazas de la Falla (se presenta en la cercanía la falla Otú), pero se ubica en el centro de ella, lo que puede explicar el apretado fracturamiento presente en estos sitios.

Esta zona se ha caracterizado por la inestabilidad de los taludes una vez han sido excavados, ya que, a lo largo de toda su intervención por más de 5 años, los cortes realizados para el tramo de vía demuestran una sintomatología de comportamiento de cárcavas, donde aparecen sectores con principio de revegetalización y otros con como movimientos de material activo.

Aunque se puede evidenciar la actividad que fue realizada para la recuperación de los sitios inestables, la cual consistió en un terraceo pequeño localizado sobre el sector sur junto con un

sistema de mallas para contener el material, parcialmente derrumbado; adicionalmente no se construyeron obras de mitigación para facilitar la recuperación de la vertiente, por lo que la recuperación de los taludes es completamente natural.



Figura 79. Sección Crítica entre K1+790 a K2+400 Unidad Funcional 2
Caucasia – Zaragoza de Antioquia - Google Earth, 2020.

El seguimiento realizado a los puntos Críticos muestra que las zonas desde las cuales se desprenden materiales son pequeñas y se asocian con la ausencia de vegetación, es decir, funcionan como cárcavas, lo que implica que no se deben esperar movimientos en masa con volúmenes de decenas o centenares de metros cúbicos, esto teniendo en cuenta que el material que ya se ha deslizado ha generado una disminución en la pendiente del talud y adicionalmente si se propicia el crecimiento de vegetación es posible reducir su actividad en el corto plazo en solo meses.

El análisis y diseño de los Puntos Críticos se concibió bajo los siguientes parámetros:

- Resistencia según el grado de estabilidad presentado.

- Garantizar el factor de seguridad establecido en la norma NSR-10 para las condiciones a largo plazo.
- Garantizar el factor de seguridad mínimo definido en NSR-10 para condiciones de carga extrema como sismo y saturación total por eventos prolongados de lluvias.
- Control de agua superficial y subsuperficial a través de elementos que permiten el drenaje de forma eficiente.
- Control de erosión de la superficie del talud.
- Garantizar la estabilidad del talud para la operación de la vía a largo plazo.
- Control de fallas menores y desprendimientos de bloques de roca.



Figura 80. Sección Crítica entre K2+300 Unidad Funcional 2 Caucaasia – Zaragoza de Antioquia - Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

Para la evaluación de la estabilidad del talud se realizó un análisis de medio continuo, el cual propone el equilibrio estático para la sección de análisis bajo ciertas hipótesis. El Análisis de estabilidad de medio continuo consiste en un análisis numérico para el talud existente, en función del factor de seguridad, mediante el programa Slide, este permite modelar una variedad de condiciones de suelo mediante diferentes métodos de análisis para determinar la potencial superficie de falla, realizando adicionalmente el estudio sísmico mediante análisis pseudo-estático.

Para este proyecto en específico se usó un generador automático de fallas con diferentes geometrías y dimensiones, y optimización de la superficie encontrada de tal forma que se garantice la superficie de falla más desfavorable. El software de análisis generó automáticamente rangos de superficies de falla probables, destacando la superficie de falla de menor factor.

