

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



**TESIS**

**COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL VOLCÁNICO RUMIORCO DEL  
KM 2+000 AL KM 5+000 DE LA CARRETERA SANTA APOLONIA - CUMBE  
MAYO, CAJAMARCA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL  
DE INGENIERO GEÓLOGO**

**AUTOR**

**Bach. VÁSQUEZ CARRIÓN MERCY FIORELA**

**ASESOR**

**Dr. RODRÍGUEZ CRUZADO SEGUNDO REINALDO**

**CAJAMARCA - PERÚ**

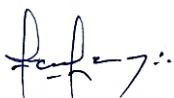
**2025**

## CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

### - FACULTAD DE INGENIERÍA -

- Investigador:** Mercy Fiorela Vásquez Carrión  
**DNI:** 73196775  
**Escuela Profesional:** Ingeniería Geológica
- Asesor:** Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado  
**Facultad:** Ingeniería
- Grado académico o título profesional**  
 Bachiller       Título profesional       Segunda especialidad  
 Maestro       Doctor
- Tipo de Investigación:**  
 Tesis       Trabajo de investigación       Trabajo de suficiencia profesional  
 Trabajo académico
- Título de Trabajo de Investigación:**  
  
"COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL VOLCÁNICO RUMIORCO DEL KM 2+000 AL KM 5+000 DE LA CARRETERA SANTA APOLONIA - CUMBE MAYO, CAJAMARCA"
- Fecha de evaluación:** 23/07/2025
- Software antiplagio:**       TURNITIN       URKUND (OURIGINAL) (\*)
- Porcentaje de Informe de Similitud:** 6%
- Código Documento:** trn:oid :::3117:475846001
- Resultado de la Evaluación de Similitud:**  
 APROBADO     PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 23 de Julio de 2025



**FIRMA DEL ASESOR**

**Nombres y Apellidos**  
**Dr. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado**  
**DNI: 26722961**



Firmado digitalmente por:  
BAZAN DIAZ Laura Sofia  
FAU 20148258601 soft  
Motivo: En señal de  
conformidad  
Fecha: 23/07/2025 21:11:04-0500

**UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI**



**ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.**

TITULO : *COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL VOLCÁNICO RUMIORCO DEL KM 2+000 AL KM 5+000 DE LA CARRETERA SANTA APOLONIA - CUMBE MAYO, CAJAMARCA.*

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

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0432-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 31 de julio de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **ocho días del mes de agosto de 2025**, siendo las diez horas (10:00 a.m.) en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica (Ambiente 4J - 210), de la Facultad de Ingeniería se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

- Presidente : Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
- Vocal : Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.
- Secretario : M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada *COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL VOLCÁNICO RUMIORCO DEL KM 2+000 AL KM 5+000 DE LA CARRETERA SANTA APOLONIA - CUMBE MAYO, CAJAMARCA*, presentado por la Bachiller en Ingeniería Geológica *MERCY FIORELA VÁSQUEZ CARRIÓN*, asesorada por el Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado, para la obtención del Título Profesional

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

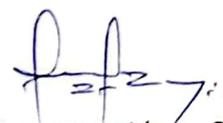
EVALUACIÓN PRIVADA : *05.00* PTS.  
 EVALUACIÓN PÚBLICA : *11.00* PTS.  
 EVALUACIÓN FINAL : *16.00* PTS. *Dieciséis* (En letras)

En consecuencia, se la declara *APROBADA* con el calificativo de *Dieciséis* acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las *11.00* horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

  
 Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.  
 Presidente

  
 Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.  
 Vocal

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

  
 Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.  
 Asesor

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por ser mi guía, fortaleza y la luz en mi camino a mi alma máter, la Universidad Nacional de Cajamarca, mi centro de formación académica y en dónde se quedaron impregnados los más grandes aprendizajes de mi vida.

A mi asesor, Dr. Reinaldo Rodríguez Cruzado, que con su experiencia y conocimientos me guio de manera idónea para desarrollar la presente tesis.

A mi abuelita, Julia, por su cuidado y dedicación en mi infancia, por su ejemplo de resiliencia y valentía, y por los valores inculcados. A mis padres por su amor y apoyo incondicional que me brindaron siempre, para cumplir mis objetivos y metas.

*M.F.V.C*

## **DEDICATORIA**

A mis padres Lidia y Mario, que son pilar fundamental en mi vida, que con su ejemplo y valores, forjaron en mí, la persona que soy ahora, a mi ángel del cielo Luis Armando, que siempre está guiándome y protegiéndome en cada paso que doy.

A mis hermanitos Juliet y Jacob, que son mi motivación e inspiración para seguir adelante.

A mi tía Esther por ser mi guía y soporte en momentos de dificultad, y a mi primo Jhon, porque siempre está presto a escucharme y ayudarme de manera desinteresada.

*M.F.V.C*

## ÍNDICE

Pág.

AGRADECIMIENTO .....	i
DEDICATORIA .....	ii
ÍNDICE .....	iii
LISTA DE TABLAS .....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE ABREVIATURAS .....	xiv
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT .....	xvi

### CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

### CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	3
2.1.1 Antecedentes Internacionales.....	3
2.1.2 Antecedentes Nacionales.....	4
2.1.3 Antecedentes Locales .....	4
2.2 BASES TEÓRICAS .....	5
2.2.1 Sensoramiento Remoto .....	5
2.2.2 Unidades Morfogenéticas.....	5
2.2.3 Suelos Volcánicos.....	6
2.2.4 Comportamiento Geotécnico de Suelos Volcánicos.....	6
2.2.5 Estudio Geotécnico para Carreteras .....	7
2.2.6 Exploración Geotécnica para Carreteras.....	7
2.2.7 Mecánica de Suelos.....	8
2.2.8 Parámetros físicos del Suelos.....	8
2.2.9 Clasificación de los Suelos .....	11
2.2.10 Mecánica de Rocas .....	18
2.2.11 Ensayos de Laboratorio .....	27
2.2.12 Parámetros geotécnicos.....	29
2.2.13 Capacidad Portante.....	30
2.2.14 Asentamiento de Suelos.....	31

	Pág.
2.2.15 Expansión en suelos.....	35
2.2.16 Sobrecargas.....	37
2.2.17 Hidrología .....	39
2.2.19 Sismicidad .....	40

### CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	42
3.1.1 Geográfica .....	42
3.1.2 Política .....	42
3.1.3 Accesibilidad.....	43
3.1.4 Clima y Vegetación.....	43
3.3 METODOLOGÍA .....	44
3.2.1 Tipo, Nivel, Diseño y Método de Investigación.....	44
3.2.2 Población .....	44
3.2.3 Muestra .....	44
3.2.4 Unidad De Análisis .....	44
3.2.5 Definición de Variables.....	45
3.2.6 Técnicas e Instrumentos de recolección de datos .....	45
3.2.7 Análisis e interpretación de datos .....	45
3.3 GEOLOGÍA LOCAL.....	46
3.3.1 Formación Farrat (Ki-fa) .....	46
3.3.2 Formación Inca (Ki- in) .....	46
3.3.3 Formación Chúlec (Ki-chu).....	47
3.3.4 Volcánico Rumioco (Po-Ru/03) .....	47
3.4 UNIDADES MORFOGENÉTICAS .....	48
3.4.1 Planicies (0° - 8°).....	48
3.4.2 Lomada (8° -20°).....	49
3.4.3 Laderas (20°-50°).....	49
3.4.4 Escarpas (>50°).....	50
3.5 HIDROLOGÍA .....	51
3.5.1 Precipitación .....	52
3.6 COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO .....	53

3.6.1 Caracterización Geotécnica..... 53

**CAPITULO IV**  
**ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

4.1 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS..... 136  
4.1.1 Parámetros Geotécnicos en Suelos..... 138  
4.1.2 Parámetros Geotécnicos en Rocas ..... 142  
4.2 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS ..... 145

**CAPÍTULO V**  
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1 CONCLUSIONES..... 146  
5.2 RECOMENDACIONES..... 147  
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 148

**ANEXOS 01**

**Planos**

- Plano 01. Imagen Satelital
- Plano 02. Plano de Ubicación
- Plano 03. Modelo Digital de Elevaciones (MDE)
- Plano 04. Plano Geológico
- Plano 05. Unidades Morfogenéticas
- Plano 06. Plano Geotécnico

**ANEXOS 02**

**Panel Fotográfico**

**ANEXOS 03**

**Formatos de Clasificación de Rocas Volcánica**

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de Unidades Morfogenéticas	5
Tabla 2. Clasificación AASHTO	12
Tabla 3. Subrasante según índice de grupo	14
Tabla 4. Prefijos y Sufijos según SUCS	14
Tabla 5. Correlación de SUCS Y AASHTO	17
Tabla 6. Índice de Calidad RMR	21
Tabla 7. Parámetros de Clasificación RMR	22
Tabla 8. Clasificación según el índice de calidad de la roca (RQD)	23
Tabla 9. Métodos de Análisis de Estabilidad	26
Tabla 10. Ensayos de Laboratorio	27
Tabla 11. Parámetros geotécnicos	29
Tabla 12. Límites tolerables para Asentamientos	34
Tabla 13. Clasificación de Suelos Expansivos	36
Tabla 14. Clasificación según grado de expansión propuesto por diversos autores	36
Tabla 15. Datos para estimar el cambio volumétrico en materiales expansivos	37
Tabla 16. Potencial de expansión en función a su índice de plasticidad y Límite líquido	37
Tabla 17. Peso máximo permitido por configuración de eje simple o conjunto de ejes.	38
Tabla 18. Ubicación Geográfica del área de Investigación	42
Tabla 19. Ruta de Accesibilidad	43
Tabla 20. Tipo, Nivel y Diseño de la Investigación	44
Tabla 21. Definición de Variables	45
Tabla 22. Cuadro de Precipitaciones comprendidas en el periodo 2020-2024	52
Tabla 23. Puntos de Control de las estaciones geotécnicas	53
Tabla 24. Análisis Granulométrico de la muestra 1 (M1) de la calicata N°1 en la progresiva Km 2+000 a una profundidad de 0.50m, según las Normas (NTP 339.128 , ASTM D 422 , MTC E 107)	55
Tabla 25. Contenido de humedad en la Muestra 1 de la Calicata N°1 en la Progresiva Km 2+000	57
Tabla 26. Análisis Granulométrico de la muestra 2 (M2) de la calicata N°1 en la progresiva Km 2+000 a una profundidad de 1.20m, según las Normas (NTP 339.128, ASTM D 422, MTC E 107)	58
Tabla 27. Contenido de humedad en la Muestra 2 de la Calicata N°1 en la Progresiva Km 2+000	60

	Pág.
Tabla 28. Potencial de expansión de la muestra 1 de Calicata N°1	66
Tabla 29. Potencial de expansión de la muestra 2 de Calicata N°1	66
Tabla 30. Valoración del macizo Rocoso del punto de control geotécnico N°2	68
Tabla 31. Parámetros de entrada y salida del RocData en la progresiva Km 2+800 (PC-02)	70
Tabla 32. Factor de Seguridad en el PC-02 según los diversos métodos	74
Tabla 33. Análisis Granulométrico de la muestra 1 (M1) de la calicata N°2 en la progresiva Km 3+550 a una profundidad de 0.50m, según las Normas (NTP 339.128, ASTM D 422, MTC E 107)	82
Tabla 34. Contenido de humedad en la Muestra 1 de la Calicata N°2 en la Progresiva Km 3+550	83
Tabla 35. Análisis Granulométrico de la muestra 2 (M2) de la calicata N°2 en la progresiva Km 3+550 a una profundidad de 1.20m, según las Normas (NTP 339.128, ASTM D 422, MTC E 107)	84
Tabla 36. Contenido de humedad en la Muestra 2 de la Calicata N°2 en la Progresiva Km 3+550	86
Tabla 37. Potencial de Expansión de la muestra 1 de la Calicata N°2	92
Tabla 38. Potencial de Expansión de la muestra 2 de la Calicata N°2	92
Tabla 39. Valoración del macizo Rocoso del punto de control geotécnico N°4	94
Tabla 40. Parámetros de entrada y salida del RocData en la progresiva Km 4+200 (PC-04)	96
Tabla 41. Factor de Seguridad en el PC-04 según los diversos métodos	100
Tabla 42. Análisis Granulométrico de la muestra 1 (M1) de la calicata N°3 en la progresiva Km 4+920 a una profundidad de 0.50m, según las Normas (NTP 339.128, ASTM D 422, MTC E 107)	108
Tabla 43. Contenido de humedad en la Muestra 1 de la Calicata N°3 en la Progresiva Km 4+920	110
Tabla 44. Análisis Granulométrico de la muestra 1 (M2) de la calicata N°3 en la progresiva Km 4+920 a una profundidad de 0.50m, según las Normas (NTP 339.128, ASTM D 422, MTC E 107)	111
Tabla 45. Contenido de humedad en la Muestra 2 de la Calicata N°3 en la Progresiva Km 4+920	113
Tabla 46. Potencial de expansión de la muestra 1 de Calicata N°3	119
Tabla 47. Potencial de expansión de la muestra 2 de Calicata N°3	119
Tabla 48. Valoración del macizo Rocoso del punto de control geotécnico N°6	121
Tabla 49. Parámetros de entrada y salida del RocData en la progresiva Km 5+000 (PC-06)	123
Tabla 50. Factor de Seguridad en el PC-04 según los diversos métodos	127

	Pág.
Tabla 51. Determinación de coeficientes sísmicos para suelos y rocas.	134
Tabla 52. Resultados de la caracterización geotécnica en los puntos de control	136
Tabla 53. Parámetros Geotécnicos en la progresiva km 2+000 (PC-01)	137
Tabla 54. Parámetros Geotécnicos en la progresiva km 2+800 (PC-02)	137
Tabla 55. Parámetros Geotécnicos en la progresiva km 3+550 (PC-03)	137
Tabla 56. Parámetros Geotécnicos en la progresiva km 4+200 (PC-04)	137
Tabla 57. Parámetros Geotécnicos en la progresiva km 4+920 (PC-05)	137
Tabla 58. Parámetros Geotécnicos en la progresiva km 5+000 (PC-06)	137
Tabla 59. Resultados de las muestras en la calicata 1	138
Tabla 60. Resultados de las muestras en la calicata 2	138
Tabla 61. Resultados de las muestras en la calicata 3	139
Tabla 62. Potencial de expansión con las muestras obtenidas de los ensayos de laboratorios	140
Tabla 63. Parámetros de Asentamientos de las Muestras de las tres Calicatas	141
Tabla 64. Parámetro de Sismicidad para Rocas	141
Tabla 65. Resultados del Análisis Estereográfico – Cinemático de los Taludes	142
Tabla 66. Coeficientes de Sismicidad horizontal y vertical según la zona sísmica.	142
Tabla 67. Rangos de Factores de Seguridad, recomendados por Hoek, 2007.	143
Tabla 68. Resultados del Factor de seguridad según los Métodos de Equilibrio Límite en los Puntos de Control	144

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Suelos de origen volcánico	6
Figura 2. Elemento de suelo en estado natural. (b) Modelo trifásico del suelo	8
Figura 3. Rango de índice de plasticidad y límite líquido en los diversos grupos	13
Figura 4. Clasificación de suelos finos según su grado de plasticidad	15
Figura 5. Sistema de Clasificación SUCS	16
Figura 6. Envolvente de Morh Coulomb	18
Figura 7. Tipos de Ruptura en Roca y la Representación Estereográfica de discontinuidades	20
Figura 8. Relación entre el RQD y espaciamiento de discontinuades.	23
Figura 9. Cuantificación GSI	24
Figura 10. Parámetros característicos del suelo	28
Figura 11. Falla por capacidad de carga en una cimentación rígida.	30
Figura 12. Tipos de asentamientos	32
Figura 13. Clasificación de cambio de volumen según su actividad	35
Figura 14. División del territorio nacional en cuatro zonas sísmicas de acuerdo al RNE, (2006). Modificado, (2018) . Norma E.030.	40
Figura 15. Quebrada Dos Aguas, afluente de la quebrada Calispuquio.	51
Figura 16. Registro de Excavación de la Calicata N°1 (PC-01) en la progresiva Km 2+000	54
Figura 17. Curva Granulométrica de la muestra 1 (M1) de la calicata N°1 en la progresiva Km 2 +000	56
Figura 18. Límites de Atterberg de la muestra 1, de la calicata N°1 en la progresiva Km+200	57
Figura 19. Curva Granulométrica de la muestra 2 (M2) de la calicata N°1 en la progresiva Km 2+000.	59
Figura 20. Límites de Atterberg de la muestra 2, de la calicata N°1 en la progresiva Km 2+000	60
Figura 21. Asentamiento en la Calicata N°1 en estado natural.	61
Figura 22. Asentamiento en la Calicata N°1 con una sobrecarga de 60 kN/m <sup>2</sup>	62
Figura 23. Análisis de Isosuperficie con el Módulo edómetro con la sobrecarga en la Calicata N°1, el máximo asentamiento esde 3.6mm y máxima profundidad de zona de influencia es 5.60m.	63
Figura 24. Asentamiento de la calicata N°1 con sobrecarga más saturación.	64

	Pág.
Figura 25. Análisis de Isosuperficie con el Módulo edómetro con sobrecarga y saturación en la calicata N°1, el máximo asentamiento es de 2.8 mm y máxima de zona de influencia es 2.29m.	65
Figura 26. Sistema de Clasificación de Hoek-Brown . macizo rocoso presenta GSI 52.	69
Figura 27. Método equivalencia de áreas – RocData, en función de esfuerzos principales: Mayor vs. Menor (H-B) y esfuerzo: Corte y normal (M-C)	70
Figura 28. Análisis de discontinuidades del PC-02, usando software Dips. (a)Análisis de tendencias principales con gráfico de rosetas. (b)Análisis de familias principales y de los planos.	71
Figura 29. (c)Análisis cinemático PC-02, presenta rotura en cuña 4.55%.	72
Figura 30. (d) Análisis cinemático PC-02, presenta rotura en vuelco Oblicuo 19.70%.	73
Figura 31. Punto de control PC-02, dimensiones del Talud	74
Figura 32. Factor de seguridad PC-02 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Totales.	75
Figura 33. Factor de seguridad PC-02 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Totales.	76
Figura 34. Factor de seguridad PC-02 por método de Gle /Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Totales.	77
Figura 35. Factor de seguridad PC-02 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.	78
Figura 36. Factor de seguridad PC-02 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad	79
Figura 37. Factor de seguridad PC-02 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad	80
Figura 38. Registro de Excavación de la Calicata N°2 (PC-03) en la progresiva Km 3+550	81
Figura 39. Curva Granulométrica de la muestra 1 (M1) de la calicata N°2 en la progresiva Km 3 +550	83
Figura 40. Curva Granulométrica de la muestra 2 (M2) de la calicata N°2 en la progresiva Km 3 +550	85
Figura 41. Límites de Atterberg de la muestra 2, de la calicata N°2 en la progresiva Km 3+550	86
Figura 42. Asentamiento en la Calicata N°2 en estado natural.	87
Figura 43. Asentamiento en la Calicata N°2 con una sobrecarga de 60 kN/m <sup>2</sup> .	88

	Pág.
Figura 44. Análisis de Isosuperficie con el Módulo edómetro con la sobrecarga en la Calicata N°2, el máximo asentamiento es de 9.1mm y máxima profundidad de zona de influencia es 5.71m.	89
Figura 45. Asentamiento de la calicata N°2 con sobrecarga más saturación.	90
Figura 46. Análisis de Isosuperficie con el Módulo edómetro con sobrecarga y saturación en la calicata N°2, el máximo asentamiento es de 3.8 mm y máxima profundidad de zona de influencia es 2.30m.	91
Figura 47. Sistema de clasificación de Hoek-Brown, el macizo rocoso presenta GSI 50.	95
Figura 48. Método equivalencia de áreas – RocData, en función de esfuerzo principales: Mayor vs. Menor (H-B) y esfuerzo: Corte y normal (M-C), PC-04	96
Figura 49. Análisis de discontinuidades del PC-02, usando software Dips. (a) Análisis de tendencias principales con gráfico de rosetas. (b) Análisis de familias principales y de los planos	97
Figura 51. (c) Análisis Cinemático PC-04, no presenta rotura en cuña 0.0%.	98
Figura 50. (d) Análisis Cinemático PC-04, presenta rotura en vuelco 83.33%.	99
Figura 52. Punto de control PC-04, dimensiones del Talud	100
Figura 53. Factor de seguridad PC-04 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Totales	101
Figura 54. Factor de seguridad PC-04 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Totales.	102
Figura 55. Factor de seguridad PC-04 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Totales.	103
Figura 56. Factor de seguridad PC-04 por método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad	104
Figura 57. Factor de seguridad PC-04 por método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad	105
Figura 58. Factor de seguridad PC-04 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad	106
Figura 59. Registro de Excavación de la Calicata N°3 (PC-05) en la progresiva Km 4+920	107
Figura 60. Curva Granulométrica de la muestra 1 (M1) de la calicata N°3 en la progresiva Km 4+920	109
Figura 61. Límites de Atterberg de la Muestra 1 de la Calicata N°3 en la Progresiva 4+920	110
Figura 62. Curva Granulométrica de la muestra 2 (M2) de la calicata N°3 en la progresiva Km 4+920	112

	Pág.
Figura 63. Límites de Atterberg de la Muestra 2 de la Calicata N°3 en la Progresiva Km 4+920.	113
Figura 64. Asentamiento en la Calicata N°3 en estado natural.	114
Figura 65. Asentamiento en la Calicata N°3 con una sobrecarga de 60 kN/m <sup>2</sup>	115
Figura 66. Análisis de Isosuperficie con el Módulo edómetro con la sobrecarga en la Calicata N°3, el máximo asentamiento es de 8.7 mm y máxima profundidad de zona de influencia es 5.71m.	116
Figura 67. Asentamiento de la calicata N°3 con sobrecarga más saturación.	117
Figura 68. Análisis de Isosuperficie con el Módulo edómetro con sobrecarga y saturación en la calicata N°3, el máximo asentamiento es de 3.4 mm y máxima profundidad de zona de influencia es 2.30m.	118
Figura 69. Sistema de clasificación de Hoek-Brown, el macizo rocoso presenta GSI 59.	122
Figura 70. Método equivalencia de áreas – RocData, en función de esfuerzo principales: Mayor vs. Menor (H-B) y esfuerzo: Corte y normal (M-C), PC-06	123
Figura 71. Análisis de discontinuidades del PC-02, usando software Dips. (a) Análisis de tendencias principales con gráfico de rosetas. (b) Análisis de familias principales y de los planos.	124
Figura 72. (c) Análisis Cinemático del PC-06, presenta rotura en cuña 19.05%.	125
Figura 73. (d) Análisis Cinemático del PC-06, rotura por vuelco directo 42,86%.	126
Figura 74. Estación PC-06, dimensiones del Talud.	127
Figura 75. Factor de seguridad PC-06 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Totales.	128
Figura 76. Factor de seguridad PC-06 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Totales.	129
Figura 77. Factor de seguridad PC-06 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Totales.	130
Figura 78. Factor de seguridad PC-06 por método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad	131
Figura 79. Factor de seguridad PC-06 por método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.	132
Figura 80. Factor de seguridad PC-06 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad	133
Figura 81. Determinación de Coeficientes de Sismicidad para rocas en el Loadcap.	135
Figura 82. Determinación de Coeficiente de Sismicidad para suelos en el Loadcap.	135

## LISTA DE FOTOS

	Pág.
Foto 1. Cobertura Vegetal de Eucaliptos y Pinos.	43
Foto 2. Contacto Litológico entre las Formaciones Inca y Chúlec, en el	46
Foto 3. Calizas intercaladas con arcillolitas de la Formación Chúlec	47
Foto 4. Macizo rocoso riolítico ligeramente meteorizado y diaclasado.	47
Foto 5. Planicie ligeramente ondulada con poca erosión y con un ángulo de pendiente de 6° aproximadamente.	48
Foto 6. Lomada con un ángulo de pendiente 18°, formados por procesos denudativos y erosivos en depósitos coluvio aluviales.	49
Foto 7. Ladera con un ángulo aproximado de 40°, en el margen derecho de la carretera en la progresiva Km 4+920.	50
Foto 8. Escarpe con una pendiente elevada aproximada de 65°.	50
Foto 9. Vista Panorámica de la Quebrada Dos Aguas. Coordenadas: E: 773408 N: 9206146	52
Foto 10. Roca volcánica Dacita, ubicada en el lado derecho de la carretera Santa Apolonia- Cumbe Mayo, en la progresiva km 2+800; constituida por tres discontinuidades que conforman el macizo rocoso del talud.	67
Foto 11. Roca volcánica Dacita, ubicada en el lado derecho de la carretera Santa Apolonia-Cumbe Mayo, en la progresiva 04+200, conformando un medio discontinuo.	93
Foto 12. Roca volcánica Dacita, ubicada en el flanco derecho de la carretera Santa Apolonia – Cumbe Mayo, en la progresiva km 5+000, constituida por tres discontinuidades definiendo medio discontinuo, que conforman el macizo rocoso del talud.	120

## LISTA DE ABREVIATURAS

Po-ru/03	:	Centro Volcánico Rumiorco
SUCS	:	Sistema unificado de clasificación de suelos
AASTHO	:	American Association of State Highway and Transportation Officials
LL	:	Límite Líquido
IG	:	Índice de grupo
IP	:	Índice plástico
LP	:	Límite plástico
G	:	Grava
S	:	Arena
M	:	Limo
C	:	Arcilla
RMR89	:	Sistema de Clasificación Geomecánica (Rock Mass Rating)
RQD	:	Designación de la Calidad de la Roca (Rock Quality Designation)
GSI	:	Índice de Resistencia Geológica (Geological Strength Index)
$\sigma_{ci}$	:	Resistencia a la compresión uniaxial del bloque de roca Intacta
$c'$	:	Cohesión
$\phi'$	:	Ángulo de Fricción interna
FS	:	Factor de Seguridad
Kh	:	Aceleración máxima horizontal
Kv	:	Aceleración máxima vertical
ASTM	:	American Society for Testing and Materials
OSINERMINING:		Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería
MVCS	:	Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento
MTC	:	Ministerio de Transporte y Comunicaciones

## RESUMEN

La investigación se realizó en la carretera Santa Apolonia Cumbe Mayo en el Tramo km 2+000 al km 5+000, ubicada al suroeste de la ciudad de Cajamarca. La carretera se encuentra sobre el Volcánico Rumiorco, teniendo pequeños afloramientos de la Formación Farrat en la parte SE y la Formación Chúlec e Inca en el lado NW; además de rocas volcánicas pertenecientes al Centro Volcánico Rumiorco. Donde se evidencia sectores críticos, debido que existe un inadecuado comportamiento geotécnico, por la interacción de factores detonantes como: la precipitación, la infiltración, sismicidad, sobrecarga y expansión, alterando las propiedades físicas de los suelos y rocas; siendo el objetivo principal analizar el comportamiento geotécnico de las zonas críticas. Para ello, se realizó seis (6) estaciones, determinando los diversos parámetros geomecánicos, tanto de las rocas como de los suelos. Para las estaciones conformadas por rocas, se caracterizó según el método Rock Mass Rating (RMR - Bieniawski 1989), Rock Quality Designation (RQD - Deere 1967) y Geological Strength Index (GSI - Hoek 1994), y para los suelos se realizó tres (3) calicatas para un total de 6 muestras, para su posterior análisis en el laboratorio y clasificación según SUCS Y ASSHTO, predominando Roca Tipo III (regular) y suelos con expansibilidad baja y asentamiento tolerable. En conclusión, el estudio del comportamiento geotécnico de suelos y rocas, determina las características y propiedades que estos poseen, los cuales brindan información certera para el mejoramiento de la subrasante de la carretera, con fines de construcción, y que servirá como guía, para obras de carácter ingenieril e infraestructura vial.

**Palabras Clave:** Comportamiento Geotécnico, Volcánico Rumiorco, Sismicidad, Infiltración, Sobrecarga y expansión.

## **ABSTRACT**

The research was carried out on the Santa Apolonia Cumbe Mayo highway in the section km 2+000 to km 5+000, located southwest of the city of Cajamarca. The road is located on the Rumiorco Volcanic, having small blooms of the Farrat formation in the SE part and the Chulec and Inca formation on the NW side; in addition to volcanic rocks belonging to the Rumiorco Volcanic Center. Where critical sectors are evident, due to an inadequate geotechnical behavior, due to the interaction of triggering factors such as: precipitation, infiltration, seismicity, overload and expansion, altering the physical properties of soils and rocks; the main objective being to analyze the geotechnical behavior of critical areas. For this, six (6) stations were made, determining the various geomechanical parameters, both of the rocks and soils. For the stations made up of rocks, it was characterized according to the Rock Mass Rating method (RMR - Bieniawski 1989), Rock Quality Designation (RQD - Deere 1967) and Geological Strength Index (GSI - Hoek 1994), and for the soils three (3) test pits were made for a total of 6 samples, for their subsequent analysis in the laboratory and classification according to SUCS and ASSHTO, predominating Rock Type III (regular) and soils with low expandability and tolerable settlement. In conclusion, the study of the geotechnical behavior of soils and rocks determines the characteristics and properties that they possess, which provide accurate information for the improvement of the road subgrade, for construction purposes, and which will serve as a guide for engineering works and road infrastructure.

**Keywords:** Geotechnical Behavior, Rumiorco Volcanic, Seismicity, Infiltration, Overburden and Expansion

## **CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN**

El estudio del comportamiento geotécnico en una carretera, es fundamental para garantizar la estabilidad de infraestructuras viales particularmente en suelos y rocas de origen volcánico, ya que, estos poseen propiedades mecánicas complejas y variables. En este contexto, la zona de estudio se localiza entre las progresivas del Km 2+000 al Km 5+000 de la carretera Santa Apolonia-Cumbe Mayo, políticamente ubicada en el Distrito de Cajamarca, Provincia de Cajamarca, con una altitud promedio de 3200 msnm, donde se encuentran rocas volcánicas, constituidas por flujos piroclásticos, de pómez y cenizas, predominando principalmente dacitas con coloraciones blanquecinas, moderadamente meteorizadas y con cierto grado de fracturamiento, estructuralmente pertenecientes al Centro Volcánico Rumiorco (Po-ru/03), las cuales presentan propiedades de baja densidad y alta porosidad primaria, por lo que se considera como suelo de cimentación con condiciones de asentamiento y expansión por la presencia de arcillas provenientes de la meteorización del volcánico. Por ello, se formula la siguiente interrogante; ¿Cuál es el comportamiento geotécnico del Volcánico Rumiorco en la carretera Santa Apolonia - Cumbe Mayo del km 2+000 al km 5+000, Cajamarca?

Se planteó como hipótesis, que la inestabilidad geotécnica en carreteras es originada por el asentamiento y expansión de los suelos, resultado de la precipitación e infiltración, así como, del fracturamiento y porosidad primaria presentes en rocas; además, de las sobrecargas por peso vehicular y sismicidad, provocando cambios significativos en la resistencia y la capacidad portante del terreno de fundación de la carretera.

La presente investigación se justifica, debido a que la zona presenta sectores críticos de inestabilidad, por lo tanto, es de suma importancia, realizar un estudio de parámetros geotécnicos de rocas y suelos, para determinar las características y propiedades que estos poseen, los cuales, brindarán información certera para el mejoramiento de la subrasante de la carretera, con fines de construcción, y que servirá como guía, para obras de carácter ingenieril y vial.

El tipo de investigación, es de alcance descriptivo, correlacional y explicativo, teniendo como objetivo principal determinar el comportamiento geotécnico del Volcánico Rumiorco del Km 2+000 al Km 5+000 de la carretera Santa Apolonia- Cumbe Mayo, Cajamarca; objetivos específicos: realizar el cartografiado geológico y geotécnico, realizar la caracterización geomecánica de las rocas existentes en el área de investigación, obtener muestras de las calicatas en la plataforma de la carretera en estudio, analizar las propiedades mecánicas de los suelos a través de ensayos geotécnicos de laboratorio, determinar los parámetros geotécnicos del volcánico Rumiorco.

La tesis comprende los siguientes capítulos: en el Capítulo I, presenta la introducción de la investigación, que abarca la formulación del problema, la hipótesis, la justificación, el alcance, los objetivos principales y específicos. El Capítulo II, comprende los antecedentes teóricos de la investigación, bases teóricas y definición de términos básicos. El Capítulo III, materiales y métodos, detalla, la ubicación de la investigación, accesibilidad, clima, vegetación, geomorfología, geología local, geología estructural, geotecnia. Así mismo, se muestran los procedimientos de la investigación, que comprende la metodología a emplear, definición de variables, técnicas e instrumentos y equipos empleados. Capítulo IV, abarca la descripción y discusión de resultados, así como también, la contrastación de hipótesis, y finalmente el Capítulo V, presenta las conclusiones y recomendaciones.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN**

##### **2.1.1 Antecedentes Internacionales**

Gómez (2018), en su Tesis Doctoral: “Comportamiento geotécnico de suelos arcillosos compactados, respuesta a cargas estáticas y dinámica”, realiza el estudio de las condiciones de compactación, cambios de volumen, relación tenso-deformacional, propiedades de resistencia, compresibilidad y permeabilidad, con el fin de mejorar las propiedades geotécnicas de los materiales tales como, aumentar la resistencia, reducir o minimizar los asentos, el potencial expansivo y la disminución de la permeabilidad.

Cobos et al. (2019), en su estudio de investigación, “Caracterización del comportamiento geotécnico de suelos de origen volcánico estabilizados con cenizas provenientes de cáscara de coco y cisco de café”, señalaron que, al remodelar el suelo se observan cambios significativos en sus propiedades mecánicas, lo que indica que el suelo simplemente consolidado no tiene la capacidad portante suficiente para resistir una carga determinada pero que al cambiar el método estabilizador hace que aumente su compactación y por ende mejore su capacidad portante. Por lo tanto, las cenizas de cáscaras de coco y cisco de café funcionan como material conglomerante que permite potenciar las propiedades del suelo, ya que al adicionarle el 15% de biomasa se logran porcentajes de compactación promedio cercanos y superiores al 100%, de este modo, se considera como una buena alternativa que permite el mejoramiento de subrasantes a un costo menor.

Colmenares et al. (2020), en su “Estudio sobre los parámetros de sensibilidad y compresibilidad de suelos derivados de cenizas volcánicas en el área de expansión de Pereira”, determinan que los límites de consistencia pueden alcanzar valores significativamente altos y según la clasificación SUCS son suelos (MH) limos de alta plasticidad. Por otro lado, indican que la relación de vacíos del material evaluado presentó

valores desde  $e=0.985$  hasta  $e=1.145$ , la cual es aceptable para suelos cohesivos, ya que, la relación de vacíos para este tipo de suelos va desde  $e=0.88$  hasta  $e=3.62$ . Lo que significa que las partículas del suelo tienen un bajo grado de acomodo, y no tienen un grado de compactación óptimo.

### **2.1.2 Antecedentes Nacionales**

Polinario (2021) en su tesis, “Mejoramiento del suelo con clasificación SUCS GC-GM mediante la adición de ceniza volcánica en la ciudad de Arequipa”, indica que es relevante la adición de la ceniza volcánica en 5%, 7%, 9%, 11% y 13% para el mejoramiento de la subrasante con fines de cimentación o pavimentación, donde se tomará un suelo con clasificación SUCS GC-GM como referencia, bajo esta combinación incrementará su resistencia al corte, mediante el indicador de la capacidad portante y el grado de CBR.

González (2022), “Comportamiento geotécnico de suelos y rocas para cimentación de las torres T-246 A T-260 ,Línea de Transmisión Paquillusi – Onoccora Provincia de Sicuani – Departamento Cusco, en su tesis, señala que tanto los depósitos cuaternarios como las rocas deben ser analizados geomecánicamente para determinar el comportamiento geotécnico frente a las condiciones de cargas de cimentación constituidas por asentamientos principalmente verticales, para ello realizó clasificación RQD,GSI, RMR para rocas y para suelos utilizo la clasificación SUCS, determinando con ello las diferentes propiedades geotécnicas y la resistencia del suelo.

### **2.1.3 Antecedentes Locales**

Medina (2022), en su tesis , “ Inestabilidad geotécnica de los depósitos cuaternarios entre las progresivas km 12+000 al km 15+000, en la cimentación de la carretera Pe-3n. Bambamarca – Amazonas”, determinó que la inestabilidad de los depósitos cuaternarios, está directamente relacionado a la precipitación, propiedades físico-mecánicas del suelo, además del material que conforma la vía; siendo las zonas más inestables las que contienen en su composición mayor porcentaje de material fino, por lo que disminuye considerablemente sus valores de resistencia a la deformación por cargas.

Miranda y Herrera (2022) en su tesis, Mejoramiento de suelos arcillosos, utilizando cal en la sub rasante de pavimentos, pasaje El Porvenir, sector el Parral, Jaén, Cajamarca, realizaron la clasificación de suelos mediante ensayos de laboratorio, comprobando que con una adición de cal del 12% al suelo natural el CBR incrementó, por lo que el nuevo valor de CBR al 100% de la MDS estabilizado fue de 15.50%.

## 2.2 BASES TEÓRICAS

### 2.2.1 Sensoramiento Remoto

El sensoramiento remoto son sistemas o instrumentos que sirven para captar información de un objeto a distancia. Es decir, se refiere a la adquisición de datos de la superficie terrestre con un sensor remoto, y al procesamiento e interpretación de esos datos. Las imágenes satelitales proporcionan información muy útil en el cartografiado geológico, ya que el carácter multispectral y digital de los sensores remotos ha dado lugar a los estudios espectrales que permiten discriminar determinadas litologías (Aguilera y Herrera, 2007).

### 2.2.2 Unidades Morfogenéticas

Según lo señalado por Rodríguez (2016), se consideran las siguientes unidades morfogenéticas de acuerdo a la cuantificación de su pendiente o geometría (Ver Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de Unidades Morfogenéticas

UNIDAD MORFOGENÉTICA	PENDIENTE (GEOMETRÍA)	DEFINICIÓN
Planicie	0° - 8°	Presenta una superficie homogénea. Usualmente se desarrollan actividades agrícolas y ganaderas. Se asocia a depósitos aluviales y fluvio-aluviales.
Lomada	8° - 20°	Se visualizan como geoformas de tendencia cóncava, con pendientes variables entre 8° a 20°, poseen baja altura.
Ladera	20°-50°	Se definen como geoformas con pendientes entre 20° a 50° y de composición litológica variable. Conforman cadenas montañosas.
Escarpa	> 50°	Geoforma que posee una inclinación mayor a 50°, representando un cambio brusco de nivel en el relieve.

Fuente: Obtenido de Rodríguez, (2016).

### 2.2.3 Suelos Volcánicos

Los suelos volcánicos, tienen su origen en materiales piroclásticos emanados durante las erupciones volcánicas, este tipo de depósitos, corresponden a suelos residuales formados a partir de la alteración física y química de cenizas volcánicas, por lo que su comportamiento queda definido por los siguientes factores: su estructura, tamaño de partículas y la mineralogía de arcillas presentes (Herrera, 2006). Ver Figura.1.

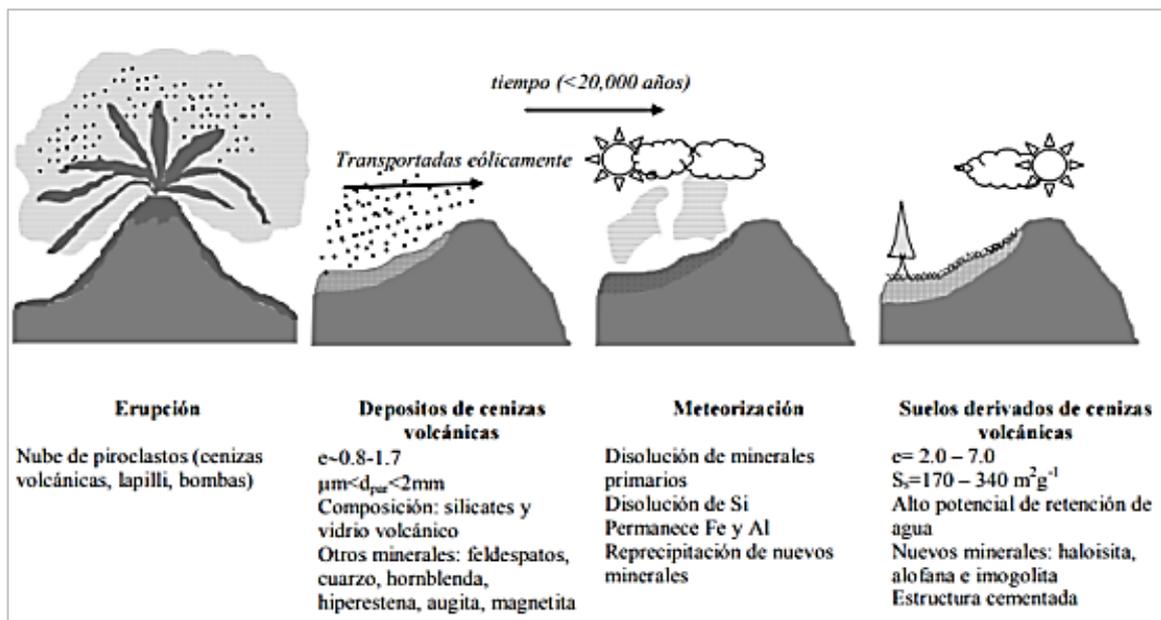


Figura 1. Suelos de origen volcánico  
Fuente: Tomado de Herrea, (2006).

### 2.2.4 Comportamiento Geotécnico de Suelos Volcánicos

El comportamiento geotécnico de los suelos volcánicos, es muy peculiar, con respecto al tradicional, ya que poseen, una gran capacidad de retención de agua, humedades naturales elevadas, bajas densidades, elevados ángulos de fricción y cambios en su estructura dependiendo el tipo de secado, es así que cuando esté en estado seco, se comportará como una arena, pero al estar en condiciones húmedas tendrá comportamiento plástico similar a una arcilla (Sanhueza et al., 2011).

La caracterización geomecánica en materiales arcillosos, es de gran relevancia, por lo cual el comportamiento geotécnico, está controlado más por las propiedades asociadas a la microfábrica que a la macroestructura. En este sentido, cabe señalar, que los estudios geotécnicos se direccionan a la caracterización de la macroestructura de los suelos y la

identificación de estos primordialmente alrededor de un análisis textural y esfuerzo – deformación a partir de respuestas básicamente mecánicas, olvidando que muchas de las respuestas en materiales finos se asocian a la composición química de los materiales y su microfábrica (Calderón, 2022).

Los estudios geotécnicos para el desarrollo de obras ingenieriles, se orientan en dos aspectos: el primero conocer las condiciones relacionadas con propiedades básicas de los suelos tales como sensibilidad, expansión, dispersividad, desgaste, entre otras, y el segundo aspecto, conocer las características respecto de la resistencia y deformación de los materiales geológicos relacionadas con el estado de alteración (meteorización) de geomateriales debido a la acción de factores medioambientales como precipitación, temperatura, viento, humedad relativa y acciones combinadas de estos factores, tales como erosión, sobrecarga, etc (Calderón, 2022).

### **2.2.5 Estudio Geotécnico para Carreteras**

Todo estudio geotécnico en carreteras debe iniciarse con un reconocimiento detallado del terreno, para luego programar la exploración. En esta etapa, mediante la observación de cortes naturales y artificiales será posible definir las principales unidades o estratos de suelos superficiales, delimitando zonas en las cuales los suelos presentan características similares e identificando áreas inestables o poco recomendables para emplazar la carretera. Tales áreas pueden comprender zonas de deslizamiento activo, laderas rocosas con fracturamiento, zonas pantanosas difíciles de drenar, etc (MTC, 2014).

### **2.2.6 Exploración Geotécnica para Carreteras**

La exploración geotécnica, inicia con la ejecución de calicatas, cuyo espaciamiento dependerá fundamentalmente de las características de los materiales subyacentes en el trazo de la vía, generalmente están espaciados 250 metros, pero pueden ser más próximas. De las calicatas realizadas; se obtiene muestras representativas en número y cantidades suficientes de suelos o de roca. Con las muestras obtenidas se efectúa ensayos en laboratorio y con los datos obtenidos se pasa a la fase de gabinete para consignar en forma gráfica y escrita los resultados obtenidos, asimismo, se determina un perfil estratigráfico de los suelos debidamente acotado en un espesor entre los 1,20.m a 1.50 m, teniendo como nivel superior la línea sub rasante del diseño geométrico vial y debajo de ella, espesores y tipos de suelos del terraplén y los del terreno natural, con indicación de sus

propiedades, características y parámetros básicos para el diseño del pavimento (MTC, 2014).

### 2.2.7 Mecánica de Suelos

La mecánica de Suelos, es una disciplina que se encarga del estudio de las propiedades físicas del suelo y su comportamiento mecánico al ser sometido a varios tipos de fuerzas. Así como también, es la aplicación de las leyes de la mecánica y la hidráulica a los problemas geotécnicos del terreno, con el fin de estudiar sus propiedades, el comportamiento y la utilización del suelo como material estructural, de tal manera que las deformaciones y resistencia de este ofrezcan seguridad, durabilidad y estabilidad a las estructuras (Duque y Escobar, 2016).

### 2.2.8 Parámetros físicos del Suelos

Para describir las características del suelo, se deben analizar las relaciones volumétricas y gravimétricas expresándolas como la mezcla de sólidos, agua y aire en términos de algunas propiedades físicas. Estas propiedades permiten diferenciar suelos de una misma categoría, condiciones de su estado y comportamiento físico (Bosch, 2017). Ver Figura 2.

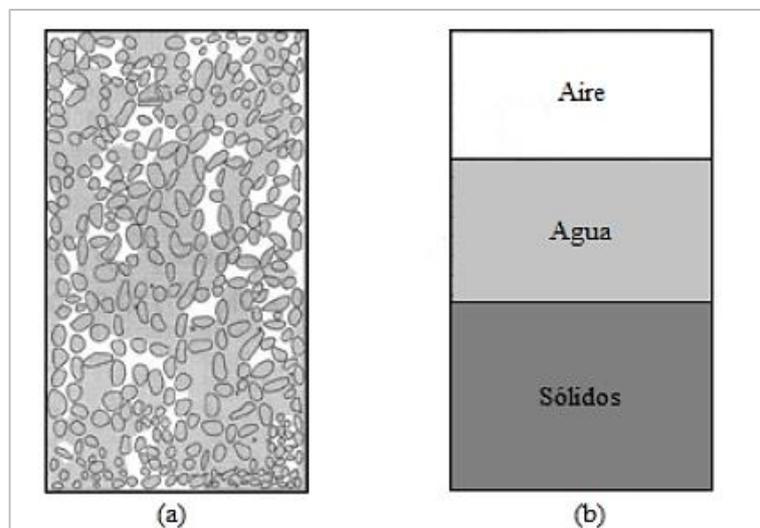


Figura 2. Elemento de suelo en estado natural. (b) Modelo trifásico del suelo  
Fuente: Tomado de Zapata,(2018).