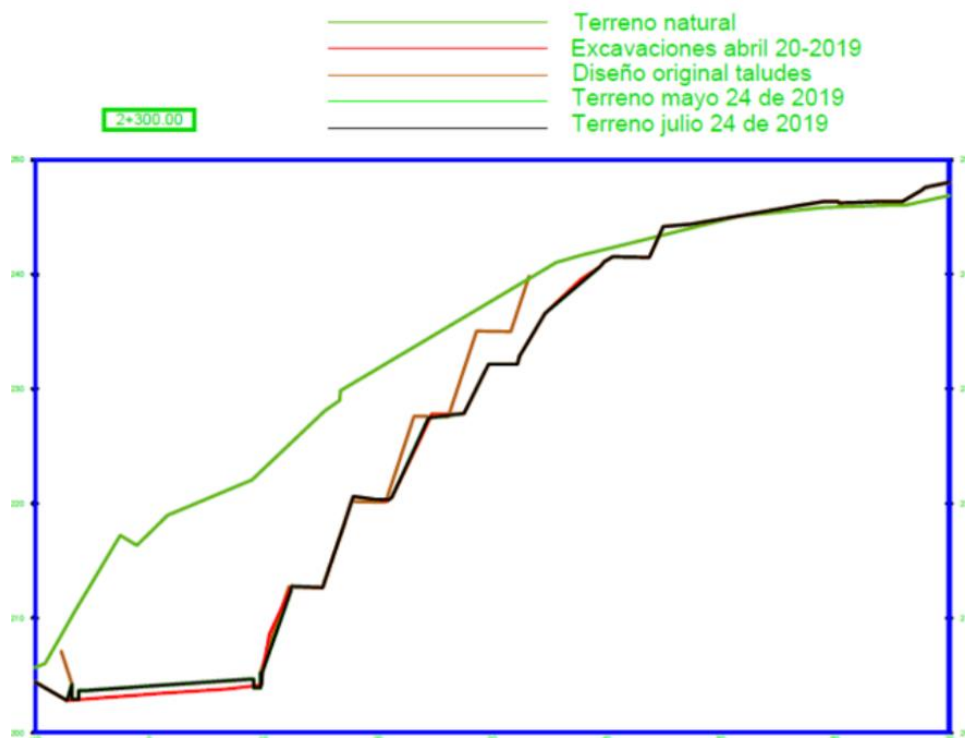


Figura 81. Sección Crítica (Esquema) entre K2+300 Unidad Funcional 2 Caucaasia – Zaragoza de Antioquia - Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes –

En la Figura 81, se muestran todos los cortes que se han realizado en el K2+300 resultado del análisis de estabilidad ejecutado, el perfil del terreno original posee una pendiente en la cual el material presente está en reposo y por ende todo el sistema es estable, sin embargo al realizar el corte y terracedo del diseño original del talud en 2015, se aumentó la inclinación y no se tuvo en cuenta el ángulo de buzamiento del macizo rocosa, permitiendo la filtración de agua en la zona superior de cada corte, la cual dio como resultado una sobrepresión y meteorización en el material. El talud muestra un comportamiento inestable debido al intento de recuperar su Angulo de reposo, por ende, el terreno de julio de 2019 recupera de cierta forma la pendiente del terreno original.

Un análisis similar se realizó para la sección otra de las secciones de este tramo, en la cual se presenta la evolución del comportamiento del terreno en el perfil mencionado, notándose que el proceso de inestabilidad ha ido disminuyendo en el tiempo, alcanzando incluso estabilidad en las partes alta y baja del talud, las cuales no ha presentado variaciones desde diciembre de 2019.



Figura 82. Sección Crítica entre K2+260 Unidad Funcional 2 Caucaasia – Zaragoza de Antioquia - Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

En la parte media del talud se puede notar una disminución en la altura del corte, la cual corresponde a material previamente desprendido que fue retirado durante el proceso de reconformación del sitio.