○ ***Relaciones Volumétricas***

Las relaciones volumétricas están asociadas a la porosidad, índice de vacíos, grado de saturación, y volumen específico. (Bosch, 2017)

***Porosidad (n)***

La porosidad es la fracción de volumen ocupada por los poros con respecto al volumen total. Es un parámetro adimensional y se expresa como:

$$n = \frac{V_w + V_a}{V_t}$$

***Índice de vacíos (e)***

El índice de huecos se define como la relación entre el espacio ocupado por los poros y el espacio ocupado por las partículas sólidas. Es un parámetro adimensional y se expresa como:

$$e = \frac{V_w + V_a}{V_s}$$

***Grado de saturación (Sr)***

El grado de saturación es la fracción total de poros que está ocupada por agua, y se expresa como:

$$S_r = \frac{V_w}{V_w + V_a}$$

***Volumen específico***

Se denomina volumen específico al volumen que corresponde a la unidad de volumen de sólidos con sus poros, y se expresa como:

$$v = 1 + e$$

○ **Relaciones Másicas**

Las relaciones másicas están determinadas por peso específico de las partículas sólidas, peso específico relativo de las partículas sólidas, humedad, peso específico saturado, peso específico seco, peso específico aparente y peso específico sumergido. (Bosch, 2017)

**Peso específico de las partículas sólidas ( $\gamma_s$ )**

Se define como el peso por unidad de volumen de sólidos, y se expresa como:

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

**Peso específico relativo de las partículas sólidas (G)**

Es el peso específico de las partículas en relación al del agua, y se expresa como:

$$G = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

**Humedad (w)**

La humedad del suelo se define como la relación entre el peso del agua y el peso de suelo seco, y se expresa como:

$$w = \frac{W_w}{W_s}$$

**Peso específico saturado ( $\gamma_{sat}$ )**

Se define como el peso total del suelo entre su volumen total si se encontrara totalmente saturado, y se expresa como:

$$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_w(\gamma_s + e)}{1 + e}$$

**Peso específico seco ( $\gamma_d$ )**

Se define como el peso de las partículas sólidas entre el volumen total de suelo, y se expresa como:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1 + e}$$

### ***Peso específico aparente ( $\gamma$ )***

Se define como el peso total del suelo entre el volumen total, y se expresa como:

$$\gamma = \frac{\gamma_w(e)(\gamma_s + S_r)}{1 + e}$$

### ***Peso específico sumergido ( $\gamma'$ )***

Se define como el peso específico correspondiente al suelo sumergido, y se expresa como:

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

#### **2.2.9 Clasificación de los Suelos**

Según Duque y Escobar (2016), La diferencia entre cada tipo de suelo radica en su material de origen y el tamaño de partículas que la componen. Así tenemos:

##### **Suelos Granulares**

Se caracterizan por estar conformados por partículas de agregados, que no poseen cohesión por su gran tamaño. Se caracterizan por poseer alta capacidad portante y permeabilidad elevada. Están conformados por arenas y gravas.

##### **Suelos Cohesivos**

Son suelos con diámetros menores a 0.08 mm (SUCS). Su propiedad principal, es la cohesión.

##### **○ Sistema de Clasificación AASTHO**

La clasificación de suelos AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), se realiza en función a su distribución granulométrica, límite líquido e índice de plasticidad, de acuerdo a ello, se clasifica en siete grupos principales, los tres primeros A-1, A-2, A-3 conocidos como materiales granulares son los que el 35% o menos de partículas pasan el tamiz N°200, los grupos A-4, A-5, A-6, A-7 conocidos como material fino (limo y arcilla) son suelos que más de su 35% de partículas pasan el tamiz N° 200 (Braja.M.Das, 2013).

En la Tabla 2, se muestra la clasificación AASTHO, que divide a los suelos en siete grupos, subdivididos en subgrupos conocidos como suelos gruesos granulares y suelos finos limo arcillosos.

Tabla 2. Clasificación AASHTO

<b>Clasificación General</b>	<b>Materiales Granulares (35% O Menos De La Muestra Total Pasa La Malla Núm. 200)</b>						
<b>Clasificación de Grupo</b>	A-1			A-2			
	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
	Análisis por malla (% que pasa)						
Malla núm. 10	50 máx	-	-	-	-	-	-
Malla núm. 40	30 máx	50 máx	51 mín	-	-	-	-
Malla núm. 200	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35máx	35máx	35máx
	Para la fracción que pasa malla núm. 40						
Límite Líquido (LL)	-	-	-	40 máx	41mín	40máx	41mín
Índice de plasticidad (IP)	6 máx		No plástico	10 máx	10mín	11máx	11mín
Tipo usual de material	Fragmento de roca, grava o arena		Arena Fina	Grava y arena limosa o arcillosa			
Clasificación de la capa	Excelente a buena						
<b>Clasificación General</b>	<b>Materiales Limosos Arcillosos (Más De 35% De La Muestra Total Pasa La Malla Núm. 200)</b>						
<b>Clasificación de Grupo</b>	A-4		A-5		A-6		A-7
	A-7- 5 <sup>a</sup>						A-7-5 <sup>b</sup>
	Análisis por malla (% que pasa)						
Malla núm. 10	-		-		-		-
Malla núm. 40	-		-		-		-
Malla núm. 200	36 mín		36 mín		36 mín		36 mín
	Para la fracción que pasa malla núm. 40						
Límite Líquido (LL)	40 máx		41mín		40 máx		41mín
Índice de plasticidad (IP)	10 máx		10mín		11 máx		11mín
Tipo usual de material	Principalmente suelos limosos				Principalmente suelos arcillosos		
Clasificación subrasante	Regular a malo						
<sup>a</sup> Si IP<LL-30 ,la clasificación es A-7-5							
<sup>b</sup> Si IP>LL-30 ,la clasificación es A-7-6							

Fuente: Obtenido de Braja. M. Das, (2013).

En la figura 3, se muestra un gráfico del rango del límite líquido y el índice de plasticidad de los suelos que se dividen en los grupos A-2, A-4, A-5, A-6 y A-7.

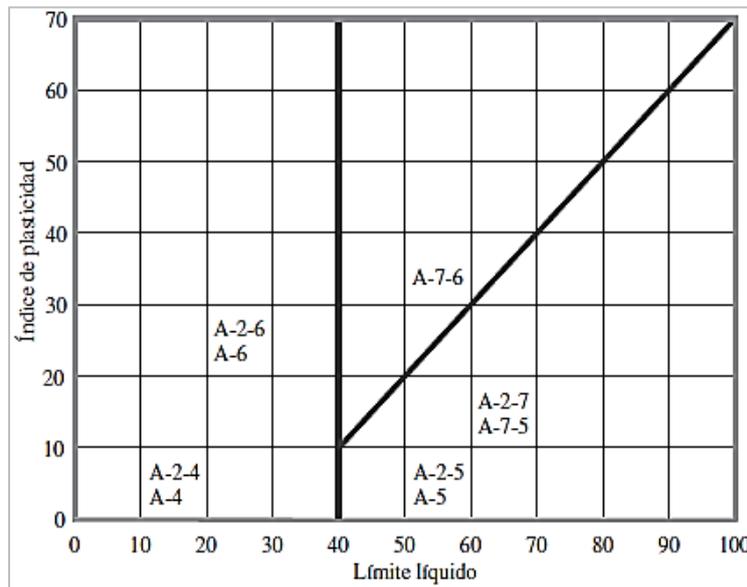


Figura 3. Rango de índice de plasticidad y límite líquido en los diversos grupos  
Fuente: Obtenido de Braja. M. Das, (2013).

Índice de Grupo (IG): es necesario para determinar la calidad relativa del material del suelo que se va a utilizar en construcciones como trabajos con tierra, terraplenes, subrasantes, subbases y bases.

Para la evaluación cualitativa de calidad relativa del material del suelo se utiliza la siguiente fórmula:

$$IG = (F200 - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F200 - 15)(IP - 10)$$

Donde:

F200 = Porcentaje que pasa la malla núm. 200, expresado como un número entero.

LL = Límite líquido

IP = Índice de plasticidad

Según el MTC (2014), señala una clasificación de suelo de subrasante teniendo en cuenta su índice de grupo y los divide en diversas categorías, como se describe en la tabla 3.

Tabla 3. Subrasante según índice de grupo

ÍNDICE DE GRUPO	SUELO DE SUBRASANTE
IG > 9	Inadecuado
IG entre 4 - 9	Insuficiente
IG entre 2 - 4	Regular
IG entre 1 - 2	Bueno
IG entre 0 - 1	Muy Bueno

Fuente: Obtenido del MTC, (2014).

○ **Clasificación de Suelos según SUCS**

La clasificación según SUCS, divide a los suelos en dos grupos, el primero correspondiente a los suelos gruesos son los que más del 50% del material quedan retenidos en el tamiz N°200 por consiguiente los suelos finos son los que más del 50% de sus partículas son menores al tamiz N° 200 (Braja.M.Das, 2013).

Para poder determinar los prefijos y sufijos al momento de clasificar un suelo, se debe tener en cuenta la granulometría que presentan, en función del índice plástico y límite líquido que presentan y también los símbolos diversos símbolos, según se indica en la Tabla 4.

Tabla 4. Prefijos y Sufijos según SUCS

TIPO DE SUELO	PREFIJO	SUFIJO	SUB GRUPO
Grava	G	W	Bien Graduado
Arena	S	P	Mal Graduado
Limo	M	H	Alta Plasticidad
Arcilla	C	L	Baja Plasticidad
Orgánico	O	-	-
Turba y suelos altamente orgánicos	Pt	-	-

Fuente: MTC, (2014).

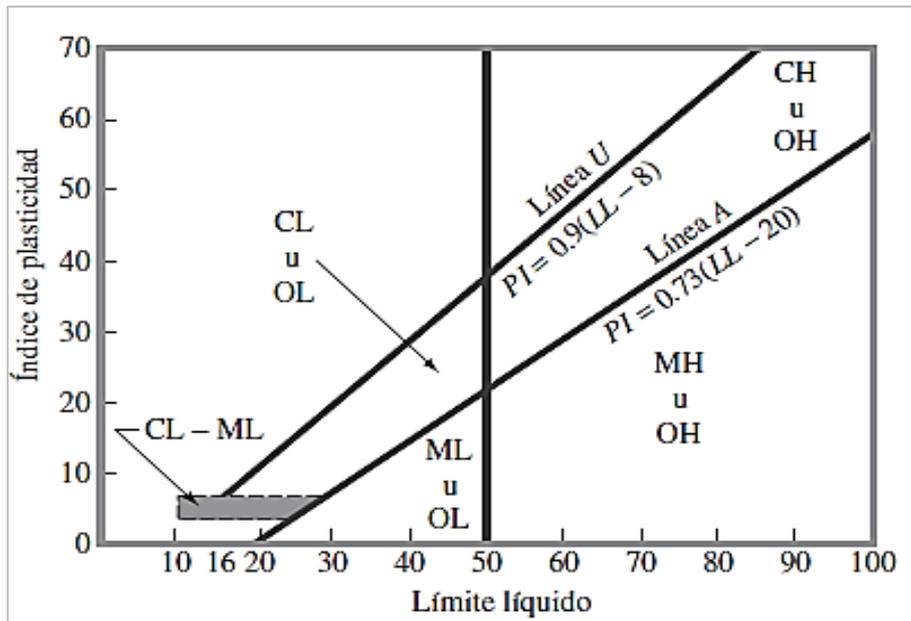


Figura 4. Clasificación de suelos finos según su grado de plasticidad  
Fuente: Obtenido de Braja. M. Das, (2013).

Según Lambe y Whitman (1984), señala que el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), se clasifica teniendo en cuenta los siguientes factores: identificación en el campo, símbolos, nombres típicos, criterios de reconocimiento en laboratorio y teniendo en cuenta el material retenido en la malla N°200, así como se muestra en la figura N°5

# Sistema USCS de Clasificación de Suelos

IDENTIFICACION EN EL CAMPO		SIMBOLO DEL GRUPO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIOS DE CLASIFICACION EN EL LABORATORIO		
SUELOS DE GRANO GRUESO - MAS DE LA MITAD DEL MATERIAL ES RETENIDO POR EL TAMIZ # 200	GRAVAS - MAS DE LA MITAD DE LA FRACCION GRUESA ES RETENIDA POR EL TAMIZ # 4	AMPLIA GAMA DE TAMAÑOS Y CANTIDADES APRECIABLES DE TODOS LOS TAMAÑOS INTERMEDIOS	<b>GW</b>	GRAVA BIEN GRADUADA, MEZCLA DE GRAVA Y ARENA CON POCOS FINOS O SIN ELLOS	$C_c = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ MAYOR DE 4 ; $C_u = \frac{(D_{60})^2}{D_{10} \times D_{30}}$ ENTRE 1 Y 3 NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS GRANULOMETRICOS DE LAS GW	
		PREDOMINIO DE UN TAMAÑO O UN TIPO DE TAMAÑO, CON AUSENCIA DE ALGUNOS TAMAÑOS INTERMEDIOS	<b>GP</b>	GRAVAS MAL GRADUADAS, MEZCLAS DE ARENA Y GRAVA CON POCOS FINOS O SIN ELLOS		
		FRACCION FINA NO PLASTICA (PARA LA IDENTIFICACION VER EL GRUPO ML, MAS ABAJO)	<b>GM</b>	GRAVAS LIMOSAS, MEZCLAS MAL GRADUADAS DE GRAVA, ARENA Y LIMO	LIMITES DE ATTERBERG POR DEBAJO DE LA LINEA "A" O $I_p$ MENOR QUE 4 POR ENCIMA DE LA LINEA "A", CON $I_p$ ENTRE 4 Y 7; CASOS LIMITES QUE REQUIEREN EL USO DE SIMBOLOS DOBLES LIMITES DE ATTERBERG POR ENCIMA DE LA LINEA "A" O $I_p$ MAYOR QUE 7	
	FINOS PLASTICOS (PARA IDENTIFICARLOS VER EL GRUPO CL MAS ABAJO)	<b>GC</b>	GRAVAS ARCILLOSAS, MEZCLAS MAL GRADUADAS DE GRAVA, ARENA Y ARCILLA			
	ARENAS - MAS DE LA MITAD DE LA FRACCION GRUESA PASA POR EL TAMIZ # 4	AMPLIA GAMA DE TAMAÑOS Y CANTIDADES APRECIABLES DE TODOS LOS TAMAÑOS INTERMEDIOS	<b>SW</b>	ARENAS BIEN GRADUADAS, ARENAS CON GRAVA, CON POCOS FINOS O SIN ELLOS	$C_c = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ MAYOR DE 6 ; $C_u = \frac{(D_{60})^2}{D_{10} \times D_{30}}$ ENTRE 1 Y 3 NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS GRANULOMETRICOS DE LAS SW	
		PREDOMINIO DE UN TAMAÑO O UN TIPO DE TAMAÑO, CON AUSENCIA DE ALGUNOS TAMAÑOS INTERMEDIOS	<b>SP</b>	ARENAS MAL GRADUADAS, ARENAS CON GRAVA, CON POCOS FINOS O SIN ELLOS		
FINOS NO PLASTICOS (PARA IDENTIFICACION VER EL GRUPO ML MAS ABAJO)		<b>SM</b>	ARENAS LIMOSAS, MEZCLAS DE ARENA Y LIMO MAL GRADUADAS	LIMITES DE ATTERBERG POR DEBAJO DE LA LINEA "A" O $I_p$ MENOR QUE 4 POR ENCIMA DE LA LINEA "A", CON $I_p$ ENTRE 4 Y 7; CASOS LIMITES QUE REQUIEREN EL USO DE SIMBOLOS DOBLES LIMITES DE ATTERBERG POR ENCIMA DE LA LINEA "A" O $I_p$ MAYOR QUE 7		
FINOS PLASTICOS (PARA IDENTIFICACION VER EL GRUPO CL MAS ABAJO)	<b>SC</b>	ARENAS ARCILLOSAS, MEZCLAS MAL GRADUADAS DE ARENAS O ARCILLAS				
MÉTODOS DE IDENTIFICACION PARA LA FRACCION QUE PASA POR EL TAMIZ # 40						
SUELOS DE GRANO FINO - MAS DE LA MITAD DEL MATERIAL PASA POR EL TAMIZ # 200	LIMOS Y ARCILLAS CON LIMITE LIQUIDO MENOR DE 50	RESISTENCIA EN ESTADO SECO (A LA DISGREGACION)	DILATANCIA (REACCION A LA AGITACION)	TENACIDAD (CONSISTENCIA CERCA DEL LIMITE PLASTICO)	<b>ML</b> LIMOS INORGANICOS Y ARENAS MUY FINAS, POLVO DE ROCA, ARENAS FINAS LIMOSAS O ARCILLAS CON LIGERA PLASTICIDAD	
		NULA A LIGERA	RAPIDA A LENTA	NULA		
		MEDIA A ALTA	NULA A MUY LENTA	MEDIA		<b>CL</b> ARCILLAS INORGANICAS DE PLASTICIDAD BAJA A MEDIA, ARCILLAS CON GRAVA, ARCILLAS ARENOSAS, ARCILLAS LIMOSAS, ARCILLAS MAGRAS
	LIMOS Y ARCILLAS CON LIMITE LIQUIDO MAYOR DE 50	LIGERA A MEDIA	LENTA	LIGERA	<b>OL</b> LIMOS ORGANICOS Y ARCILLAS LIMOSAS ORGANICAS DE BAJA PLASTICIDAD	
		LIGERA A MEDIA	LENTA A NULA	LIGERA A MEDIA	<b>MH</b> LIMOS INORGANICOS, SUELOS LIMOSOS O ARENOSOS FINOS MICACEOS O CON DIATOMEAS, LIMOS ELASTICOS	
		ALTA A MUY ALTA	NULA	ALTA	<b>CH</b> ARCILLAS INORGANICAS DE PLASTICIDAD ELEVADA, ARCILLAS GRASAS	
	MEDIA A ALTA	NULA A MUY LENTA	LIGERA A MEDIA	<b>OH</b> ARCILLAS ORGANICAS DE PLASTICIDAD MEDIA A ALTA		
	SUELOS ALTAMENTE ORGANICOS	FACILMENTE IDENTIFICABLES POR SU COLOR, OLOR, SENSACION ESPONJOSA Y FRECUENTEMENTE POR SU TEXTURA FIBROSA			<b>Pt</b>	TURBA Y OTROS SUELOS ALTAMENTE ORGANICOS

DETERMINESE LOS PORCENTAJES DE GRAVA Y ARENA A PARTIR DE LA CURVA GRANULOMETRICA SEGUN EL PORCENTAJE DE FINOS (FRACCION QUE PASA POR EL TAMIZ # 200) LOS SUELOS GRUESOS SE CLASIFICAN COMO SIGUE:

GW, GP, SW, SP  
GM, GC, SM, SC  
CASOS LIMITES QUE REQUIEREN EL EMPLEO DE SIMBOLOS DOBLES

MEIOS DEL 5%  
MAS DEL 12%  
5% AL 12%

UTILICESE LA CURVA GRANULOMETRICA PARA IDENTIFICAR LAS FRACCIONES DE SUELO INDICADAS EN LA COLUMNA DE IDENTIFICACION EN EL CAMPO

**LINEA A:  $I_p = 0.73(WL - 20)$**

COMPARANDO CON SUELOS CON EL MISMO LIMITE LIQUIDO

INDICE DE PLASTICIDAD

LIMITE LIQUIDO

GRAFICO DE PLASTICIDAD PARA LA CLASIFICACION EN LABORATORIO DE SUELOS DE GRANO FINO

Figura 5. Sistema de Clasificación SUCS  
Fuente: Lambe y Whitman, (1984).

○ **Correlación de SUCS y AASHTO**

Exite una relación intrínseca entre la clasificación SUCS Y AASTHO, es por ello que se correlacionan de la siguiente manera como se muestra en la tabla 5..

Tabla 5. Correlación de SUCS Y AASHTO

CLASIFICACIÓN DE SUELOS AASHTO	CLASIFICACIÓN DE SUELOS SUCS
A - 1 - a	GW, GP, GM, SW, SP, SM
A - 1 - b	GM, GP, SM, SP
A - 2	GM, GC, SM, SC
A - 3	SP
A - 4	CL, ML
A - 5	ML, MH, OH
A - 6	CL, CH
A - 7	OH, MH, OH

Fuente: Obtenido del MTC, (2014).

○ **Resistencia al corte de un suelo**

La resistencia al corte está relacionada con diferentes factores como: la cohesión, la resistencia a la fricción, el contenido de humedad, y también la presión que se genere por el agua en los espacios pequeños en la masa del suelo.

Según la teoría planteada por Mohr Coulomb, la falla de los materiales, se debe a la combinación del esfuerzo normal y el esfuerzo cortante. Con ello, Mohr propuso una ecuación para el cálculo o aproximación de la resistencia cortante (Sulca, 2020).

Esta ecuación, está determinada de la siguiente manera:

$$\tau_{max} = c + \sigma \tan\varphi$$

Donde:

$\tau_{max}$ : Esfuerzo cortante máximo

$c$  : Cohesión

$\sigma$ : Esfuerzo normal

$\varphi$ : Ángulo de fricción interna

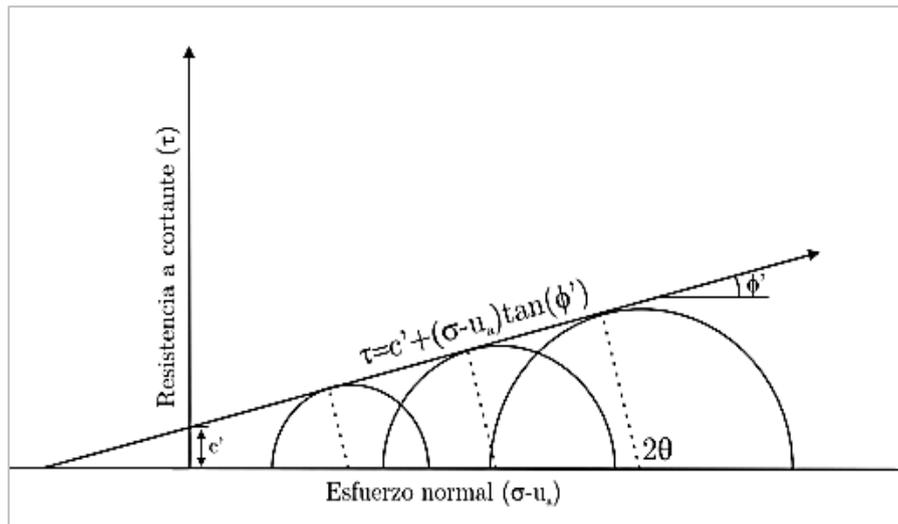


Figura 6. Envolvente de Mohr Coulomb  
Fuente: Obtenido de Díaz, (2018).

Existen dos tipos de resistencia al corte, las cuales son las siguientes: resistencia al corte drenado y resistencia al corte no drenado. La resistencia no drenada se utiliza en análisis con esfuerzos totales y la resistencia drenada se utiliza en análisis con esfuerzos efectivos. Según Suárez (2009), la resistencia al corte no drenado en arcillas normalmente consolidadas es menor que la resistencia al corte drenado; mientras que para arcillas sobre consolidadas ocurre lo contrario, esto debido a la reducción de esfuerzo intersticial y al aumento de esfuerzo efectivo.

### 2.2.10 Mecánica de Rocas

La mecánica de rocas estudia el comportamiento del macizo rocoso ante fuerzas externas e internas que se ejercen sobre el, la relación entre las tensiones y deformaciones describen el comportamiento de los diferentes tipos de rocas, siendo las discontinuidades y los planos de debilidad los que controlan los procesos de deformación y rotura (González de Vallejo, 2004).

#### ○ *Modelo Geomecánico*

El modelo geomecánico es el elemento de enlace entre los modelos geológico y matemático; en el que se cuantifican los parámetros del modelo geológico con objeto de que puedan ser procesados en el modelo matemático. Para elaborar este modelo hay que definir las propiedades mecánicas de los materiales rocosos y de las discontinuidades. En el modelo geomecánico también se evalúan las tensiones existentes en el macizo rocoso. Las

propiedades. mecánicas de los materiales rocosos deben incluir el estudio del comportamiento de las rocas en compresión y su anisotropía (Ramírez y Alejano, 2004).

○ ***Mecanismos de Rotura***

Para González de Vallejo (2004), los mecanismos de rotura se agrupan de la siguiente manera:

***Rotura por esfuerzo cortante:*** cuando una cara de la superficie de la roca desliza con respecto a la otra debido a que determinada superficie está sometida a esfuerzos cortantes.

***Rotura por compresión:*** cuando el esfuerzo compresivo crea grietas de tracción microscópicas y planos de corte en el interior de la roca.

***Rotura por Flexión:*** cuando una sección de la roca está sometida a fuerzas tensionales normales y se rompe por donde se acumula las tracciones.

***Rotura por tracción:*** cuando una sección de la roca está sometida a fuerzas de tracción pura.

***Rotura por colapso:*** cuando la roca recibe compresiones en todas direcciones transformándolo en un material pulvurulento.

Los tipos de roturas en rocas depende del grado de fracturación del macizo rocoso, así como de la orientación y distribución de las discontinuidades con respecto al talud. Por ello, la estabilidad en taludes está en función de los parámetros resistentes de las discontinuidades y de la matriz rocosa.

***Rotura planar:*** el deslizamiento se realiza en dirección del buzamiento de las discontinuidades que buzanan a favor del talud, el buzamiento es mayor que el ángulo de fricción.

***Rotura en cuña:*** la cuña se forma por dos planos de discontinuidades a favor de una línea de intersección, las discontinuidades deben estar aflorando en la superficie del talud para que ocurra el deslizamiento cumpliendo con las mismas condiciones que la rotura planar.

***Rotura por pandeo (toppling):*** se produce cuando el buzamiento de los estratos es contrario a la inclinación del talud, la rotura se produce a favor de los planos de estratificación paralelos al talud, el buzamiento es mayor al ángulo de rozamiento interno.

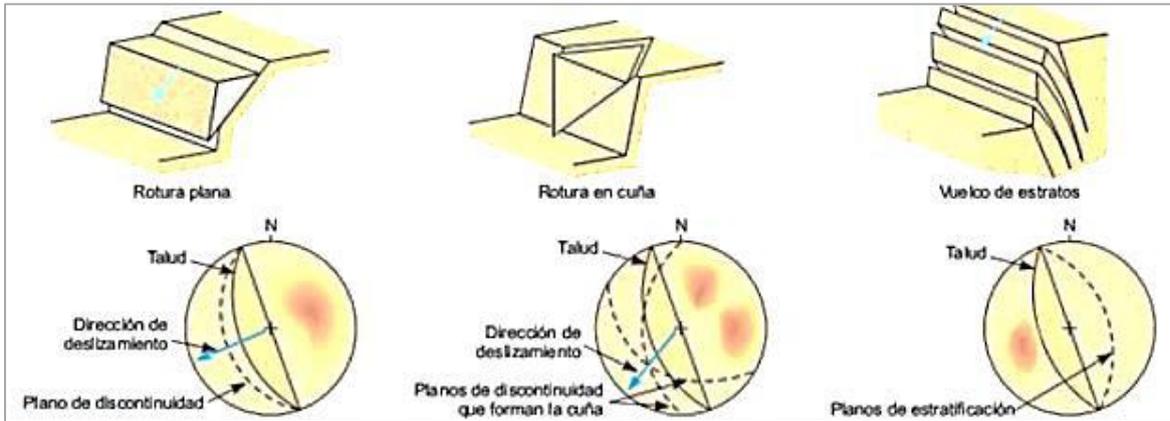


Figura 7. Tipos de Ruptura en Roca y la Representación Estereográfica de discontinuidades  
Obtenido de González de Vallejo, (2004).

○ **Criterio de Hoek-Brown**

El criterio de rotura de Hoek y Brown se utiliza para evaluar la resistencia de la matriz rocosa en condiciones isotrópicas, criterio de rotura no lineal cuya representación gráfica en una curva cóncava (González de Vallejo, 2004).

Criterio expresado como:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Dónde  $m_b$ , es el valor reducido de la constante del material  $m_i$  y está dado por:

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

s y a son constantes del macizo rocoso, se expresa como.

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

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

Para roca intacta, las constantes del material se indican con  $m_i$ ,  $s = 1$  y  $a = 0.5$ .

Dónde D es un factor que depende del grado de perturbación del macizo rocoso que ha sido sometido por la explosión o relajación de esfuerzos, va desde 0 para macizos rocosos inalterados hasta 1 para macizos rocosos muy alterados (Hoek y Brown, 2018).

○ ***Sistemas de Clasificación del Macizo Rocoso***

***Rock Mass Rating (RMR)***

Desarrollada por Bieniawski, constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite a su vez relacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos del macizo y de excavación y sostenimiento en túneles (González de Vallejo, 2004).

Esta clasificación tiene en cuenta los siguientes parámetros geomecánicos:

- Resistencia uniaxial de la matriz rocosa.
- Grado de fracturación en términos del RQD
- Espaciado de las discontinuidades
- Condiciones hidrogeológicas
- Orientación de las discontinuidades con respecto a la excavación

A continuación, se detalla el RMR, considerando la calidad del macizo rocoso. (Ver Tabla 6).

Tabla 6. Índice de Calidad RMR

<b>CLASE</b>	<b>CALIDAD</b>	<b>VALORACIÓN (RMR)</b>	<b>COHESIÓN</b>	<b>ÁNGULO DE ROZAMIENTO</b>
<b>I</b>	Muy Buena	100 - 81	>4 Kg/cm <sup>2</sup>	<45°
<b>II</b>	Buena	80 - 61	3-4 Kg/cm <sup>2</sup>	35°-45°
<b>III</b>	Media	60 - 41	2-3 Kg/ cm <sup>2</sup>	25°-35°
<b>IV</b>	Mala	40- 21	1-2	15°- 25°-
<b>V</b>	Muy Mala	<20	<1 Kg/cm <sup>2</sup>	<15°

Fuente: Obtenido de González de Vallejo, (2004).

Tabla 7. Parámetros de Clasificación RMR

1	Resistencia de la matriz rocosa (Mpa)	Ensayo puntual	>	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (Mpa)		
		Compresión simple	>250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	< 1
	Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	< 25		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas (m)		> 2	0.6-2	0.2-0.6	0.06-0.2	< 0.06		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad (m)	<1	1-3	3-10	10-20	> 20		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura (mm)	Nada	< 0.1	0.1-1.0	1-5	> 5		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm		
		Puntuación	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
Puntuación	6	5	3	1	0				
5	Agua freática	Caudal por 10m de túnel	Nulo	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	> 125 l/min		
		Relación presión de agua/Tensión principal mayor	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
	Puntuación		15	10	7	4	0		

Fuente: Obtenido de González de Vallejo, (2004).

○ **Rock Quality Designation (RQD)**

El RQD es la relación que existe entre la suma de todo el fragmento de longitud mayor a 10cm entre el total del tramo tomado (González de Vallejo, 2004)

El RQD se estima a partir del espaciamiento promedio de las discontinuidades basado en la siguiente ecuación:

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

Dónde:

$$\lambda = 1 / (\text{frecuencia de discontinuidades})$$

Tabla 8. Clasificación según el índice de calidad de la roca (RQD)

ÍNDICE DE CALIDAD RQD (%)	CALIDAD	CLASE	VALORACIÓN
100-90	Muy Buena	V	20
90-75	Buena	IV	17
75-50	Mediana	III	13
50-25	Mala	II	6
25-0	Muy Mala	I	3

Fuente: Obtenido de González de Vallejo, (2004).

En la figura 7, se observa que para un espaciamiento de discontinuidades promedio existe un rango significativo de valores de RQD posibles.

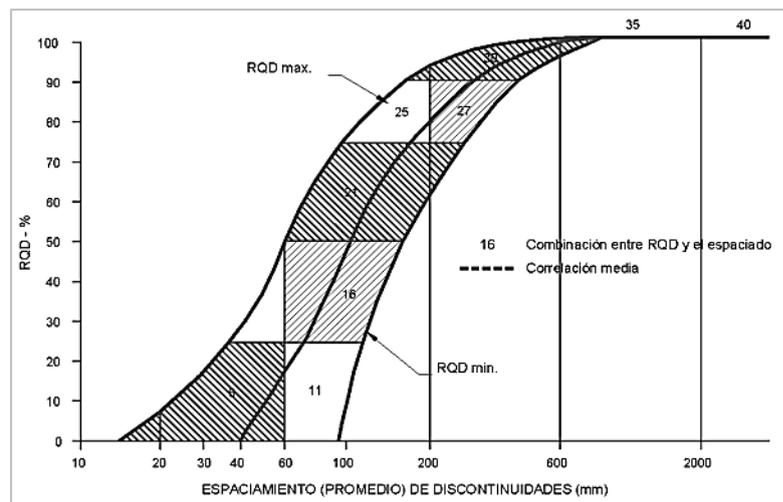


Figura 8. Relación entre el RQD y espaciamiento de discontinuidades.

Fuente: Obtenido de OSINERMIG, (2017).

○ **Geological Strength Index (GSI)**

El índice de resistencia geológica (GSI) es un índice de caracterización de macizos rocosos que evalúa al macizo rocoso en función a dos criterios: estructura geológica y condición de la superficie de las juntas (OSINERMING, 2017).

Además es posible establecer una relación del GSI con el  $RMR_{89}$  mediante la ecuación constitutiva, como se muestra a continuación:

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

INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICO GSI (Hoek & Marinos, 2000). A partir de la litología, estructura y la condición de superficie de las discontinuidades, se estima el valor promedio de GSI. No intente ser muy preciso. Escoger un rango de 33 a 37 es más realista que fijar GSI=35. También notar que esta tabla no se aplica a mecanismos de falla controlado por estructuras. Donde se presenten planos estructuralmente débiles en una orientación desfavorable con respecto a la cara de la excavación, estos dominarán el comportamiento del macizo rocoso. La resistencia al corte de las superficies en rocas que son propensas a deteriorarse como resultado de cambios en la humedad, se reducirá cuando exista presencia de agua. Cuando se trabaje con rocas de categoría regular a muy mala, puede moverse hacia la derecha para condiciones húmedas. La presión de poros se maneja con un análisis de esfuerzos efectivos.		CONDICIONES SUPERFICIALES				
		MUY BUENA Muy rugoso. Superficies frescas sin meteorización	BUENO Rugoso, ligeramente meteorizada, superficies con óxido.	REGULAR Lizas, moderadamente meteorizadas y superficies alteradas.	MALA Espejo de falla, altamente meteorizadas con recubrimiento compacto o rellenos o fragmentos	MUY MALA Espejo de falla, superficies altamente meteorizadas con recubrimiento de arcilla suave o rellenos
ESTRUCTURA		DISMINUYE CALIDAD DE SUPERFICIE →				
	Intacta o Masiva: Especímenes de roca intacta o masiva in situ con pocas discontinuidades ampliamente espaciadas.	80			N/A	N/A
	Levemente fracturado: Macizo rocoso no disturbado, muy bien entrelazado, constituido por bloques cúbicos formados por tres familias de discontinuidades	80	70			
	Moderadamente Fracturado: Entrelazado, macizo rocoso parcialmente disturbado con bloques angulosos de varias caras formado por 4 o más familias de discontinuidades		60	50		
	Muy Fracturado/Disturbado/Agrietada: Foliada con bloques angulosos formados por la intersección de muchas familias de discontinuidades. Persistencia de planos de estratificación o esquistocidad			40	30	
	Desintegrado: Pobremente entrelazado, macizo altamente fracturado compuesto de una mezcla de pedruzcos de rocas angulosas y redondeadas				20	
	Foliado/Laminado/Cizallado: Falta de formación de bloques debido al pequeño espaciamiento o esquistocidad débil o planos de corte					10
		DISMINUYE EL ENTRELAZADO DE PEDRUCOS DE ROCA ↓				

Figura 9. Cuantificación GSI

Fuente: Obtenido de OSINERMING, (2017). Elaborado por Hoek y Marino, (2000).

- ***Análisis de Inestabilidad***

El análisis de inestabilidad de taludes, depende de su geometría (altura e inclinación), geología (presencia de planos, zonas de debilidad y anisotropía en el talud), de la hidrogeología y geomecánica del macizo rocoso o suelo (resistencia y deformabilidad), que, junto con el análisis de los factores externos que actúan sobre el terreno, definen el comportamiento de los materiales y sus modelos , así como de los mecanismos de deformación y de rotura (Gonzales et al. 2004).

Los métodos de análisis empleados para definir la estabilidad se dividen en dos grandes grupos: los Métodos de Equilibrio Límite y los Métodos Numéricos.

Los métodos numéricos son la técnica que muestra la mejor aproximación al detalle, de las condiciones de estabilidad en los análisis de taludes. Sin embargo, los métodos de límite de equilibrio, son más sencillos de utilizar y permiten analizar los casos de falla traslacional y rotacional (Suarez 2009).

- ***Métodos de Equilibrio Límite***

Los métodos de equilibrio limite (los más utilizados) analizan el equilibrio de una masa potencialmente inestable, y consisten en comparar las fuerzas que favorecen al movimiento con las fuerzas resistentes que se oponen al mismo a lo largo de la superficie de rotura (Gonzales et al. 2004).

Se basan en:

- La selección de una superficie teórica de rotura en el talud,
- El criterio de rotura de Mohr-Coulomb
- La definición de coeficiente de seguridad.

Presentan las siguientes condiciones:

- Geometría que permita que ocurra el deslizamiento (cinemáticamente posible).
- La distribución de las fuerzas que actúan en la superficie de rotura podrá ser computada utilizando datos conocidos (peso específico del material, presión de agua, etc.).
- La resistencia se moviliza simultáneamente a lo largo de todo el plano de rotura.

Teniendo en cuenta estas condiciones, se establecen las ecuaciones del equilibrio entre las fuerzas que provocan o favorecen el deslizamiento y las resistentes u opuestas a éstas. El valor del coeficiente de seguridad de la superficie del talud en estudio, viene a ser el equilibrio estricto o límite entre las fuerzas que actúan. (Gonzales et al. 2004).

Tabla 9. Métodos de Análisis de Estabilidad

MÉTODO	SUPERFICIES DE FALLA	EQUILIBRIO	CARACTERÍSTICAS
<b>Bishop simplificado (Bishop 1955)</b>	Circulares	De momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobredeterminada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.
<b>Janbú Simplificado (Janbú 1968)</b>	Cualquier forma de superficie de falla.	De fuerzas	Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobredeterminada que no satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo, Janbú utiliza un factor de corrección, para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos.
<b>Morgenstern y Price (1965)</b>	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y Fuerzas	Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método es muy similar al método Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo a una función arbitraria.

Fuente: Tomado de Suárez, (2009).

### 2.2.11 Ensayos de Laboratorio

A continuación, se describe los principales ensayos de laboratorio que se realizan en suelos para la obtención de los parámetros geotécnicos recopilados en esta investigación (Ver tabla 10).

Tabla 10. Ensayos de Laboratorio

<b>ENSAYOS DE LABORATORIO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>NORMATIVA</b>
<b>Análisis Granulométrico por Tamizado</b>	Determina el tamaño de las partículas presentes en un suelo y permite calcular el porcentaje de suelo que pasa a través de cada uno de los tamices hasta llegar al tamiz No.200.	ASTM D – 422, MTC E 107
<b>Contenido de humedad</b>	Se emplea para calcular la cantidad de agua en el suelo y el peso de las partículas sólidas presentes en él.	ASTM D – 2216, MTC E 108
<b>Límite Líquido</b>	Se define como el contenido de humedad que separa el comportamiento líquido de un suelo.	ASTM D – 4318, MTC E 110.
<b>Límite Plástico</b>	Corresponde a la humedad que presenta un suelo antes de pasar del estado plástico al estado semisólido	ASTM D – 4318, MTC E 111
<b>Sistema de clasificación de suelos AASHTO</b>	Se toma en cuenta las propiedades de los suelos basado también en la granulometría y plasticidad de los suelos	AASHTO M – 145, ASTM D – 3282
<b>Clasificación de suelos SUCS</b>	Divide a los suelos en dos grupos, el primero correspondiente a los suelos gruesos y el segundo a suelos finos, de acuerdo al porcentaje retenido en el tamiz, ya sea mayor o menor al 50% del tamiz N° 200.	ASTM D – 2487

PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL SUELO																
TIPO DE SUELO	GRANULOMETRÍA		LÍMITE DE ATTEMBERG			PESO ESPECÍFICO		HUMD. NATURAL	PROCTOR NORMAL		DEFORMABILIDAD		RESISTENCIA AL CORTE			PERMEABILIDAD
	<0.06	<2.00	(fracción < 0.04 mm)			γ	γsum	W	D. Seca	wpm	Es=EO	(σ/σt)	Φ	c	Φ'	K
	mm	mm	wL	wP	lp	T/m3	T/m3	%	T/m3	%	Es Kp/cm2	α	(°)	T/m2	(°)	m/s
	%	%	%	%	%											
Grava	<5	<60	-	-	-	1.6	0.95	5	1.7	8	400	0.6	34	-	32	2.00E-01
			-	-	-	1.9	1.05	2	1.9	5	900	0.4	42	-	35	1.00E-02
Grava arenosa con pocos finos	<5	<60	-	-	-	2.1	1.15	7	2	7	400	0.7	35	-	32	1.00E-02
			-	-	-	2.3	1.35	13	2.25	4	1100	0.5	45	-	35	1.00E-06
Grava arenosa con finos limosos o arcillosos que no alteran la estructura	8	<60	20	16	4	2.1	1.15	9	2.1	7	400	0.7	35	1	32	1.90E-09
	15		45	25	25	2.4	1.45	3	2.35	3	1200	0.5	43	0	35	1.00E-08
Mezcla de gravas y arenas envueltas por finos	20	<60	20	16	4	2	1.05	13	1.9	10	150	0.9	28	3	22	1.00E-09
	40		50	25	30	2.25	1.3	5	2.2	5	400	0.7	35	0.5	30	1.00E-11
Arena uniforme fina	<5	<100	-	-	-	1.6	0.95	22	1.6	15	150	0.75	32	-	30	2.00E-04
			-	-	-	1.9	1.1	8	1.75	10	300	0.6	40	-	22	1.00E-03
Arena uniforme gruesa	<5	<100	-	-	-	1.6	0.95	16	1.6	13	250	0.7	34	-	30	5.00E-03
			-	-	-	1.9	1.1	8	1.75	8	700	0.55	42	-	34	2.00E-04
Arena bien graduada y arena con grava	<5	<100	-	-	-	1.8	1	11	1.9	10	200	0.7	33	-	32	5.00E-04
			-	-	-	2.1	1.2	5	2.15	6	600	0.55	41	-	34	2.00E-03
Arena con finos que no alteran la estructura granular	8	>60	20	16	4	2.9	1.05	15	2	13	150	0.8	32	1	30	1.00E-03
	15		45	25	25	2.25	1.3	4	2.2	7	500	0.65	40	0	32	1.00E-07
Arena con finos que alteran la estructura granular	20	>60	20	16	4	1.8	0.9	20	1.7	18	50	0.9	25	5	22	1.00E-07
	40		50	30	30	2.15	1.1	8	2	12	250	0.75	32	1	30	1.00E-10
Limo poco plástico	>50	>80	25	20	4	1.75	0.95	28	1.6	22	40	0.8	28	2	25	1.00E-04
			35	28	11	2.1	1.1	15	1.8	15	110	0.6	35	0.5	30	5.00E-06
Limo de plasticidad media a alta	>80	>100	35	22	7	1.7	0.85	35	1.55	23	30	0.9	25	3	22	2.00E-05
			50	25	20	2	1.05	20	1.75	16	70	0.7	33	1	29	2.00E-06
Arcilla de baja plasticidad	>80	100	25	15	7	1.9	0.95	28	1.65	20	20	1	24	6	20	1.00E-07
			35	22	16	2.2	1.2	14	1.85	14	50	0.9	32	1.5	28	2.00E-09
Arcilla de plasticidad media	>90	100	40	18	16	1.8	0.85	38	1.55	23	10	1	20	8	10	5.00E-06
			50	25	28	2.1	1.1	18	1.75	17	30	0.95	30	2	20	1.00E-10
Arcilla de alta plasticidad	100	100	60	20	33	1.65	0.7	55	1.45	27	6	1	17	10	6	1.00E-09
			85	35	55	2	1	20	1.65	20	20	1	27	3	15	1.00E-11
Limo o arcilla orgánicos	>80	100	45	30	10	1.55	0.55	60	1.45	27	5	1	20	7	15	1.00E-09
			70	45	30	1.9	0.9	30	1.7	18	20	0.8	26	2	22	1.00E-11
Turba	-	-	-	-	-	1.04	0.04	800	-	-	3	1	25	1.5	-	1.00E-05
	-	-	-	-	-	1.3	0.3	100	-	-	8	1	30	0.5	-	1.00E-09
Fango	-	-	100	30	50	1.23	0.25	200	-	-	4	1	22	2	-	1.00E-07
	-	-	250	80	170	1.6	0.6	50	-	-	15	0.9	28	0.5	-	1.00E-08

Figura 10. Parámetros característicos del suelo  
Fuente: Tomado de Rodríguez y Serrad, (1982) .

## 2.2.12 Parámetros geotécnicos

Es fundamental realizar una caracterización geotécnica de rocas y suelos, para poder comprender su comportamiento y para diseñar estructuras estables y seguras. A continuación, presentamos los principales parámetros geotécnicos. (Ver Tabla 11).

Tabla 11. Parámetros geotécnicos

PARÁMETROS GEOTÉCNICOS	DESCRIPCIÓN
ROCAS	<b>Resistencia a la compresión uniaxial del bloque de roca Intacta (<math>\sigma_{ci}</math>):</b> Es la tensión Máxima que puede soportar una roca, cuando se aplica una carga axial antes de fracturarse.
	<b>Resistencia al Corte</b> - <b>Ángulo de fricción interna (<math>\phi</math>):</b> Mide la resistencia al deslizamiento o corte entre dos materiales. - <b>Ángulo de Cohesión (<math>c</math>):</b> es un parámetro que tiene la cualidad de mantener unidas las partículas de un material, debido a fuerzas internas.
	<b>GSI:</b> Sistema de Caracterización Geomecánica, a través de la fácil identificación visual de las propiedades geológicas en campo o utilizando de la ecuación constitutiva.
	<b>Factor de seguridad (FS):</b> Representa la relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas desestabilizantes en un talud.
	<b>Sismicidad</b> - <b>Coefficiente Horizontal (<math>K_h</math>):</b> Se refiere a la velocidad de ondas sísmicas de compresión (ondas p) en la corteza terrestre. - <b>Coefficiente Vertical (<math>K_v</math>):</b> Se refiere a la velocidad de ondas sísmicas de corte (ondas s) en la corteza terrestre.
SUELOS	<b>Infiltración:</b> Es el proceso por el cual el agua penetra por las fisuras, grietas o poros en las rocas.
	<b>Clasificación SUCS:</b> Método de clasificación que toma en cuenta la plasticidad y granulometría de los suelos.
	<b>Clasificación AASHTO:</b> Método de clasificación divide a los suelos en gruesos o finos, de acuerdo al porcentaje retenido del tamiz N°200.
	<b>Resistencia al Corte</b> - <b>Ángulo de fricción interna (<math>\phi</math>):</b> Mide la resistencia al corte del suelo, debido a la fricción de partículas. - <b>Cohesión (<math>c</math>):</b> Es la resistencia al corte del suelo debido a las fuerzas de atracción entre partículas y contenido de humedad.
	<b>Comportamiento Tensional</b> - <b>Asentamientos:</b> Es el proceso de deformación permanente debido a cargas externas. Los suelos volcánicos pueden sufrir asentamientos diferenciales debido a su alta compresibilidad y baja densidad.
	<b>Expansión:</b> Es la propiedad que tienen algunos suelos de variar de volumen al absorber o perder agua.
	<b>Sobrecarga:</b> Es una carga adicional externa que se sustenta sobre alguna estructura de pavimento o cimentación, influye en la capacidad de resistencia de la estructura y el terreno de fundación sobre el cual fue construido
<b>Infiltración:</b> Es el proceso por el cual el agua de la superficie del suelo penetra en el subsuelo.	
	<b><math>K_h</math> y <math>K_v</math>:</b> Coeficientes horizontal y vertical de sismicidad.

### 2.2.13 Capacidad Portante

La capacidad portante, o conocida también, como capacidad de carga o de soporte, es el esfuerzo último que es capaz de resistir el suelo, en respuesta a una presión impuesta a una estructura modulada, debido a una carga muerta o carga viva y estas cargas serán transmitidas a través de la cimentación, en forma de presión al suelo a nivel de cimentación y luego se distribuye en la profundidad del subsuelo. Por lo tanto, la capacidad de carga estará condicionada a los siguientes factores, tales como, la carga de servicio, a la profundidad de la cimentación, a la presencia del nivel freático, a su peso específico, a su cohesión, al ángulo de fricción y a la resistencia al esfuerzo cortante del suelo (Jiménez y Paz, 2020).

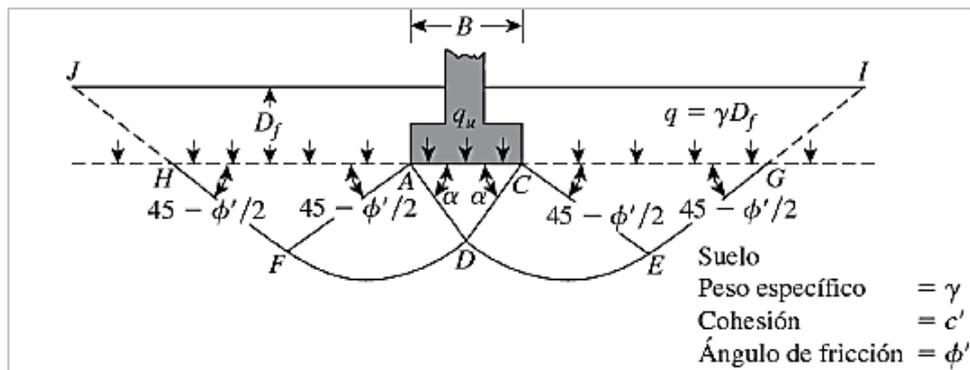


Figura 11. Falla por capacidad de carga en una cimentación rígida.  
 Fuente: Tomado de de Braja. M. Das, (2013).