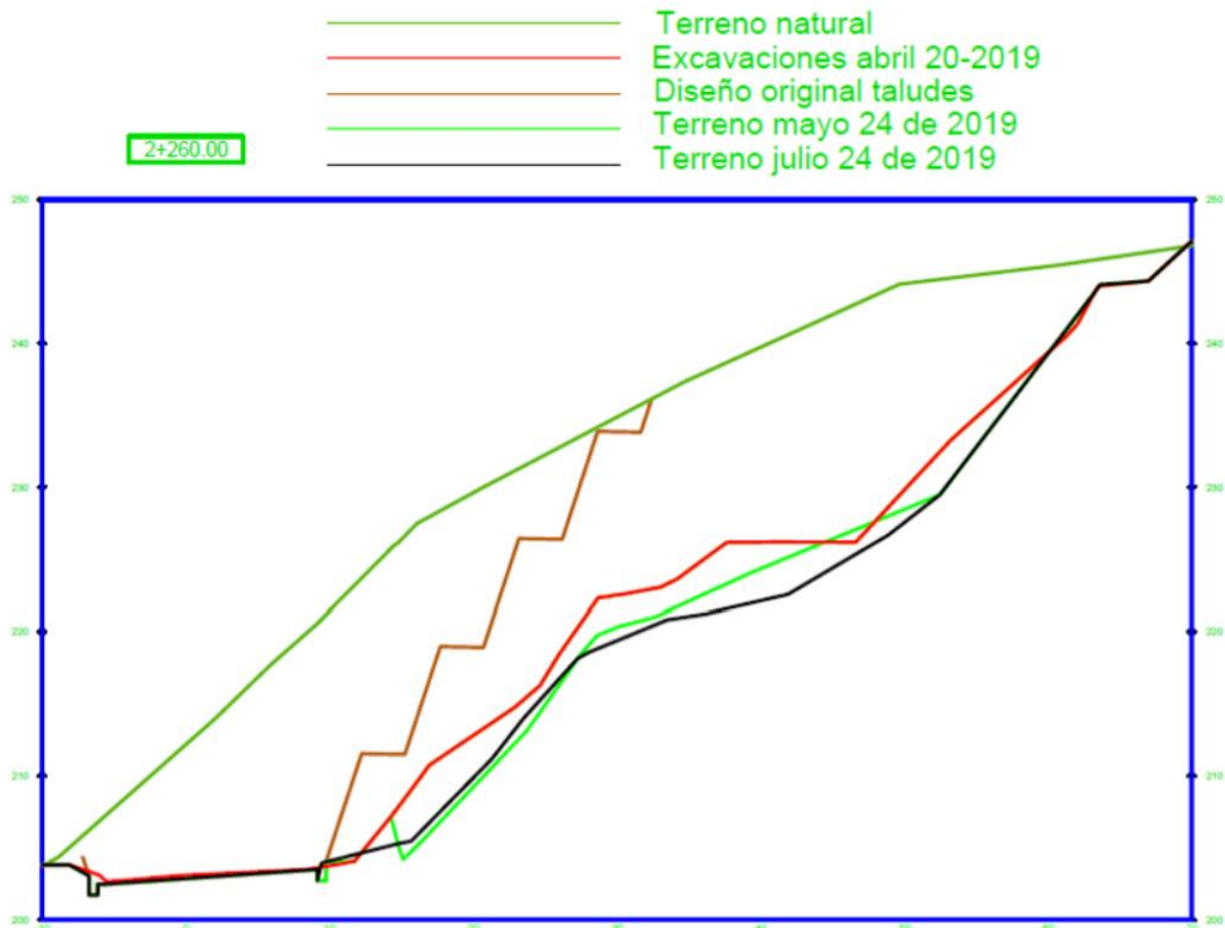


Figura 83. Sección Crítica (Esquema) entre K2+260 Unidad Funcional 2 Caucaasia – Zaragoza de Antioquia - Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

En la Figura 83, se muestran todos los cortes que se han realizado en el K2+260 resultado del análisis de estabilidad ejecutado, el perfil del terreno original posee una pendiente en la cual el material presente está en reposo y por ende todo el sistema es estable, sin embargo al realizar el

corte y terraceo del diseño original del talud en 2015, se aumentó la inclinación y no se tuvo en cuenta el ángulo de buzamiento del macizo rocosa, permitiendo la filtración de agua en la zona superior de cada corte (El drenaje fue uno de los factores que no se tuvo en cuenta en el primer diseño), la cual dio como resultado una sobrepresión y meteorización en el material.

El talud muestra un comportamiento inestable debido al intento de recuperar su Angulo de reposo, por ende, el terreno de julio de 2019 ya ha recupera la pendiente del terreno original y se ha estabilizado, adicionalmente se evidencia una notable perdida de metros cúbicos de material erosionado que son dependientes del tiempo, cambios de temperatura y arrastre de este.

Finalmente se realizó un análisis adicional a los Puntos Críticos, en esta sección el seguimiento topográfico mostró estabilidad global del talud desde la intervención al sitio. Se presenta la ubicación en campo aproximada de la sección, donde se puede evidenciar una mayor presencia de afloramiento de roca.



Figura 84. Sección Crítica entre K2+200 Unidad Funcional 2 Caucaasia – Zaragoza de Antioquia - Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

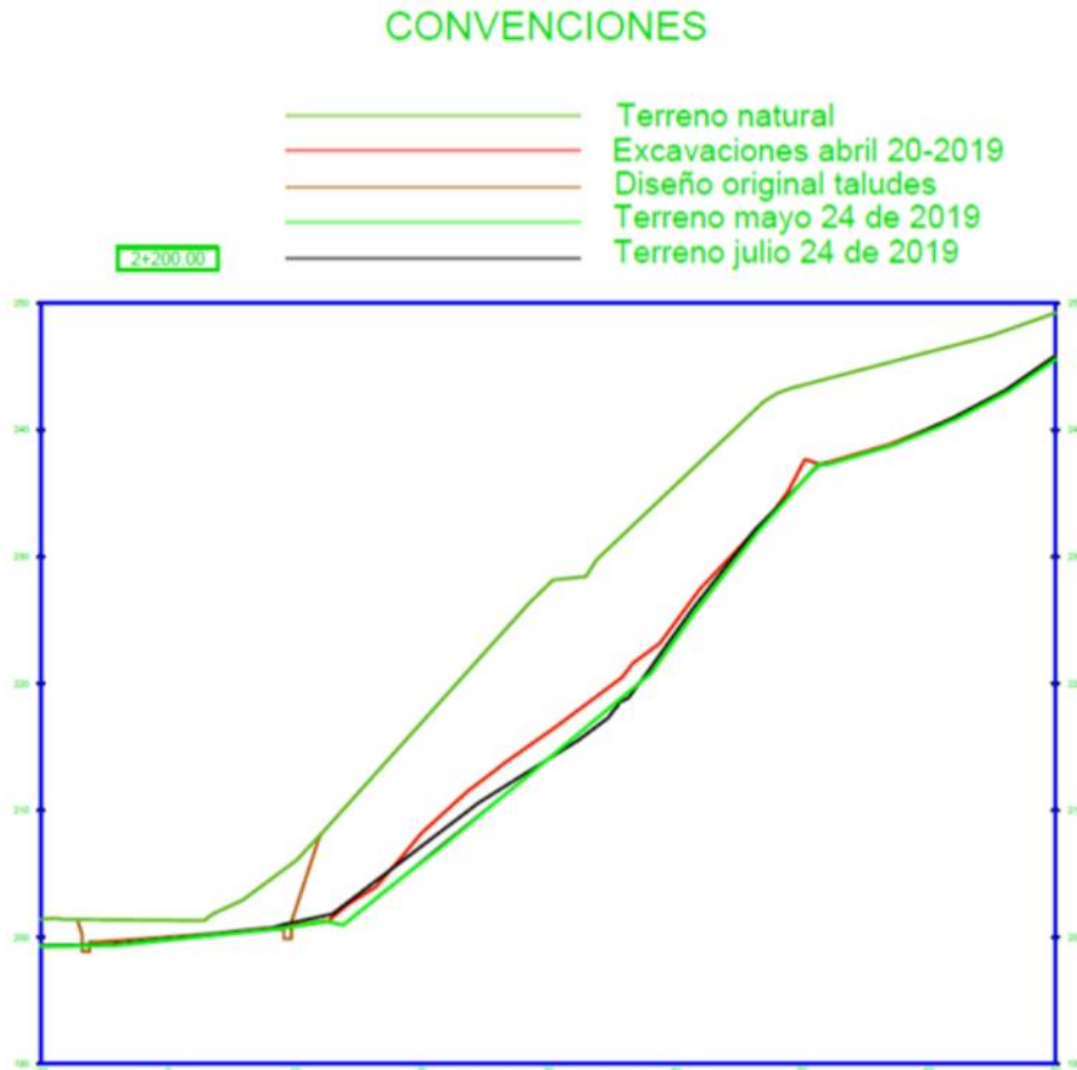


Figura 85. Sección Crítica (Esquema) entre K2+200 Unidad Funcional 2 Caucaasia – Zaragoza de Antioquia - Volumen V Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes – 2015.

En la Figura 85, se muestran todos los cortes que se han realizado en el K2+200 resultado del análisis de estabilidad ejecutado, el perfil del terreno original posee una pendiente en la cual el material presente está en reposo y por ende todo el sistema es estable, sin embargo al realizar el corte y terraceo del diseño original del talud en 2015, se aumentó la inclinación y no se tuvo en cuenta el ángulo de buzamiento del macizo rocosa, permitiendo la filtración de agua en la zona

superior de cada corte (El drenaje fue uno de los factores que no se tuvo en cuenta en el primer diseño), la cual dio como resultado una sobrepresión y meteorización en el material.