#### ○ Tipos de Capacidad de Carga

##### **Capacidad de Carga última**

Se define como la capacidad de carga, presión última o de falla por corte del suelo y se determina utilizando fórmulas aceptadas por la mecánica de suelos; en suelos cohesivos (arcilla, arcilla limosa y limo – arcillosa), se empleará un ángulo de fricción interna ( $f$ ) igual a cero; en suelo fricciantes (gravas, arenas y gravas – arenosas), se empleará como cohesión ( $c$ ) igual a cero (Acosta y Apaza, 2022).

La capacidad de carga última propuesta por Terzagui se calcula para cimentaciones continuas como:

$$q_u = c'N_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma B N_\gamma$$

Dónde se tiene en cuenta los siguientes parámetros:

$c'$  = cohesión del suelo

$\gamma$  = peso unitario del suelo

$q = \gamma D_f$

$N_c, N_q, N_\gamma$  = factores de forma de capacidad de carga, son adimensionales

$\phi'$  = ángulo de fricción de suelo

$K_p \gamma$  = coeficiente de presión pasiva

### ***Capacidad de Carga Admisible***

Se define como el esfuerzo admisible que se aplica a un suelo y se transmite a través de una cimentación y queda determinado mediante la división de la capacidad última carga entre un factor de seguridad (FS) cuyo valor está en el intervalo de  $2 \leq FS \leq 4$  y se da generalmente por la incertidumbre de los parámetros característicos físicos y mecánicos (Acosta y Apaza, 2022).

La capacidad de carga admisible se determina a través de la siguiente expresión:

$$q_{adm} = \frac{q_u}{FS}$$

dónde:

$q_{adm}$ : carga admisible

$q_u$ : carga última

FS: Factor de Seguridad

#### **2.2.14 Asentamiento de Suelos**

Los asentamientos se producen en el suelo debido a que se colocan cargas y éstas generan una presión que redistribuye el estado de esfuerzos internos del suelo, por lo que produce una redistribución de partículas internas las cuales originan cambios volumétricos, los cuales generan desplazamientos verticales (Guedes et al., 2021).

El asentamiento del suelo debido a la aplicación de las cargas, depende de la naturaleza, intensidad y duración de la aplicación de ellas; así como de las características del suelo tales como: cohesión, fricción interna y grado de compacidad. Para determinar la magnitud de los asentamientos debido a la aplicación de cargas cuando ello es posible, o formular las medidas de prevención, es necesario identificar los mecanismos generadores y orientar adecuadamente el problema (Moya, 2015).

○ **Tipos de Asentamientos**

El asentamiento total de una cimentación está compuesto por tres componentes: asentamientos inmediatos o elásticos, asentamiento de consolidación primarios y asentamientos de consolidación secundarios o de creep (Guedes et al., 2021).

$$\Delta H_t = \Delta H_i + \Delta H_c + \Delta H_s$$

Donde:

$\Delta H_t$  = Asentamiento total

$\Delta H_i$  = Asentamiento inmediatos

$\Delta H_c$  = Asentamiento por consolidación primaria

$\Delta H_s$  = Asentamiento por consolidación secundaria

En la figura 10, se muestra los diferentes tipos de asentamientos, el asentamiento inmediato, el asentamiento por consolidación primaria, y el asentamiento por consolidación secundaria, en función a la deformación y al tiempo.

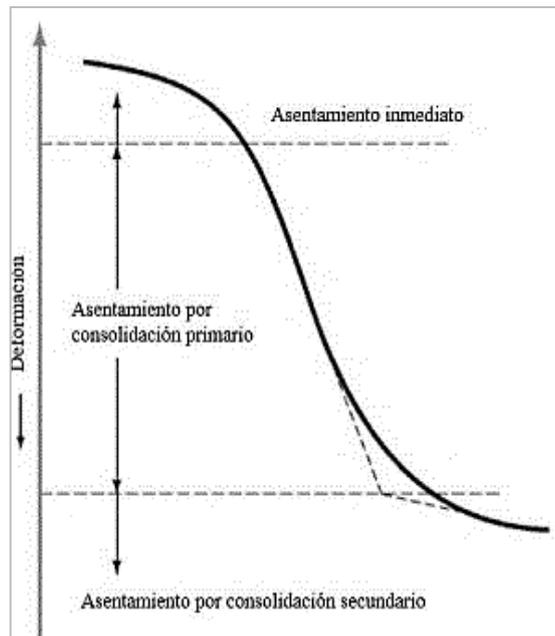


Figura 12. Tipos de asentamientos  
Fuente: Tomado de Guedes et al., (2021).

### ***Asentamientos Inmediatos***

Los asentamientos inmediatos ocurren por la deformación elástica de las partículas del suelo debido a la carga aplicada sin cambios en el contenido de agua. En las arcillas el asentamiento inmediato suele ser muy bajo y casi despreciable (Bowles, 1997).

En un suelo homogéneo e isótropo viene dado por la siguiente fórmula.

$$\Delta H_i = \frac{\Delta q_s B (1 - \mu^2)}{E}$$

Por definición, en suelos finos, el asentamiento instantáneo tiene lugar sin disipación de presiones intersticiales. Esto quiere decir que si es una arcilla saturada no habrá cambio de volumen, con número de Poisson  $\mu = 0.5$  (Carrillo et al., 2009).

### ***Asentamiento por Consolidación Primaria***

Los asentamientos por consolidación primaria, resultan del cambio de volumen debido a la expulsión del agua por los vacíos del suelo. Esto ocurre principalmente en suelos cohesivos saturados, dicho cambio se genera en un largo periodo de tiempo aumentando a un ritmo lento (Guedes et al., 2021).

El asentamiento por consolidación primaria se obtiene por el método edométrico o unidimensional.

Para calcular el asentamiento producido por cargas no infinitas se emplea la siguiente fórmula:

$$S_{\infty} = \frac{1}{E_m} \Delta \sigma_v^i H_i$$

O bien:

$$S_{\infty}^i = H_i \frac{C_c}{1 - e_0} \log \frac{\sigma_v^i + \Delta \sigma_v^i}{\sigma_{v_0}^i}$$

En donde todo el incremento de tensión total  $\Delta \sigma_v^i$  se halla transformado en incremento de tensión efectiva  $\sigma_v^i$  y teniendo en cuenta los diversos parámetros de compresibilidad.

### ***Asentamiento por Consolidación Secundaria***

Los asentamientos por consolidación secundaria o de creep, es la continua deformación ante cargas constantes que se genera. Este asentamiento se explica debido a la redistribución de fuerzas entre partículas luego de una larga reagrupación estructural producida por los otros asentamientos inmediatos y de consolidación primarios (Guedes et al., 2021).

Para la determinación de un asentamiento por consolidación secundaria se toma en cuenta la siguiente fórmula:

$$S_{SC} = c_{\alpha} \times H \times \log \frac{t_2}{t_1}$$

Donde:

$S_{SC}$ : Asentamiento por consolidación secundaria  $C$

$c_{\alpha}$ : Coeficiente de consolidación secundaria

$H$ : Espesor de la capa de arcilla

$t_1$  y  $t_2$ : Son los tiempos para la consolidación primaria y secundaria respectivamente.

Para determinar el valor de  $t_1$  usamos la siguiente relación:

$$T_V = \frac{C_v \times t}{H^2}$$

De dicha relación tenemos que,  $T_V=1$  y  $T=t_1$  para obtener:

$$t_1 = \frac{H^2}{C_v}$$

#### ○ **Límites Tolerables para asentamientos**

A continuación, se presentan los valores de asentamientos totales y diferenciales admisibles, para diseño de fundaciones.

Tabla 12. Límites tolerables para Asentamientos

<b>Asentamiento máximo, <math>\rho</math></b>	<b>[mm]</b>
Arena	32
Arcilla	45
<b>Asentamiento diferencial máximo, <math>\delta</math></b>	<b>[mm]</b>
Fundaciones aisladas en arena	51
Fundaciones aisladas en arcilla	76
<b>Distorsión angular máxima, <math>\eta</math></b>	<b>1/300</b>

Fuente: Obtenido de Henríquez et al., (2020).

### 2.2.15 Expansión en suelos

Los suelos volcánicos suelen experimentar expansión debido a su estructura porosa y su alta capacidad de retener agua. Esto puede causar problemas de estabilidad en construcciones, debido a la expansión volumétrica cuando absorben agua (González, 2012).

Las arcillas expansivas se identifican en campo debido a que suele presentar fisuras, lados en rodajas o roturas debido al hinchamiento y contracción a causa de los cambios en el contenido de humedad. Cuando un suelo tiene bajo grado de saturación y alta plasticidad ( $LL \geq 50$ ), se deben realizar el ensayo de determinación de plasticidad del suelo y ensayos granulométrico por sedimentación (Peralta, 2021)

En la figura 13, se muestra la clasificación del cambio de potencial de volumen de acuerdo a el porcentaje de partículas menores  $2 \mu\text{m}$  ( $\% < 2 \mu\text{m}$ ), el índice de plasticidad (IP) y la actividad (A) de la arcilla que se obtiene de dividir el IP entre  $\% < 2 \mu\text{m}$ .

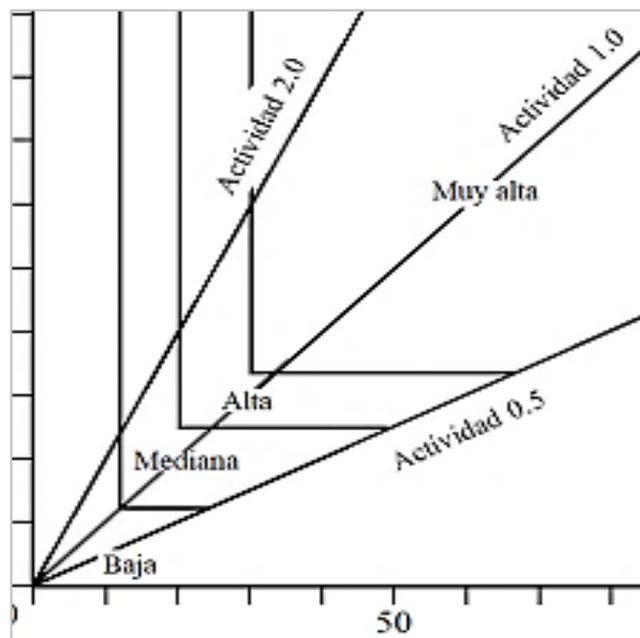


Figura 13. Clasificación de cambio de volumen según su actividad  
Fuente: Tomado de MVCS, (2018).

En la tabla 13, se observa la clasificación de suelos expansivos, según su potencial de expansión e hinchamiento, determinados como: bajo, mediano, alto y muy alto. Para ello, es necesario realizar el ensayo de determinación de hinchamiento unidimensional, junto al índice de plasticidad (IP) y el porcentaje de partículas menores  $2 \mu\text{m}$  (%) (Peralta, 2021).

Tabla 13. Clasificación de Suelos Expansivos

<b>POTENCIAL DE EXPANSIÓN</b>	<b>EXPANSIÓN EN CONSOLIDÓMETRO BAJO PRESIÓN 7KPA</b>	<b>ÍNDICE DE PLASTICIDAD</b>	<b>PORCENTAJE DE PARTÍCULAS MENORES DE DOS MICRAS</b>
%	%	%	%
<b>Muy Alto</b>	>30	>32	>37
<b>Alto</b>	20-30	23-45	18-37
<b>Medio</b>	10-20	12-34	12-27
<b>Bajo</b>	<10	<12	<17

Fuente: Obtenido de MVCS, (2018).

Para la identificación de arcillas expansivas se clasifica en base al porcentaje de contenido de arcilla, límites de contracción (tanto volumétricos como lineales), índice de plasticidad, límite de líquido, e índice de contracción (Peralta, 2021).

La clasificación muestra el grado de expansión, el límite líquido (LL), el límite plástico (LP), de acuerdo a diversos autores se observa en la tabla 14.

Tabla 14. Clasificación según grado de expansión propuesto por diversos autores

<b>GRADO DE EXPANSIÓN</b>	<b>CHEN (1983)</b>	<b>SEED Y OTROS (1962)</b>	<b>DAKSANAMURKY AND RAMAN (1973)</b>	<b>USBR (HOLTZ AND GIBBS, 1956)</b>
<b>Muy Alto</b>	LL>60	IP>35	LL>70	CC>28
<b>Alto</b>	40<LL≤60	20<IP≤35	50<LL≤70	20<CC≤31
<b>Medio</b>	30<LL≤40	10<IP≤20	35<LL≤50	13<CC≤23
<b>Bajo</b>	LL<30	IP<10	20<LL≤35	CC<13

Fuente: Tomado de Peralta, (2021).

Por otro lado, para identificar arcillas expansivas y el grado de expansión, basado en el contenido coloidal (porcentaje de partículas menores que 0.001 mm), el índice de plasticidad y el límite de contracción, se tiene en consideración datos para estimar el cambio volumétrico probable en materiales expansivos, tal como se muestra la tabla 15.

Tabla 15. Datos para estimar el cambio volumétrico en materiales expansivos

<b>Contenido Coloidal (%&lt;0.001mm)</b>	<b>Índice de plasticidad</b>	<b>Límite de contracción</b>	<b>Expansión Probable, Cambio Volumétrico en % (Seco o Saturado)</b>	<b>Grado de Expansión</b>
<b>&gt;28</b>	>35	<11	>30	Muy Alto
<b>28-31</b>	25-41	7-12	20-30	Alto
<b>13-23</b>	15-28	10-16	10-20	Medio
<b>&lt;15</b>	<18	>15	<10	Bajo

Fuente: Tomado de Peralta, (2021).

Para evaluar el potencial de expansividad de suelos en función al índice plástico y límite líquido que presentan, se utiliza la siguiente tabla.

Tabla 16. Potencial de expansión en función a su índice de plasticidad y Límite líquido

<b>Potencial de Expansión</b>	<b>Índice de plasticidad</b>	<b>Límite de Líquido</b>
<b>Muy Alto</b>	>35	<11
<b>Alto</b>	25-41	7-12
<b>Medio</b>	15-28	10-16
<b>Bajo</b>	<18	>15

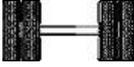
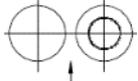
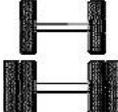
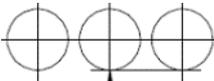
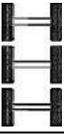
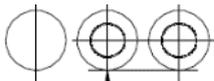
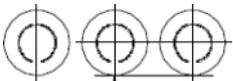
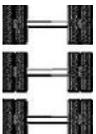
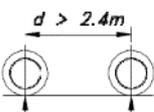
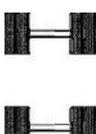
Fuente: Vásquez et al., (2018).

### 2.2.16 Sobrecargas

El Reglamento Nacional de Vehículos – Decreto Supremo N° 058 – 2003 – MTC, establece los requisitos y características técnicas que deben cumplir los vehículos para que ingresen, se registren, transiten, operen y se retiren del Sistema de Transporte Terrestre. (MTC, Reglamento Nacional de Vehículos 2003).

En tabla N° 17, se muestran los pesos máximos permitidos por eje o conjunto de ejes, según el Reglamento Nacional de Vehículos del 2003.

Tabla 17. Peso máximo permitido por configuración de eje simple o conjunto de ejes.

Conjunto de ejes	Nomenclatura	Simbología	N° de neumáticos	Gráfico	Peso máximo por eje (s) (t)
Simple	1RS		2		7
Simple	1RD		4		11
Doble	1RS+1RD		6		16
Doble	2RS		4		12
Doble	2RD		8		18
Triple	3RS		6		16
Triple	1RS+2RD		10		23
Triple	3RD		12		25
Doble Separado	1RD+1RD		8		11+11

Fuente: MTC, Reglamento Nacional de Vehículos, (2003).

### 2.2.17 Hidrología

En el caso de los suelos de origen volcánico, la dinámica del agua en el suelo presenta condiciones particulares, ya que, para realizar un análisis hidrológico, se tiene en cuenta propiedades físicas e hidráulicas que influyen en procesos como la precipitación, infiltración, escorrentía y la redistribución del agua en el suelo (González, 2012).

#### ○ **Balance Hídrico**

La evaluación de los recursos hídricos de una cuenca requiere de una estimación correcta del balance hidrológico, la cual está determinada de la siguiente ecuación:

$$P = ET + E + I$$

Donde.

P = Precipitación

ET = Evapotranspiración

E = Escorrentía

I = Infiltración

#### **Componentes del Balance hídrico**

A continuación, se describen algunos de los componentes del balance hídrico, fundamentales al momento de realizar un análisis hidrológico:

#### **Precipitación**

La precipitación constituye la entrada primordial del sistema hidrológico y es el factor principal que controla la hidrología de una región. También se considera precipitación a todas las formas de humedad que caen a la tierra, provenientes de las nubes, como agua, nieve y hielo (Chereque, 2003)

El exceso de precipitación o precipitación efectiva, es la precipitación que no se retiene en la superficie terrestre y tampoco se infiltra en el suelo (MTC, 2012).

Para la determinación de este componente, se utiliza la siguiente fórmula:

$$Pe = (P - 12.5) \times 0.80$$

Pe = Precipitación efectiva (mm)

P = Lluvia individual (mm)

## ***Infiltración***

La infiltración es el flujo de agua que transita desde el suelo hacia las zonas no saturada y saturada. La capacidad de infiltración está en función al flujo de agua por unidad de tiempo y de área total humanos (Quillatupa y Cárdenas, 2016).

### **2.2.19 Sismicidad**

La actividad sísmica se considera importante causa de deslizamientos en suelos derivados de cenizas volcánicas. El movimiento dinámico del suelo durante un sismo produce el incremento de la presión de poros y la generación de esfuerzos desestabilizantes. Estos esfuerzos pueden romper los enlaces cementados que unen las partículas y consecuentemente llevar al colapso de la estructura (Herrera, 2006).

El análisis sísmico en el Perú, se ejecuta en función a la aplicación de la Norma E030, Reglamento Nacional de Edificaciones, 2006, con su modificatoria, mediante Decreto Supremo 355-2018-Vivienda, la cual considera que el territorio nacional está dividido en 04 zonas, que toma como base los siguientes aspectos: Distribución espacial de la sismicidad observada, características generales de los movimientos sísmicos. Atenuación de los movimientos sísmicos en la distancia epicentral y la Neotectónica.

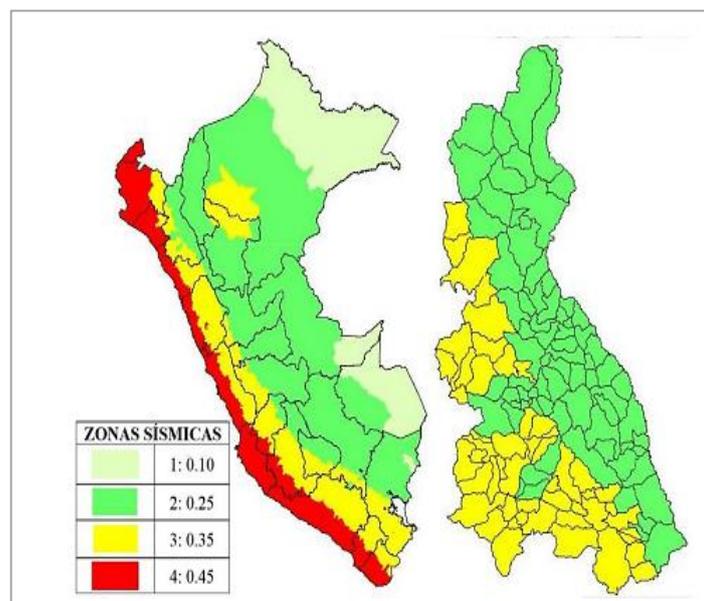


Figura 14. División del territorio nacional en cuatro zonas sísmicas de acuerdo al RNE, (2006). Modificado, (2018). Norma E.030.

## 2.3 DEFINICIÓN DE TERMINOS BÁSICOS

**Comportamiento Geotécnico:** Es el comportamiento del terreno relacionadas con propiedades básicas de los suelos y rocas tales como sensibilidad, expansión, desgaste, y también la identificación de características respecto a la resistencia y deformación de los materiales geológicos (Calderón, 2022).

**Macizos Rocosos:** son bloques de matriz rocosa que han sido separados por discontinuidades, mecánicamente se define macizos rocosos como medios discontinuos, anisótropos y discontinuos (González de Vallejo, 2004).

**Suelo Volcánico:** Suelos originados por la acumulación de depósitos de piroclastos y cenizas volcánicas, producto de erupciones volcánicas (Herrera, 2006).

**Asentamiento:** Es un movimiento que describe el desplazamiento vertical del terreno debido a la aplicación de cargas a éste (Guedes et al., 2021).

**Expansión:** Se define como un cambio volumétrico en los suelos que presentan cambios significativos de humedad, como consecuencia de la generación de una tensión de hinchamiento vertical en su estructura interna (Beltrán, 2009).

**Sismicidad:** Considerada como la distribución espacio-tiempo de los terremotos o actividad sísmica en la tierra y de sus efectos destructivos (Campeche, 2015).

**Sobrecarga:** Es una carga adicional externa que se sustenta sobre alguna estructura de pavimento o cimentación, influye en la capacidad de resistencia de la estructura y el terreno de fundación sobre el cual fue construido (MTC,2003).

**Precipitación:** La precipitación es el volumen o altura de agua lluvia que cae sobre un área en un período de tiempo. (Betancur et al., 2015).

**Infiltración:** Es el flujo de agua que transita desde el suelo hacia zonas no saturada y saturada. (Quillatupa y Cárdenas, 2016)

## CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1.1 Geográfica

La investigación está ubicada al SW de la ciudad de Cajamarca, en el cuadrángulo 15f-1 de la zona 17S, delimitada con las coordenadas del sistema UTM – DATUM WGS-84, cuyos vértices se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 18. Ubicación Geográfica del área de Investigación

VÉRTICES	COORDENADAS UTM WGS-84	
	Este	Norte
V1	773035	9207122
V2	773752	9207121
V3	772957	9206143
V4	773510	9205949
V5	773371	9205453
V6	771753	9205452
V7	771486	9205780
V8	771820	9206237
V9	772260	9206236

#### 3.1.2 Política

Políticamente la investigación comprende el centros poblado de Agua Tapada que pertenece a Cumbe Mayo, en la provincia, departamento y distrito de Cajamarca e inicia en la progresiva Km 2+000 hasta el Km 5+000 de la carretera Santa Apolonia - Cumbe Mayo. (Ver Anexo-01, Plano de ubicación).

### 3.1.3 Accesibilidad

La principal vía de acceso desde Santa Apolonia a Agua Tapada, es mediante desplazamiento terrestre, a través de calles asfaltadas y trocha carrozable, tal como se detalla en la tabla 16.

Tabla 19. Ruta de Accesibilidad

RUTA	TIPO DE CARRETERA	DISTANCIA	TIEMPO
Santa Apolonia (Av. Peru – Av. Miguel de Cervantes Saavedra cda 18)	Asfaltada	2km	15min
Av Miguel de Cervantes Saavedra cda 18 (del Km 2+000 hasta el Km 5+000)	Vía Afirmada	3km	20min
		5km	25min

### 3.1.4 Clima y Vegetación

Cajamarca se encuentra a 2738 m s.n.m., el clima es templado - cálido. La cobertura vegetal está caracterizada principalmente por eucaliptos y pinos con escasez de sembríos y pastizales.



Foto 1. Cobertura Vegetal de Eucaliptos y Pinos.

### 3.3 METODOLOGÍA

Teniendo como base a Hernández Sampieri et al., (2014) describimos la metodología a realizar en el proyecto de investigación de la siguiente manera.