El talud muestra un comportamiento inestable debido al intento de recuperar su Angulo de reposo, por ende, el terreno de julio de 2019 ya ha recupera la pendiente del terreno original y se ha estabilizado, adicionalmente es evidente que el diseño geométrico pudo evitar el corte del talud si se dispusiere el ancho de vía en la zona izquierda de la figura 85.

Los resultados de los análisis de estabilidad considerando medio continuo realizados en las secciones mostradas, permiten aclarar que los Puntos Críticos no tiene un mecanismo de falla global de todo el talud. Particularmente entre la sección K2+200 se encuentra una susceptibilidad a desprendimientos debido a la meteorización que condicionó la resistencia del material de la zona, la cual se intentó controlar con un segundo Diseño conformado por un sistema de pernos y complementándolo con una losa de concreto lanzado en la parte alta del talud, para garantizar una adecuada transmisión de esfuerzos entre la losa y los pernos.

Sin embargo, el material continuo meteorizándose debido a la sobrepresión generada por la infiltración del agua a lo largo del corte y se perdió la finalidad con la cual se dispusieron los anclajes pasivos; esto indica que todo el macizo rocoso al ser expuesto a las condiciones adversas del ambiente desde el año 2015 tenia como finalidad ser erosionado y socavado hasta encontrar un ángulo de equilibrio.

Una solución viable para todos los taludes en este punto ya no requiere un diseño de estabilidad, esto debido a que al tener la historia de 5 años del comportamiento del material junto

con los dos diseños previos (que, aunque tuvieron en cuenta factores importantes de contención lateral obviaron uno de los factores más importantes a largo plazo) y la pérdida de metros cúbicos del corte, se evidencia que se ha estabilizado gracias a la pérdida de material y la disminución de la inclinación. Por lo tanto, aunque los análisis muestran estabilidad en toda la altura del talud, la alta meteorización de la roca puede ocasionar desprendimientos que eventualmente pueden afectar la continuidad de la vía, para controlar dichos desprendimientos se debe utilizar un sistema de protección en la parte inferior del talud; dicho sistema de protección puede ser conformado a partir de un sistema de enmallado o una barrera New Jersey, con la finalidad de generar una acumulación del material desprendido en la base del talud y periódicamente retirarlo de la zona.

8. CONCLUSIONES

Según lo establecido a lo largo de este proyecto, se permite indicar las siguientes conclusiones:

Se establece que los taludes de los Puntos Críticos comprendidos entre Caucasia - Zaragoza Sector K0+840 A K2+400, su detonante principal de falla se debe a la inestabilidad natural del terreno aunada a las modificaciones de estabilidad que generaron los cortes de los primeros dos Diseños de Contención Lateral, debido al fracturamiento intenso de la roca por meteorización y erosión del agua (inducidos por el terraceo), en especial durante episodios de lluvia importantes donde las aguas de escorrentía pueden infiltrarse y generar un incremento en las presiones de poros, condicionando la resistencia y permitiendo que con el tiempo el material se arrastrara con gran facilidad. Se puede observar que al mantener un ángulo de fricción del 31° con forme a los resultados de laboratorio, se puede recrear una litología de la zona similar a la original, en cuanto a la cohesión mínima establecida los Factores de Seguridad hallados de la zona son del 1.3 y 1 estático y pseudo estático respectivamente.

Al realizar un análisis completo de los cálculos realizados por el Concesionario en el Software Slide en ambos diseños, el arrastre de materiales dentro de los taludes se puede traducir en la inestabilidad de estos por la falta de sistemas de drenaje, en razón a que la escorrentía aumenta en los sectores de corte de las secciones propuestas de 0.5H:1V, desequilibrando todo el talud. Históricamente el sitio muestra su distribución como cárcavas antes que movimientos en masa de volúmenes importantes que pongan en peligro vehículos o transeúntes que circulen por la vía; sin

embargo, la disposición de una barrera de contención de aproximadamente 200 metros de longitud y entre 1.5 a 2 metros de altura en la parte baja del talud permite garantizar la continuidad de la vía evitando que el material suelto se desprenda e invada la calzada.

Teniendo en cuenta las condiciones del terreno natural original, se debió generar un diseño de contención menos invasivo a lo largo de la cara del talud, como ya se ha mencionado anteriormente en este proyecto una de las posibles soluciones podría haber sido la disposición del Diseño Geométrico en la zona izquierda del talud con el fin de evitar cortarlo o modificarlo de cualquier modo. Otra posible solución previa al primer Diseño del Concesionario requeriría la implementación de un sistema de refuerzo por medio de anclajes y una pantalla en la parte baja del talud, en el cual, aunque se realizaría un corte sería mucho menor, con el fin de mantener la sección con la inclinación original y en la cual el sistema propuesto supliría y protegería la parte baja del talud, aislando el material de la intemperie y evitando su erosión; ya que el corte estaría aislado por esta contención y el resto del talud estaría protegido por sus condiciones iniciales de inclinación y vegetación que evitan la meteorización.

Una vez el talud recree sus condiciones de estabilidad originales (se recreen las condiciones de estabilidad con una relación de 1H:1V o 1H:.05V aproximadamente entre 45° a 30°), es importante realizar la aplicación de cal en todas las caras expuestas del talud, es una medida que debe ayudar en el proceso de germinación local rápida de especies vegetales nativas que formen a corto y mediano plazo una cubierta protectora que mitigue y suprima la actividad de carcavamiento. La saturación de las fracturas existentes en las bermas mediante el vaciado de

lechada de cal es un procedimiento que puede sellarlas a corto plazo y contribuir a la estabilidad general de los Puntos Críticos.

Si se tiene en cuenta que la parte superior del talud ha asimilado de manera positiva la vegetación sembrada y ha resistido cómodamente la influencia de la temporada de lluvias, se puede esperar con buena certeza que en el futuro próximo se mantenga una estabilidad relativa de la zona superior; esta situación estaría condicionada a la construcción de una zanja perimetral superior. En los taludes de los puntos críticos se deben diseñar bermas para mejorar la estabilidad, en conjunto con cunetas de protección para la escorrentía, por lo que es necesario aplicar dicha solución en las áreas que muestren mayor estabilidad y así poder prolongar las cunetas a medida que los sectores deleznable van siendo estables.

9. RECOMENDACIONES

Se recomienda que en la disposición de Obras de Protección de Taludes en las márgenes de la sección de vía tengan en cuenta los factores de escorrentía junto con la sobrepresión que puede llegarse a presentar en los Puntos Críticos.

Se recomienda realizar el retiro de todo tipo de material suelto y triturado que se encuentra ubicado en la parte baja de todos los taludes de los Puntos Críticos mencionados en este Proyecto, ya que gracias a la barrera de contención o enmallado el material se va acumulando poco a poco y debe ser evacuado con el fin de mantener un flujo de tránsito constante.

Se recomienda que los modelos ejecutados en el software SLIDE V6.0, se tomen como un diseño ideal y en los cuales hace falta realizar un proceso constructivo adecuado, con el fin de poder recrear de la mejor forma el diseño realizado para la contención de todos los taludes de los Puntos Críticos (esto teniendo en cuenta la importancia de las propiedades, enfoque y características del material con el que se trabaja).

Para facilitar el proceso de revegetalización natural se recomienda cubrir todas las superficies desprovistas de vegetación (cortes y bermas) con cal viva o apagada aplicada “al voleo”, de tal manera que ellas queden con una capa de 1 mm o menos de que neutralice la acidez de los materiales y permita la germinación de semillas nativas arrastradas por el viento. Este proceso no se ve afectado con lluvias posteriores, sino que por el contrario el agua ayuda a la infiltración sobre fracturas del suelo o roca.

En el caso de fracturas abiertas en roca se recomienda vaciar lechada de cal a lo largo de ellas a razón aproximada de un galón por metro, con una concentración de cal que permita su infiltración sobre las mismas, con el fin de que se produzca una reacción puzolánica al interior del macizo; los resultados de estos procedimientos no se pueden apreciar de manera inmediata, puesto que la germinación de especies locales tarda varias semanas o incluso algunos meses, pero para la temporada lluviosa los taludes deben tener algo de vegetación y las fracturas deben estar cerradas.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

INVIAS, I. N. (2020). *MANUAL DE DISEÑO GEOMETRICO DE CARRETERAS*. Recuperado de: <http://artemisa.unicauca.edu.co/~carboled/Libros/Manual%20de%20Diseno%20Geometrico%20de%20Carreteras.pdf>.