#### 3.2.1 Tipo, Nivel, Diseño y Método de Investigación

El tipo de investigación es descriptiva, correlacional y explicativa, ya que involucra describir y explicar las características del terreno sobre el que ha sido cimentada la carretera además de correlacionar así como relacionar las propiedades físicas de rocas y suelos y los diversos factores que intervienen como la precipitación, infiltración, expansión, sobrecarga y sismicidad; según el diseño de la investigación es documental y de campo, puesto que la investigación toma como referencia la documentación bibliográfica y la información recopilada en campo; finalmente, el método de investigación es deductivo-inductivo.

Tabla 20. Tipo, Nivel y Diseño de la Investigación

<b>Tipo</b>	Descriptivo, correlacional y explicativo.
<b>Nivel</b>	Documental y campo.
<b>Diseño</b>	Deductivo – inductivo.

Fuente: Adaptado de Supo, (2015).

#### 3.2.2 Población

Las rocas y suelos del Volcánico Rumiorco, entre las progresivas Km 2+000 al Km 5+000 de la carretera Santa Apolonia- Cumbe Mayo

#### 3.2.3 Muestra

Los puntos de muestreo y los ensayos de laboratorio, estaciones geotécnicas.

#### 3.2.4 Unidad De Análisis

Litología, tipo de rocas y suelos, precipitación, infiltración, sismicidad.

### 3.2.5 Definición de Variables

Para la investigación se han identificado las variables independientes y dependientes, las cuales se nombran en la Tabla 21.

Tabla 21. Definición de Variables

<b>Variables Independientes</b>	Precipitación, infiltración, sobrecargas y sismicidad
<b>Variables dependientes</b>	Inestabilidad Geotécnica Asentamiento Expansión

### 3.2.6 Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

#### *Técnicas*

La investigación se realizó en tres etapas: la primera etapa es de gabinete, se realizó una recolección, selección y análisis bibliográfico acerca de la línea de investigación; la segunda etapa es de campo, en donde se realizaron la toma de datos y la recolección de muestras de roca y suelo para identificar el comportamiento geotécnico de ambos; y una tercera etapa de gabinete, donde se realizó el análisis y procesamiento de datos obtenidos en campo y en el laboratorio.

#### *Instrumentos y Equipos*

Los instrumentos utilizados en la investigación son: libreta de campo, bolsas para muestreo, instrumentos de investigación geotécnica como formatos para mecánica de rocas (RMR, RQD Y GSI) y para suelos (formatos para humedad natural, granulometría, límites de Atterberg, etc.). Plano topográfico y geológico. Los equipos utilizados se detallan a continuación: Brújula Brunton, GPS Garmin, lupa de 20x, protector, rayador, equipos de laboratorio de mecánica de suelos, computadora, cámara fotográfica.

### 3.2.7 Análisis e interpretación de datos

La información recopilada, fue procesada para su posterior análisis con los softwares: ArcGIS 10.4, Software RocData v.5.0, Dips v.7.0, Slide v.6.0, Google Earth, Sasplanet, Loadcap y Geo5.

### 3.3 GEOLOGÍA LOCAL

Las unidades geológicas presentes en el área de investigación son formaciones pertenecientes al Cretácico Inferior tales como: Formación Farrat, Formación Inca y Formación Chúlec, el Volcánico Rumiorco, el cual posee una edad comprendida en el Paleógeno – Oligoceno, consiste en un depósito de flujos piroclásticos de pómez y cenizas, de coloración gris blanquecina, ricos en cristales de composición riolítica y finalmente se encuentran depósitos cuaternarios coluvio aluviales. (Ver P0-2, Plano Geológico).

#### 3.3.1 Formación Farrat (Ki-fa)

Esta formación representa el nivel superior de la parte clástica del Cretáceo inferior. Consta de cuarcitas y areniscas blancas de grano medio a grueso y está ubicada al Sur Este de la zona de investigación.

#### 3.3.2 Formación Inca (Ki-in)

Se encuentran afloramientos de esta formación en los cortes de carretera, está constituida por lutitas ferruginosas intercaladas con algunos niveles de areniscas y limolitas, se encuentra fuertemente fracturada y alterada, su espesor promedio es de 100m.

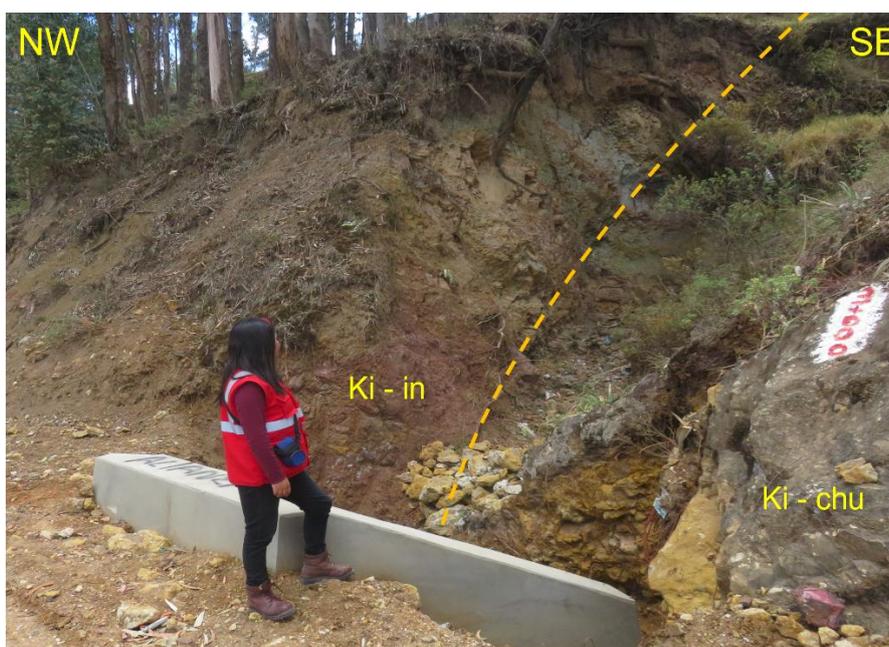


Foto 2. Contacto Litológico entre las Formaciones Inca y Chúlec, en el corte de carretera en la progresiva Km 3+000.

### 3.3.3 Formación Chúlec (Ki-chu)

Los afloramientos de esta unidad se presentan al Nor-Oeste de la zona de estudio, se caracteriza por presentar pequeños bancos de calizas con intercalación de lutitas y mínimas cantidades de margas, tienen un color crema amarillento por alteración, su espesor promedio es de 150m.



Foto 3. Calizas intercaladas con arcillolitas de la Formación Chúlec al Nor Oeste de la zona de estudio, en la progresiva km 3+020

### 3.3.4 Volcánico Rumiorco (Po-Ru/03)

El Volcánico Rumiorco, posee una edad comprendida en el Paleógeno – Oligoceno está conformado por depósitos de flujos piroclásticos de pómez y cenizas, gris blanquecinas, generalmente conformado por roca dacita y en mínima proporción de roca riolítica. (Ver Anexo 3.1, Formato de Clasificación de Rocas Volcánicas - Riolíta).



Foto 4. Macizo rocoso riolítico ligeramente meteorizado y diaclasado.

### 3.4 UNIDADES MORFOGENÉTICAS

Teniendo en cuenta que el área de estudio es relativamente pequeña, para clasificar las geoformas o unidades morfofenéticas, se utilizan los conceptos y la tabla de clasificación para unidades morfológicas, establecida por Rodríguez (2016), donde clasifica en planicies, lomadas, laderas y escarpas según su pendiente y geometría (Ver Plano-03, Plano de Pendientes).

#### 3.4.1 Planicies (0° - 8°)

Se denomina planicie a una superficie bastante homogénea, con un rango de pendientes de 0° a 8°, poco cambiante en su morfología, ligeramente ondulada, poca erosión actual y fácil de manejar para actividades agrícolas y ganaderas. Comprende áreas distribuidas en el cauce de ríos y quebradas, relacionadas con los depósitos fluviales y coluviales principalmente.



Foto 5. Planicie ligeramente ondulada con poca erosión y con un ángulo de pendiente de 6° aproximadamente.

### 3.4.2 Lomada (8° -20°)

Terrenos con una superficie ligeramente irregular, con suaves pendientes y elevaciones de bajo ángulo, se encuentran en una extensión moderada en el área de investigación, conformada generalmente en depósitos cuaternarios aluviales y coluvio - aluviales.



Foto 6. Lomada con un ángulo de pendiente 18°, formados por procesos denudativos y erosivos en depósitos coluvio aluviales.

### 3.4.3 Laderas (20°-50°)

Superficies de terrenos con inclinaciones moderadas, a diferencia de las planicies y lomadas su cobertura vegetal es menor, estas geoformas se localizan en las partes medio – altas de las montañas, relacionada con depósitos aluviales, coluviales y depósitos volcánicos, son las unidades con mayor extensión en el área de estudio.



Foto 7. Ladera con un ángulo aproximado de 40°, en el margen derecho de la carretera en la progresiva Km 4+920.

#### 3.4.4 Escarpas (>50°)

Se caracteriza por presentar una elevada pendiente, se ve continuamente afectada por agentes erosivos e hidrodinámicos, causando inestabilidad en la plataforma de vía, que se encuentra cimentada sobre esta, presencia poco predominante en la zona de estudio.

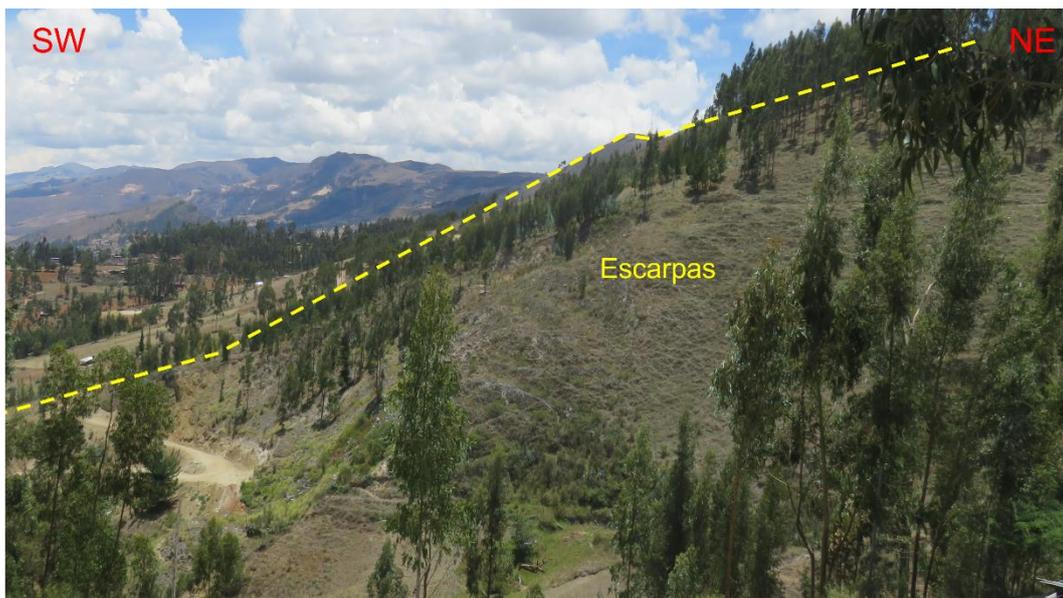


Foto 8. Escarpe con una pendiente elevada aproximada de 65°.

### 3.5 HIDROLOGÍA

Actualmente no se observan morfologías de drenaje muy desarrollado, siendo la quebrada Dos Aguas el tributario más importante, afluyendo al inicio de la zona urbana. Generalmente, transporta agua entre los meses de noviembre a mayo, siendo los meses de mayor caudal entre enero a marzo (INGEMMET, 2020).

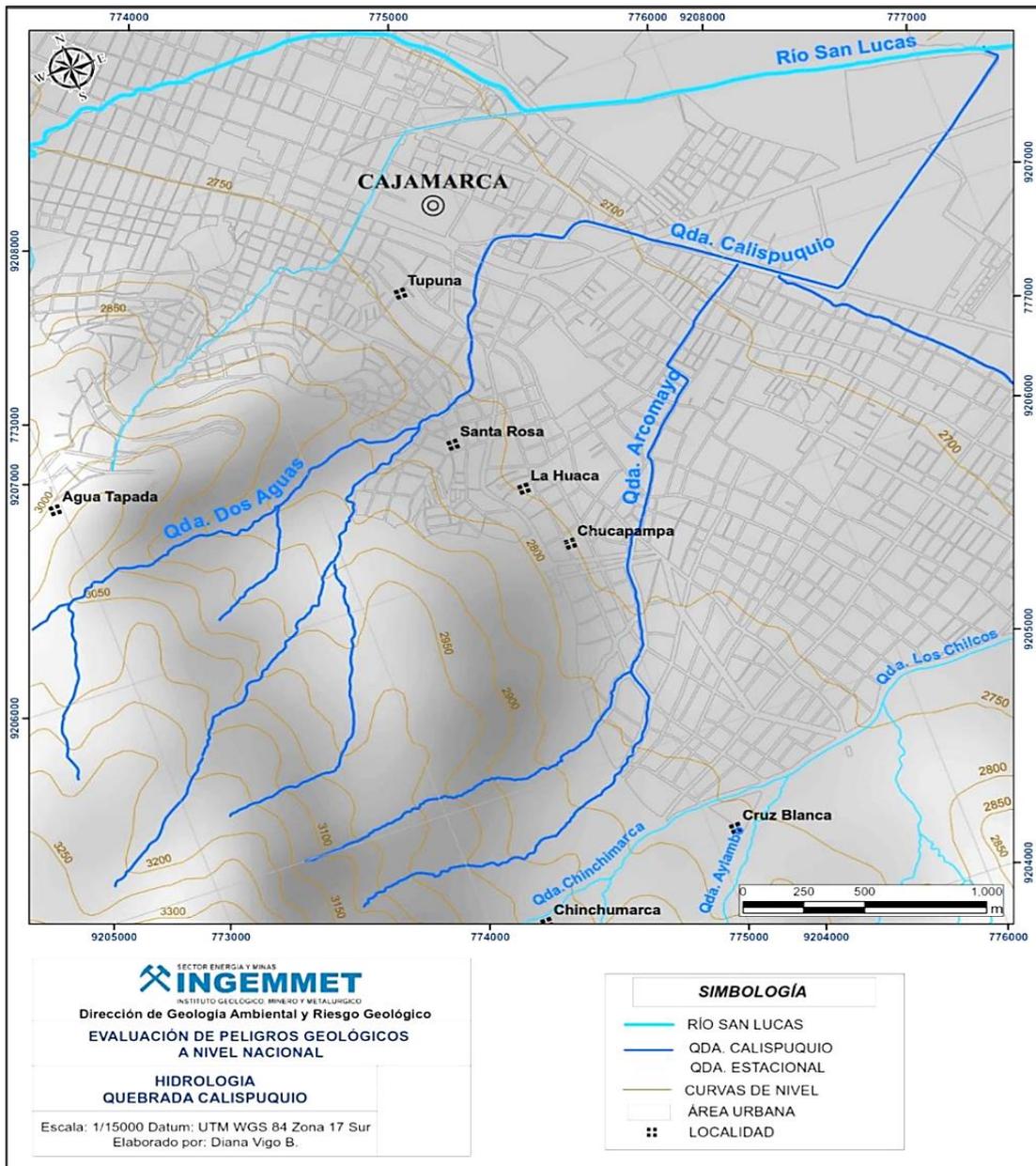


Figura 15. Quebrada Dos Aguas, afluente de la quebrada Calispuquio.  
Fuente: Tomado de INGEMMET, (2020).

## Quebrada Dos Aguas

La Quebrada Dos Aguas es el afluente y el tributario más importante de la Quebrada Calispuquio, originándose por drenajes de escorrentías superficiales.



Foto 9. Vista Panorámica de la Quebrada Dos Aguas. Coordenadas: E: 773408 N: 9206146

### 3.5.1 Precipitación

En cuanto a la precipitación la data se obtuvo de la Estación Climatológica Ordinaria Estación Weberbauer del Campus Universitario de la UNC, la cual está validada en la página web del SENAMHI. Se analizó las precipitaciones comprendidas entre los años 2020-2024, en donde las precipitaciones mínimas se presentan entre los meses de mayo a setiembre y las máximas, entre los meses de enero a marzo. El mes más seco es Julio, en el que se han registrado 29,1 mm de precipitación en promedio mensual y la mayor cantidad de precipitación ocurre en marzo, con un promedio de 133mm.

Tabla 22. Cuadro de Precipitaciones comprendidas en el periodo 2020-2024

PRECIPITACIONES COMPRENDIDAS EN EL PERIODO 2020-2024													
MES/ AÑO	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic	Prom.. Anual
2020	144.7	173.7	148.4	147.5	62.32	3.8	2.36	100	43.6	92	83.8	146.2	<b>95.7</b>
2021	142.5	132.6	156.79	203.2	94.47	11.15	41.2	12.9	30	173.5	126	171.4	<b>108</b>
2022	193.5	273.4	166.1	80.82	112.6	42.9	28.2	20.7	16.1	106	157	194.4	<b>116.1</b>
2023	95.4	79	210.71	101	63.37	72.9	43.7	33.6	66	22	57.5	91.71	<b>78.1</b>
2024	132.6	67.18	210.7	67.18	39.75	16.4	30.2	49.3	88.7	114	106	61.8	<b>82</b>
<b>Prom mensual</b>	<b>141.8</b>	<b>145.176</b>	<b>178</b>	<b>119.9</b>	<b>74.5</b>	<b>29.4</b>	<b>29.1</b>	<b>43.3</b>	<b>48.9</b>	<b>102</b>	<b>106</b>	<b>133.1</b>	

### 3.6 COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO

El comportamiento geotécnico del Volcánico Rumiorco del km 2+000 al km 5+000 de la carretera Santa Apolonia - Cumbe mayo, se ha sectorizado en seis estaciones tomando puntos de control críticos, donde se determinó el comportamiento Geomecánico de rocas y suelos, para determinar la caracterización geomecánica de rocas, se realizó mediante la Valoración del Macizo Rocoso (RMR) Bieniawski 1989; Índice de Calidad de la Roca (RQD) e Índice de Resistencia Geológica (GSI) según Hoek, 2013.

Por otro lado, para suelos se ejecutó calicatas 3 calicatas donde se obtuvo 2 muestras de cada calicata y se llevó a cabo su análisis en el laboratorio de ensayos de suelos.

Tabla 23. Puntos de Control de las estaciones geotécnicas

<b>PUNTO DE CONTROL</b>	<b>Este</b>	<b>Norte</b>	<b>Cota</b>	<b>Progresiva</b>	<b>Caracterización Geotécnica</b>
PC-01	9206633	773149	3057	Km 2+000	Suelo
PC-02	9206220	772571	3071	Km 2+800	Talud
PC-03	92060660	772090	3115	Km 3+550	Suelo
PC-04	9205914	772707	3119	Km 4+200	Talud
PC-05	9205720	773105	3171	Km 4+920	Suelo
PC-06	9205508	772963	3163	Km 5+000	Talud

#### 3.6.1 Caracterización Geotécnica

##### Puntos de Control 01 - Progresiva km 2+000

En el punto de control 01, se realizó la excavación de una calicata de profundidad 1.20m de donde se extrajo dos muestras, la primera del primer estrato de 0,0.0- 0.50m y la segunda de 0,0.50-1.20m. De manera que, en los ensayos de laboratorio se obtuvo de acuerdo a la clasificación SUCS, una Arena Limosa (SM) y según AASHTO A-2-4(0) para el primer estrato, mientras que para el segundo estrato se obtuvo Grava limosa con Arena (GM) y A-2-7(0) respectivamente.

En la figura N°16, se muestra el registro de excavación de la calicata N°1 en el progresivo km 2+000, según las normas técnicas NTP 339.150, ASTM D 2488 y MTC E 101.

REGISTRO DE EXCAVACIÓN DE CALICATA NORMA (NTP 339.150   ASTM D 2488   MTC E 101)					
PROFUNDIDAD (m)	CLASIFICACIÓN SUCS	CLASIFICACIÓN AASHTO	SIMBOLOGÍA	DESCRIPCIÓN DE ESTRATIGRAFÍA	ESTRATO
0.50m	SM	A - 2 - 4(0)		0.00 - 0.50m.- ARENA LIMOSA.  Suelo A - 2 - 4 (0) posee humedad baja 11,6 % (contenido de humedad) color marron claro, con el 37%grava, de arena el 48,8%, y el 14,1% de finos,con límite líquido de 38,1%,límite plástico 31,4% y de baja plasticidad 6.7. %	M1
1.20m				GM	



Figura 16.Registro de Excavación de la Calicata N°1 (PC-01) en la progresiva Km 2+000.

➤ **Análisis Granulométrico de la Muestra 1 de la Calicata N°1**

Tabla 24. Análisis Granulométrico de la muestra 1 (M1) de la calicata N°1 en la progresiva Km 2+000 a una profundidad de 0.50m, según las Normas (NTP 339.128 , ASTM D 422 , MTC E 107)

TAMICES ASTM	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE PARCIAL RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA DE ENSAYO	
3"	75.000	0.0	0.0	0.0	100.0	<b>PESO TOTAL</b>	8524.0 gr
2 1/2"	63.000	0.0	0.0	0.0	100.0	<b>PESO FRACCIÓN</b>	121.3 gr
2"	50.000	446.0	5.2	5.2	94.8	<b>TAMAÑO MÁXIMO</b>	2
1 1/2"	37.500	216.0	2.5	7.8	92.2	<b>PORC. DE GRAVA</b>	37.0 %
1"	25.000	376.0	4.4	12.2	87.8	<b>PORC. DE ARENA</b>	48.8 %
3/4"	19.000	62.0	0.7	12.9	87.1	<b>PORC. DE FINOS</b>	14.1 %
1/2"	12.500	-	-	-	-	<b>LÍMITE LÍQUIDO</b>	38.1 %
3/8"	9.500	1398.0	16.4	29.3	70.7	<b>LÍMITE PLÁSTICO</b>	31.4 %
N° 4	4.750	660.0	7.7	37.0	63.0	<b>ÍNDICE PLÁSTICO</b>	6.7 %
N° 8	2.360	-	-	-	-	<b>CLASF. SUCS</b>	<b>SM</b>
N° 10	2.000	-	-	-	-	<b>CLASF. AASHTO</b>	<b>A - 2 - 4(0)</b>
N° 16	1.180	-	-	-	-	<b>D<sub>10</sub></b>	0.075 mm
N° 20	0.850	-	-	-	-	<b>D<sub>30</sub></b>	0.198 mm
N° 30	0.600	-	-	-	-	<b>D<sub>60</sub></b>	0.780 mm
N° 40	0.425	46.20	24.0	61.0	39.0	<b>COEF. DE UNIF.</b>	10.4
N° 50	0.300	-	-	-	-	<b>COEF. DE CURV.</b>	0.7
N° 60	0.250	-	-	-	-	<b>MÓDULO DE FINEZA</b>	3.40
N° 80	0.180	-	-	-	-		
N° 100	0.150	37.90	19.7	80.7	19.3	<b>DESCRIPCIÓN</b>	
N° 140	0.106	-	-	-	-	<b>ARENA LIMOSA CON GRAVA</b>	
N° 200	0.075	10.00	5.2	85.9	14.1		
FONDO		27.20	14.1	100.0			

En la Figura N°17, se observa la Curva Granulométrica de la muestra 1 (M1) de la calicata N°1 en la progresiva Km 2+000 a una profundidad de 0.50m, según las Normas (NTP 339.128 , ASTM D 422 y MTC E 107).