JAIME, S. (2013) *Deslizamientos: Análisis Geotécnico*, Capitulo 10, Recuperado de: [http://www.erosion.com.co/presentaciones/category/45tomoi.html?download=441:librodeslizamientosticap10#:~:text=La%20definici%C3%B3n%20de%20E2%80%9Csuelo%20residual,original%20\(Blight%2C%201997\)](http://www.erosion.com.co/presentaciones/category/45tomoi.html?download=441:librodeslizamientosticap10#:~:text=La%20definici%C3%B3n%20de%20E2%80%9Csuelo%20residual,original%20(Blight%2C%201997)).

Donald E., Kenneth J., Kelly E. Cobeen, David G. Pollock (2010). *Design of Wood Structures- ASD/LRFD*, Sixth Edition. Advanced Topics in Lateral Force Design. Access Engineering. Recuperado de: http://ezproxy.umng.edu.co:2146/browse/design-of-wood-structures-asdlrfdsixthedition/p2001158799716_1001?s.num=9&q=+seismic+resistance#p2001158799716_23001.

Gajan, Sivapalan, Saravanathiiban, Duraisamy S. (2001) *Dinámica del Suelo e Ingeniería de Terremotos* (0.267-7.261), vol. 31 Número 8, p1106-1122. 17p. *Artículo Modelado de disipación de energía en dispositivos estructurales y suelo de cimentación*. (McGraw-Hill Professional), AccessEngineering.

Karnovsky A. Lebed I. (2001). *Formulas for Structural Dynamics: Tables, Graphs and Solutions*.

FUNDAMENTAL EQUATIONS OF CLASSICAL BEAM THEORY, Chapter (McGraw-Hill Professional), AccessEngineering.

Suárez, J. (Sin Fecha). *Limitaciones geológicas en las vías terrestres*. Bogotá, Colombia

Duque, G. (2017). *MANUAL DE GEOLOGIA PARA INGENIEROS - MOVIMIENTOS*

MASALES CAP 16. Recuperado de:

<http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/330/movimientosmasales.pdf>

Slide (2020). *ROCSCIENCE INTERNATIONAL*. Recuperado de ROCSCIENCE:

<https://www.rocscience.com/>

Consorcio Constructor Conexión Norte (2017). *Estudios y Diseños Primera Calzada UF2 –*

Volumen de Tránsito, Diseño Geométrico, Fundaciones, Taludes (1 ed.). Antioquia.

Consorcio Constructor Conexión Norte (2017). *Estudios y Diseños Primera Calzada UF2 –*

Modificación Diseño de Taludes K0+840 a K2+400 (2 ed.). Antioquia.

Consorcio Constructor Conexión Norte (2017). *Volumen I – Estudio de Transporte, Versión 3:*

Tres tomos con sus respectivos planos y cálculos (3 ed.). Antioquia.

Consorcio Constructor Conexión Norte (2018). *Volumen IV – Estudio de Suelos para el diseño de*

fundaciones de puentes, obras de drenaje y otras estructuras de Contención, Versión 3:

Tres tomos con sus respectivos planos y cálculos (4 ed.). Antioquia.

Consortio Constructor Conexión Norte (2019). *Volumen V – Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes, Versión 4: Tres tomos con sus respectivos planos y cálculos (5 ed.)*. Antioquia.

Consortio Constructor Conexión Norte (2019). *Proceso Constructivo de las Obras propuestas - Deslizamiento de taludes en el K2+300 de la Unidad Funcional 2*. Antioquia.

Consortio Constructor Conexión Norte (2019). *Proceso Constructivo de las Obras propuestas y Estado - Deslizamiento de taludes en el Taludes ubicados en los sectores K0+840, K1+500, K1+650, K1+865, K1+970, K2+050, K2+150, K2+200, K2+350 y K2+400 de la Unidad Funcional 2 (1 ed.)*. Antioquia.

Consortio Constructor Conexión Norte (2020). *Observaciones y modificaciones al Volumen V - Estudio de Estabilidad y Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes, Versión 5: Tres tomos con sus respectivos planos y cálculos (5 ed.)*. Antioquia.