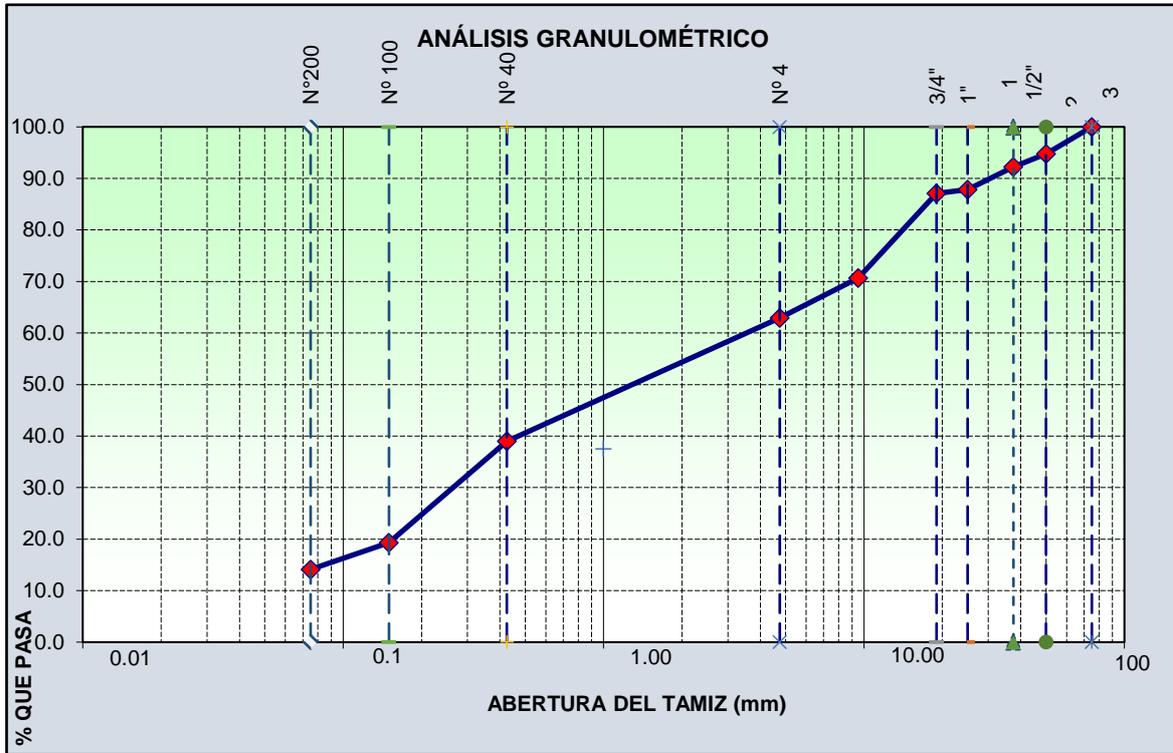


Figura 17. Curva Granulométrica de la muestra 1 (M1) de la calicata N°1 en la progresiva Km 2 +000

### ➤ Límites de Atterberg de la Muestra 1 de la Calicata N°1

Para determinar los límites de Atterberg (Límites de Consistencia), se realizó el ensayo de laboratorio, de acuerdo a la siguiente normativa ((NTP 339.129, ASTM D 4318 y MTC E 110) para límite líquido y para determinar el límite plástico e índice de plasticidad fue según las normas (NTP 339.129, ASTM D 4318, MTC E 111), así como se muestra en la figura N°18

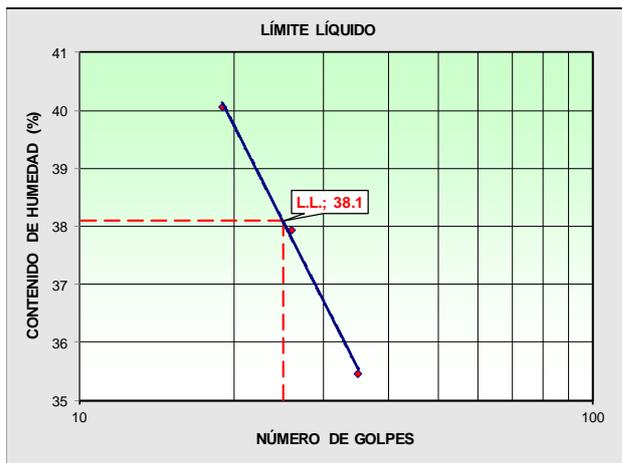
Teniendo como resultado de la muestra que el límite líquido es de 38.1%, el límite plástico es de 31.4% y el índice de plasticidad es de 6.7%.

**MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS**  
NORMA (NTP 339.129 | ASTM D 4318 | MTC E 110)

Nº DE TARA		-	-	-
PESO DE LA TARA (gr)		27.10	28.00	28.20
PESO DE SUELO HÚMEDO + TARA (gr)		71.80	72.00	69.80
PESO DE SUELO SECO + TARA (gr)		60.10	59.90	57.90
PESO DE AGUA (gr)		11.70	12.10	11.90
PESO DE SUELO SECO (gr)		33.00	31.90	29.70
HUMEDAD (%)		35.5%	37.9%	40.1%
Nº DE GOLPES		35	26	19

**MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS**  
NORMA (NTP 339.129 | ASTM D 4318 | MTC E 111)

Nº DE TARA		-	-	PROMEDIO
PESO DE LA TARA (gr)		26.80	27.00	
PESO DE SUELO HÚMEDO + TARA (gr)		38.40	39.25	
PESO DE SUELO SECO + TARA (gr)		35.60	36.35	
PESO DE AGUA (gr)		2.80	2.90	
PESO DE SUELO SECO (gr)		8.80	9.35	
HUMEDAD (%)		31.8%	31.0%	31.4%



CONSTANTES FÍSICAS DE LA MUESTRA	
LÍMITE LÍQUIDO	38.1%
LÍMITE PLÁSTICO	31.4%
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	6.7%

OBSERVACIONES:

---



---

Figura 18. Límites de Atterberg de la muestra 1, de la calicata N°1 en la progresiva Km+200.

➤ **Contenido de Humedad de la Muestra 1 de la Calicata N°1**

Para determinar el contenido de humedad, se tuvo en cuenta las siguientes normas (NTP 339.127, ASTM D 2216 y MTC E 108), teniendo como resultado 11.6% de contenido de humedad en la Muestra 1, de la Calicata N°1 en la Progresiva Km 2+000

Tabla 25. Contenido de humedad en la Muestra 1 de la Calicata N°1 en la Progresiva Km 2+000

Nº Muestra	Profundidad	Peso (Suelo Húmedo+ Tara gr)	Peso (Suelo Seco+ Tara gr)	Peso de Tara (gr)	Peso de agua (gr)	Peso de Suelo seco (gr)	Contenido de Humedad
M1	0.0- 050 m	189.2	172.4	27.1	16.8	145.3	11.6%

➤ **Análisis Granulométrico de la Muestra 2 de la Calicata N°1**

Tabla 26. Análisis Granulométrico de la muestra 2 (M2) de la calicata N°1 en la progresiva Km 2+000 a una profundidad de 1.20m, según las Normas (NTP 339.128, ASTM D 422, MTC E 107)

TAMICES ASTM	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE PARCIAL RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA DE ENSAYO	
3"	75.000	0.0	0.0	0.0	100.0	<b>PESO TOTAL</b>	9652.0 gr
2 1/2"	63.000	-	-	-	-	<b>PESO FRACCIÓN</b>	175.6 gr
2"	50.000	-	-	-	-	<b>TAMAÑO MÁXIMO</b>	1
1 1/2"	37.500	1108.0	11.5	11.5	88.5	<b>PORC. DE GRAVA</b>	38.8 %
1"	25.000	489.0	5.1	16.5	83.5	<b>PORC. DE ARENA</b>	34.9 %
3/4"	19.000	765.0	7.9	24.5	75.5	<b>PORC. DE FINOS</b>	26.4 %
1/2"	12.500	-	-	-	-	<b>LÍMITE LÍQUIDO</b>	44.8 %
3/8"	9.500	830.0	8.6	33.1	66.9	<b>LÍMITE PLÁSTICO</b>	32.8 %
N° 4	4.750	550.0	5.7	38.8	61.2	<b>ÍNDICE PLÁSTICO</b>	12.0 %
N° 8	2.360	-	-	-	-	<b>CLASF. SUCS</b>	<b>GM</b>
N° 10	2.000	-	-	-	-	<b>CLASF. AASHTO</b>	<b>A-2-7 (0)</b>
N° 16	1.180	-	-	-	-	<b>D<sub>10</sub></b>	0.075 mm
N° 20	0.850	-	-	-	-	<b>D<sub>30</sub></b>	0.075 mm
N° 30	0.600	-	-	-	-	<b>D<sub>60</sub></b>	0.817 mm
N° 40	0.425	61.20	21.3	60.1	39.9	<b>COEF. DE UNIF.</b>	10.9
N° 50	0.300	-	-	-	-	<b>COEF. DE CURV.</b>	0.1
N° 60	0.250	-	-	-	-	<b>MÓDULO DE FINEZA</b>	3.53
N° 80	0.180	-	-	-	-		
N° 100	0.150	25.30	8.8	68.9	31.1	<b>DESCRIPCIÓN</b>	
N° 140	0.106	-	-	-	-	<b>GRAVA LIMOSA CON ARENA</b>	
N° 200	0.075	13.50	4.7	73.6	26.4		
FONDO		75.60	26.4	100.0			

En la Figura N°19, se observa la Curva Granulométrica de la muestra 2 (M2) de la calicata N°1 en la progresiva Km 2+000 a una profundidad de 1.20m, según las Normas (NTP 339.128, ASTM D 422 y MTC E 107).

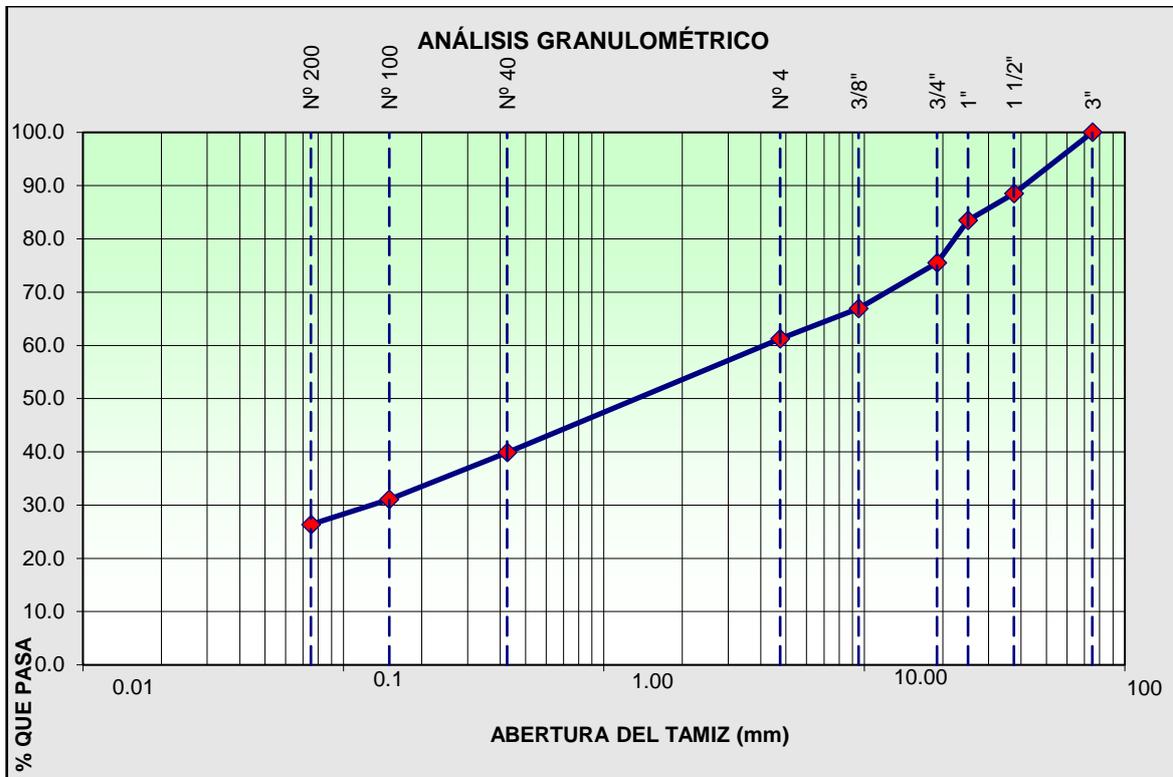


Figura 19. Curva Granulométrica de la muestra 2 (M2) de la calicata N°1 en la progresiva Km 2+000.

### ➤ Límites de Atterberg de la Muestra 2 de la Calicata N°1

Para determinar los límites de Atterberg (Límites de Consistencia), de la muestra 2 de la calicata N°1, se realizó el ensayo de laboratorio, de acuerdo a la siguiente normativa ((NTP 339.129, ASTM D 4318 y MTC E 110) para límite líquido , y para determinar el límite plástico e índice de plasticidad fue según las normas (NTP 339.129, ASTM D 4318, MTC E 111), así como se muestra en la figura N°20.

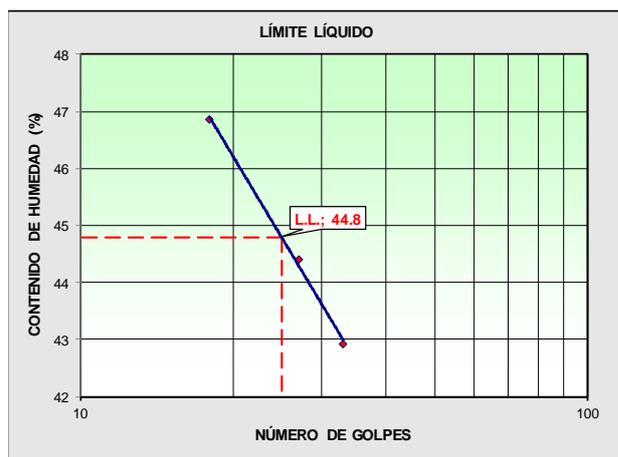
Teniendo como resultado de la muestra que el límite líquido es de 44,8%, el límite plástico es de 32,8% y el índice de plasticidad es de 12%.

**MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS**  
NORMA (NTP 339.129 | ASTM D 4318 | MTC E 110)

Nº DE TARA		-	-	-
PESO DE LA TARA (gr)		27.80	27.90	28.10
PESO DE SUELO HÚMEDO + TARA (gr)		62.10	65.30	63.20
PESO DE SUELO SECO + TARA (gr)		51.80	53.80	52.00
PESO DE AGUA (gr)		10.30	11.50	11.20
PESO DE SUELO SECO (gr)		24.00	25.90	23.90
HUMEDAD (%)		42.9%	44.4%	46.9%
Nº DE GOLPES		33	27	18

**MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS**  
NORMA (NTP 339.129 | ASTM D 4318 | MTC E 111)

Nº DE TARA		-	-	PROMEDIO
PESO DE LA TARA (gr)		27.60	28.30	
PESO DE SUELO HÚMEDO + TARA (gr)		39.00	41.60	
PESO DE SUELO SECO + TARA (gr)		36.20	38.30	
PESO DE AGUA (gr)		2.80	3.30	
PESO DE SUELO SECO (gr)		8.60	10.00	
HUMEDAD (%)		32.6%	33.0%	32.8%



CONSTANTES FÍSICAS DE LA MUESTRA	
LÍMITE LÍQUIDO	44.8%
LÍMITE PLÁSTICO	32.8%
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	12.0%

OBSERVACIONES:

---



---

Figura 20. Límites de Atterberg de la muestra 2, de la calicata N°1 en la progresiva Km 2+000.

➤ **Contenido de Humedad de la Muestra 2 de la Calicata N°1**

Para determinar el contenido de humedad, se tuvo en cuenta las siguientes normas (NTP 339.127, ASTM D 2216 y MTC E 108), teniendo como resultado 14.5 % de contenido de humedad en la Muestra 2, de la Calicata N°1 en la Progresiva Km 2+000.

Tabla 27. Contenido de humedad en la Muestra 2 de la Calicata N°1 en la Progresiva Km 2+000

Nº Muestra	Profundidad	Peso (Suelo Húmedo+ Tara gr)	Peso (Suelo Seco+ Tara gr)	Peso de Tara (gr)	Peso de agua (gr)	Peso de Suelo seco (gr)	Contenido de Humedad
M2	0.50 – 1.20 m	205.7	183.3	28.4	22.4	154.9	14.5%

➤ **Asentamiento en la Calicata N°1**

Para realizar el análisis del asentamiento en la calicata N°1 se realizó mediante el software Geo5, donde algunos parámetros de entrada se obtuvieron de los ensayos de laboratorio y los restantes se obtuvieron del software propiamente dicho. Para ello se utilizó el método del módulo edométrico.

Para determinar el asentamiento, se analizó en tres escenarios: En estado natural, con sobrecarga y con saturación total y sobrecarga,

***En Estado Natural***

En estado Natural, es decir sin la presencia de sobrecarga, ni de saturación total, la calicata no presenta asentamiento.

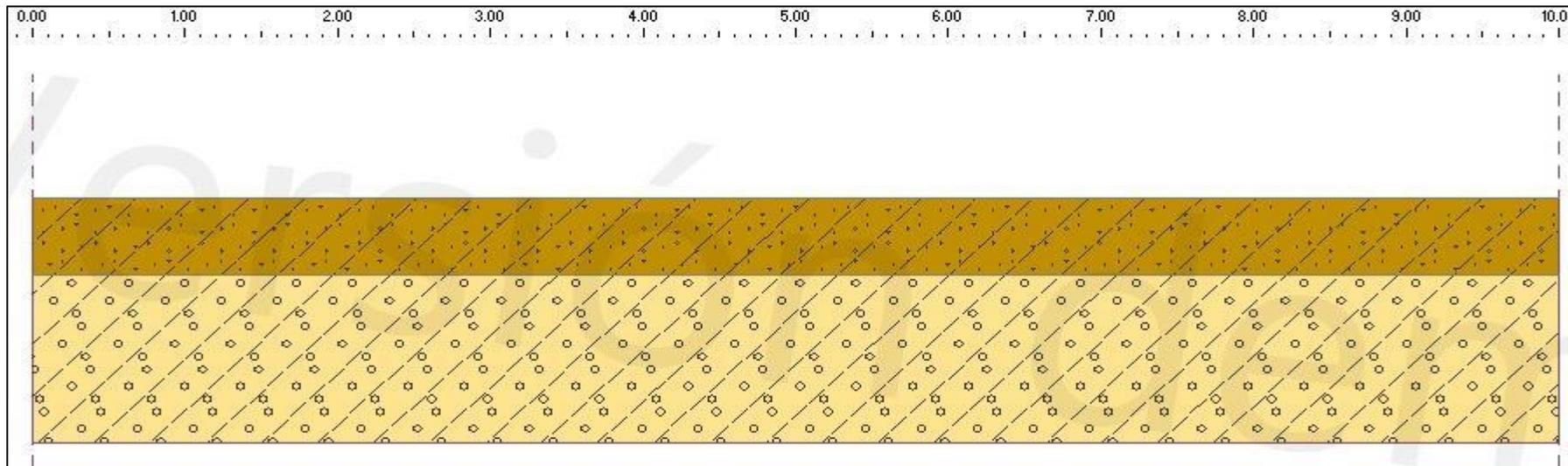


Figura 21. Asentamiento en la Calicata N°1 en estado natural.

## Sobrecarga

Para la sobrecarga se tuvo en cuenta lo estipulado por MTC, Reglamento Nacional de Vehículos (2003), es decir la tabla N°17, por ello que consideramos como carga de  $60 \text{ kN/m}^2$ .

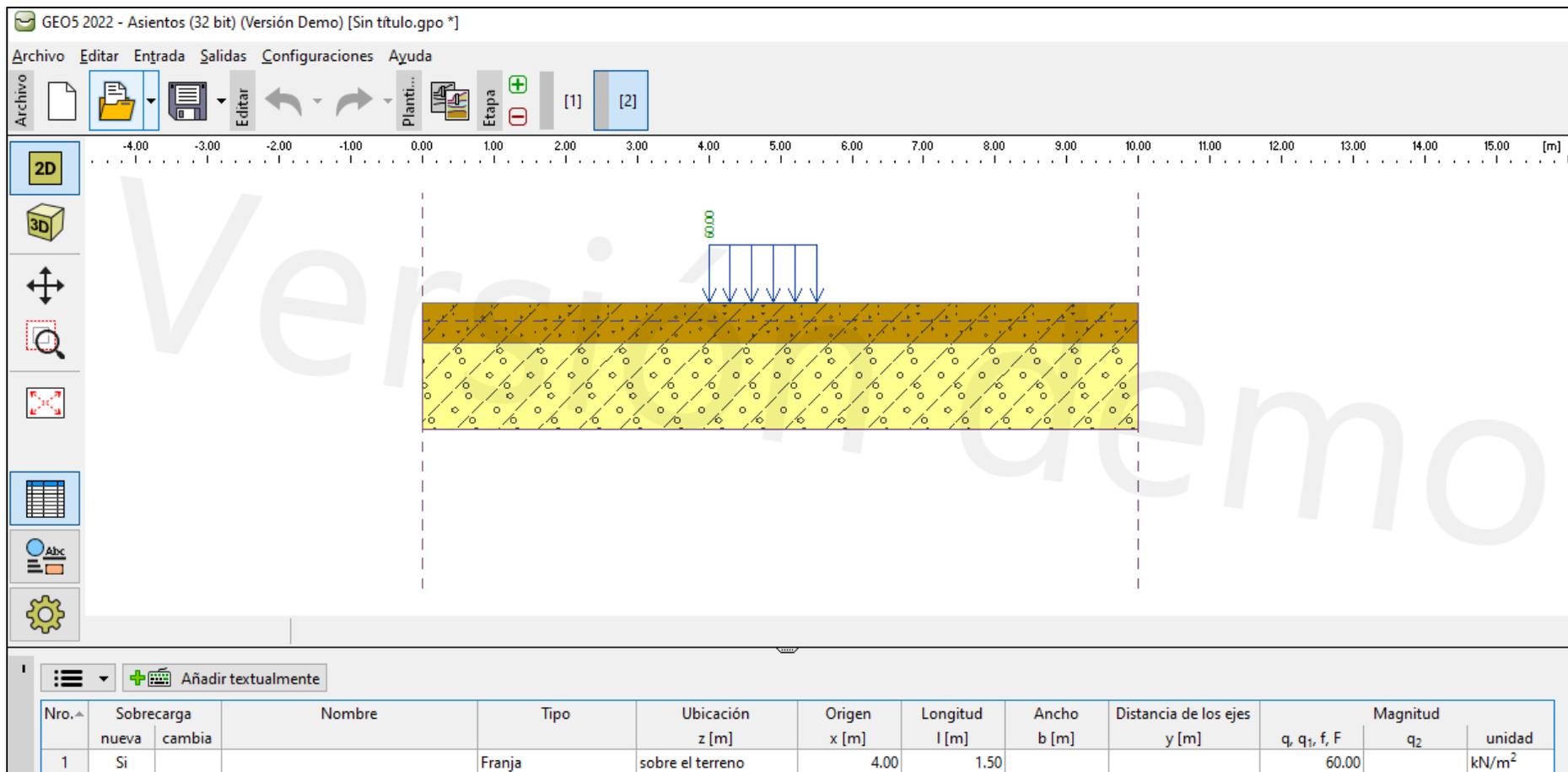


Figura 22. Asentamiento en la Calicata N°1 con una sobrecarga de  $60 \text{ kN/m}^2$ .

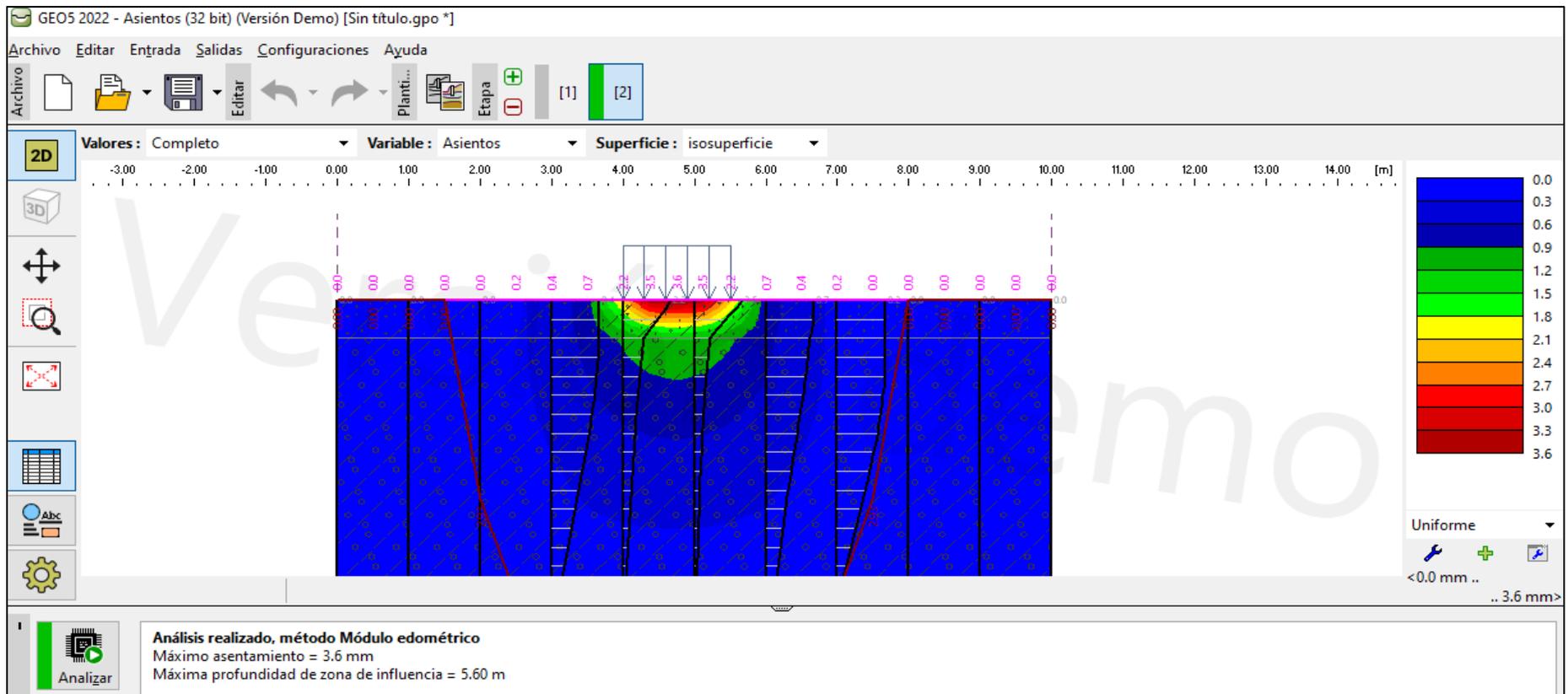


Figura 23. Análisis de Isosuperficie con el Módulo edómetro con la sobrecarga en la Calicata N°1, el máximo asentamiento es de 3.6mm y máxima profundidad de zona de influencia es 5.60m.

### Sobrecarga más Saturación

Para determinar sobrecarga más saturación se consideró dos parámetros importantes la sobrecarga de  $60 \text{ kN/m}^2$  y el nivel freático a 0.25 de profundidad.

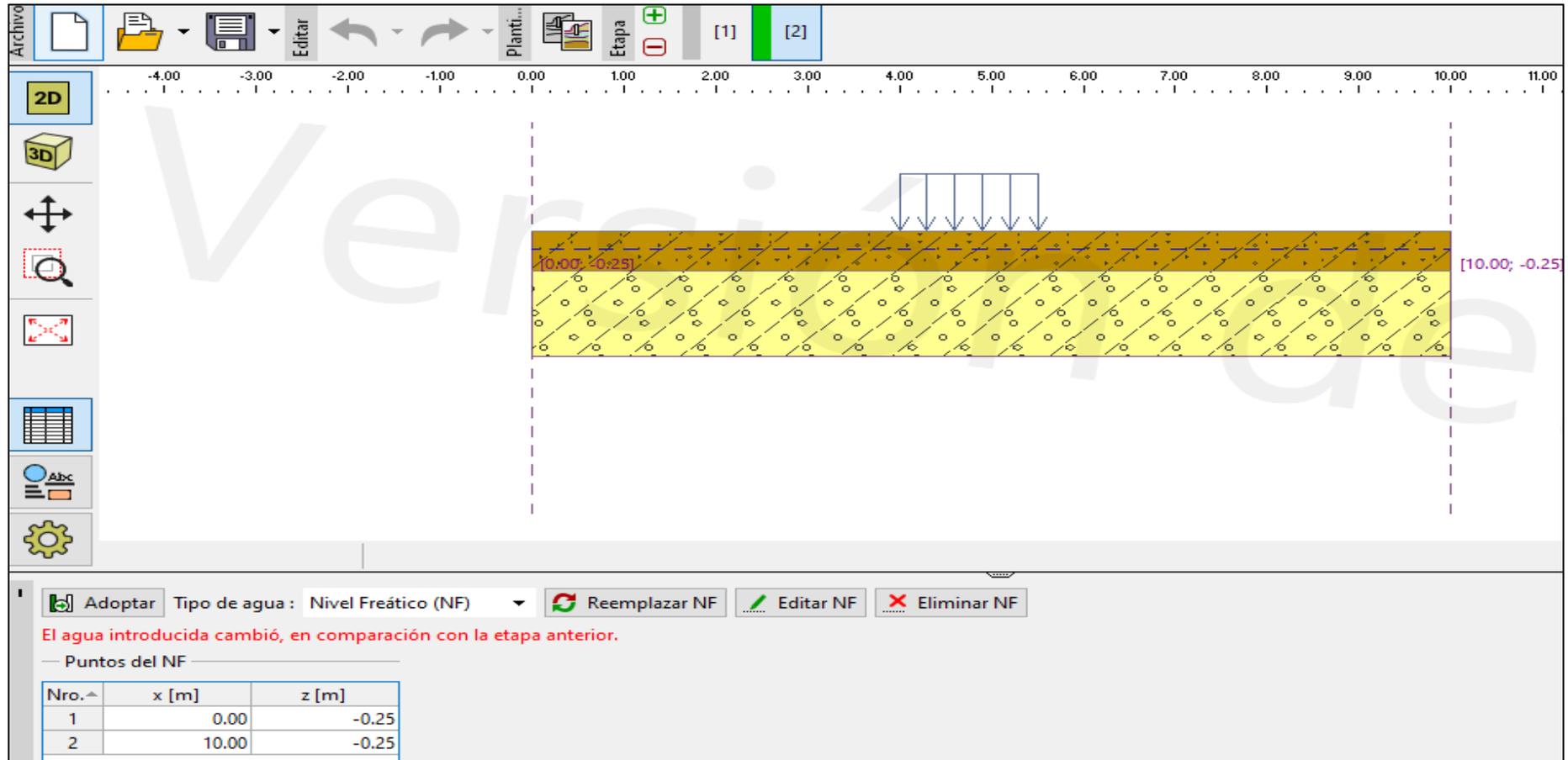


Figura 24. Asentamiento de la calicata N°1 con sobrecarga más saturación.

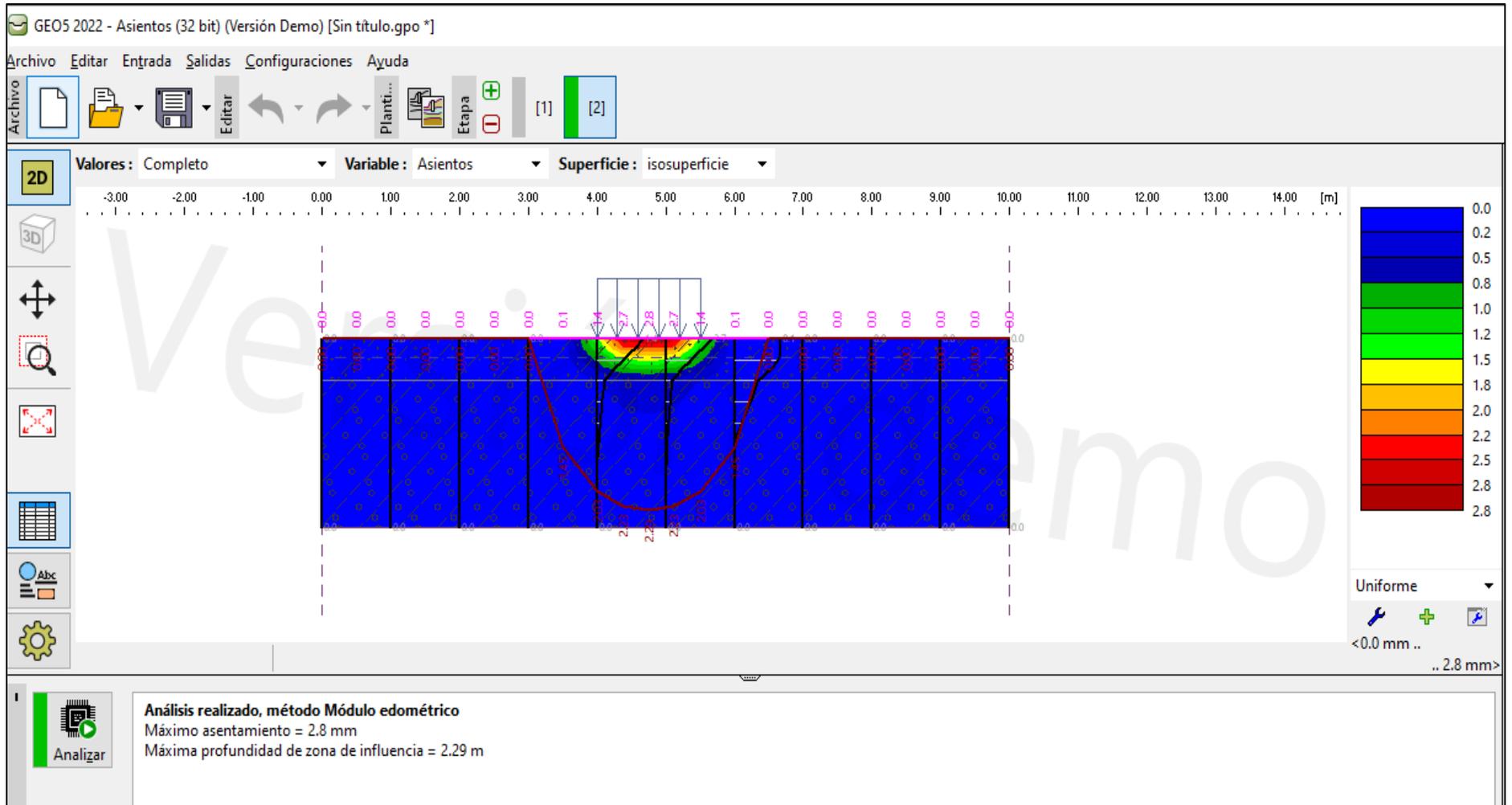


Figura 25. Análisis de Isosuperficie con el Módulo edómetro con sobrecarga y saturación en la calicata N°1, el máximo asentamiento es de 2.8 mm y máxima profundidad de zona de influencia es 2.29m.

➤ **Expansión en la Calicata N°1**

Según lo expuesto por Vásquez (2018), es decir, tomando como referencia la tabla N° 15 clasificación de suelos expansivos, para evaluar el potencial de expansividad de suelos en función al índice plástico y límite líquido y con los datos obtenidos en laboratorio de las dos muestras correspondientes a la calicata N°1, se puede determinar que son suelos de potencial de expansión bajo ya que su índice de plasticidad es menor a 18 y su límite líquido es mayor a 15.

La muestra 1 de Calicata N°1, posee un índice de plasticidad de 6,7% y 38,1% en cuanto a índice de plasticidad, por lo cual según el intervalo descrito líneas arriba es un suelo con potencial de expansión bajo.

Tabla 28. Potencial de expansión de la muestra 1 de Calicata N°1

Potencial de Expansión	Índice de plasticidad	Límite de Líquido
Bajo	<18	>15
Bajo	6,7%	38,1%

La muestra 2 (M2) de Calicata N°1, posee un índice de plasticidad de 12% y 44,8% en cuanto a índice de plasticidad, considerando estos parámetros es un suelo con potencial de expansión bajo.

Tabla 29. Potencial de expansión de la muestra 2 de Calicata N°1

Potencial de Expansión	Índice de plasticidad	Límite de Líquido
Bajo	<18	>15
Bajo	12%	44,8%

## Puntos de Control 02- Progresiva Km 2+ 800

El punto de control (PC-02), está constituido por roca volcánica con moderado grado de fracturamiento, meteorización fresca, con blocosidad tabular de espesor: 0.80 m. a 1.50 m., con estimación de resistencia 88 MPa. con caracterización geomecánica: RQD = 74.98%, RMR = 57 (Tipo III) y GSI = 52 de calidad regular, constituido por tres familias de discontinuidades; con sección de corte V:H 8:2, estabilizando la cara libre del talud de corte. (Ver Anexo 3.2, Formato de Clasificación de Rocas Volcánicas - Dacita).

Descripción	
Este (m.)	772571
Norte (m.)	9206220
Cota (msnm.)	3071
Parámetros del talud	
Dip (°)	72°
DD (°)	284°
Altura (m.)	4.00
Progresiva	02+800

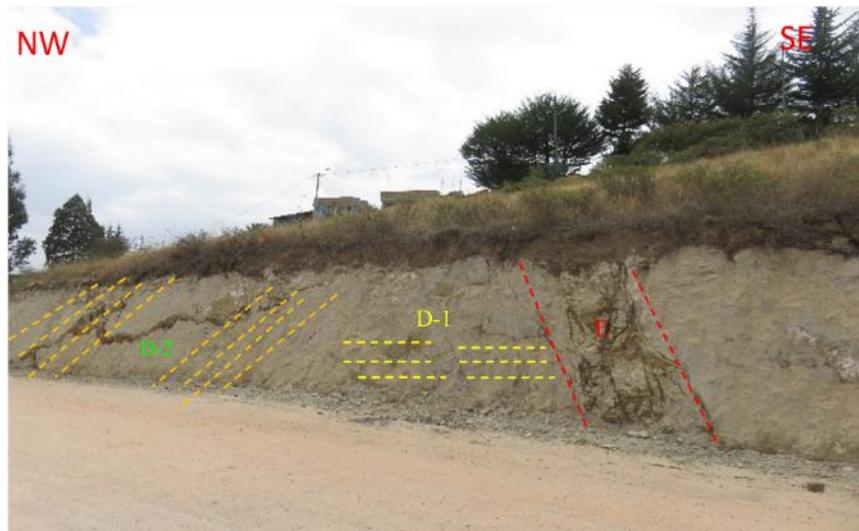


Foto 10. Roca volcánica Dacita, ubicada en el lado derecho de la carretera Santa Apolonia- Cumbe Mayo, en la progresiva km 2+800; constituida por tres discontinuidades que conforman el macizo rocoso del talud.

Tabla 30. Valoración del macizo Rocoso del punto de control geotécnico N°2

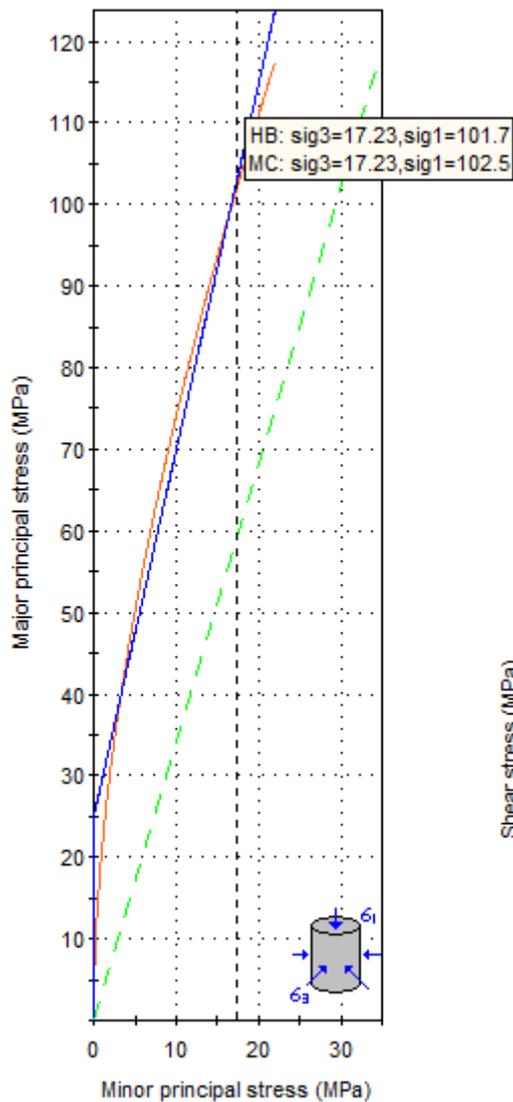
VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (RMR)							
PARAMETRO	RANGO DE VALORES Y VALORACIONES					Val.	
<b>Resistencia a compresión uniaxial (Mpa)</b>	>250 (15)	250-100 (12)	100-50 (7)	50-25 (4)	<25 (2) <5 (1) <1(0)	<b>7</b>	
<b>RQD (%)</b> $\lambda = N^\circ \text{ discontinuidades } / \text{ longitud } = 52/5.4 = 9.62$ $RQD = 100 \times e^{(-0.1\lambda)} \times (0.1\lambda + 1) \quad RQD = 74.98$	90 -100 (20)	75 – 90 (17)	50-75 (13)	25-50 (8)	<25 (3)	<b>13</b>	
<b>Espaciamiento (m)</b>	>2 m (20)	0.6 – 2 m (15)	0.2–0.6 (10)	0.06-0.2 (8)	<0.06 m (5)	<b>10</b>	
<b>Condición de las Juntas</b>	<b>Persistencia</b>	< 1m (6)	1-3 m (4)	3-10 m (2)	10-20m (1)	>20 m (0)	<b>4</b>
	<b>Abertura</b>	Cerrada (6)	< 0.01 mm (5)	0.1-1.0 mm (4)	1-5 mm (1)	>5mm (0)	<b>4</b>
	<b>Rugosidad</b>	Muy Rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Lisa (1)	Suave (0)	<b>5</b>
	<b>Relleno</b>	Ninguno (6)	Duro < 5mm (4)	Duro >5mm (2)	Suave <5mm (1)	Suave > 5mm (0)	<b>1</b>
	<b>Alteración</b>	Sana (6)	Lig. Alt (5)	Moder. Alt. (3)	Muy Alterada (1)	Descompuesta (0)	<b>3</b>
<b>AGUA SUBTERRANEA</b>	Seco (15)	Ligeramente Húmedo (10)	Húmedo (7)	Goteando (4)	Agua Fluyendo (0)	<b>10</b>	
<b>VALOR TOTAL RMR</b>						<b>57</b>	

<b>INDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICO GSI</b> <b>JUNTAS DE LA MASA ROCOSA</b> (Modificado por Hoek & Marinos, 2000).  A partir de la litología, estructura y la condición de superficie de las discontinuidades, estime el valor promedio de GSI.  No intente ser muy preciso. Escoger un rango de 33 a 37 es más realista de fijar GSI = 35. También notar que esta tabla no se aplica en mecanismos de falla controlado por estructuras. Donde se presenten planos estructuralmente débiles en una orientación desfavorable con respecto a la cara de la excavación, estos dominarán el comportamiento del macizo rocoso.  La resistencia al corte de las superficies en rocas que son propensas a deteriorarse como resultados de cambios en la humedad, se reducirá cuando exista presencia de agua. Cuando se trabaje en rocas de categoría regular a muy mala, puede moverse hacia la derecha para condiciones húmedas. La presión de poros se maneja en un análisis de esfuerzos efectivos.  <b>ESTRUCTURA</b>		<b>CONDICIONES SUPERFICIALES</b>  <b>MUY BUENA</b> Muy rugoso, Superficies frescas sin meteorización.  <b>BUENO</b> Rugoso, ligeramente meteorizado, superficies con óxidos.  <b>REGULAR</b> Lizas, moderadamente meteorizadas y superficies alteradas.  <b>MALA</b> Espejo de falla, altamente meteorizadas con recubrimientos compacto o rellenos o fragmentos.  <b>MALA</b> Espejo de falla, superficies altamente meteorizadas con recubrimientos de arcilla suave o rellenos.				
		← DISMINUYE CALIDAD DE SUPERFICIE →				
Intacta o Masivo: Espécimen de roca intacta o masivo insitu con pocas discontinuidades ampliamente espaciadas.	90 80			N/A	N/A	
Levemente fracturado: Macizo no disturbado, muy bien entrelazado, constituido por bloques cúbicos formados por tres familias de discontinuidades.	70					
Moderadamente fracturado: Entrelazado macizo rocoso parcialmente disturbado con bloques angulosos de varias caras formado por 4 o más familias de discontinuidades.	60		40			
Muy fracturado/Disturbado/Agrietada: Foleada con bloques angulosos formados por la intersección de muchas familias de discontinuidades. Persistencia de planos de estratificación o esquistocidad.	30			20		
Desintegrado: Pobremente entrelazado, macizo altamente fracturado compuesto de una mezcla de pedazos de rocas angulosas y redondeadas.	10					
Foliado/Laminado/Cizallado: Falta formación de bloques debido al pequeño espaciamiento o esquistocidad débil o planos de corte.	N/A	N/A				

GSI  
52

Figura 26. Sistema de Clasificación de Hoek-Brown . macizo rocoso presenta GSI 52.

Aplicando el programa RocData, se obtuvo las propiedades de resistencia de la masa rocosa, referidas a la compresión y tracción; en la en función de la gráfica  $\sigma_1$  vs.  $\sigma_3$ , se obtuvo la envolvente de falla, obteniendo tres parámetros de corte: tracción, compresión uniaxial y compresión triaxial; así mismo las constantes elásticas de la matriz rocosa se muestran en la siguiente figura, de los criterios equivalencia de áreas. En cambio, la gráfica  $\sigma_n$  vs.  $\sigma_t$ , se obtuvo la envolvente de falla de Mohr & Coulomb, congruente con la fractura de falla por corte al alcanzar la resistencia pico del material rocoso.



Clasificación Hoek - Brown

Resistencia comp. uniaxial intacta ( $\sigma_{ci}$ ) = 88 MPa  
 GSI = 52  $m_i$  = 26 Factor de disturbancia = 0.00  
 Módulo intacto ( $E_i$ ) = 35,200 MPa

Criterio Hoek – Brown

$m_b$  = 4.68  $s$  = 0.0048  $a$  = 0.50

Morh - Coulomb

Cohesión = 6.00 MPa Ángulo de fricción = 39.39

Parámetros de la masa rocosa

Resistencia a la tracción = -0.09 MPa  
 Resistencia compresión uniaxial = 5.95 MPa  
 Resistencia global = 25.39 MPa  
 Módulo de deformación = 12,171.93 MPa

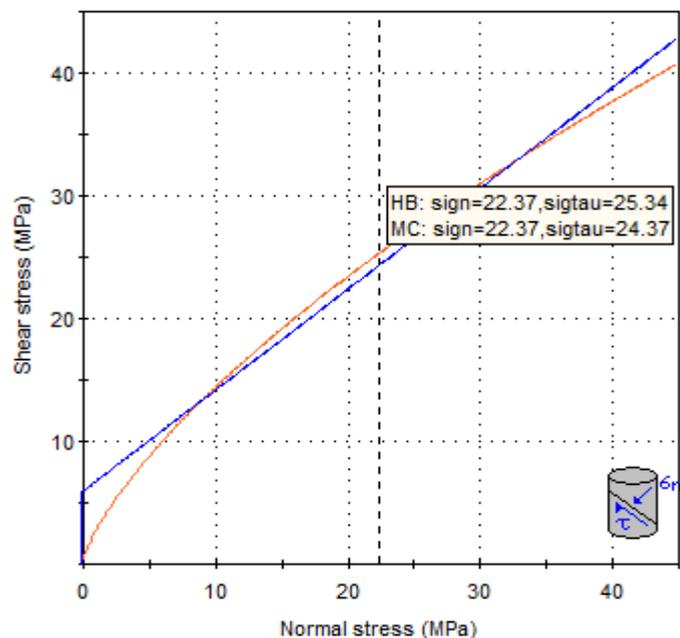


Figura 27. Método equivalencia de áreas – RocData, en función de esfuerzo principales: Mayor vs. Menor (H-B) y esfuerzo: Corte y normal (M-C).

Tabla 31. Parámetros de entrada y salida del RocData en la progresiva Km 2+800 (PC-02)

PARÁMETROS DE ENTRADA (Clasificación de Hook— Brown)		PARÁMETROS DE SALIDA		
$\sigma_{ci}$ ( $\sigma$ )	88 Mpa	CRITERIO DE HOOK-BROWN	$m_b$	4.68
GSI	52		$s$	0.0048
$M_i$	26		$a$	0.50
D	0.00	PARAMETROS DE MOHR-COULOMB EQUIVALENTES	$c$	6.00 Mpa
$E_i$	35.20 Mpa		$\phi$	39.39
		PÁRÁMETROS DEL MACIZO ROCOSO	$\sigma_{gt}$	-0.09 Mpa
			$\sigma_{gc}$	5.95 Mpa
			$\sigma_{gcm}$	25.30 Mpa
			$E_{rm}$	12,17 MPa Mpa

➤ **Diseño en el Software Dips v7.0**

Para realizar el análisis cinemático del Talud del punto de control PC-02, se utilizó el software Dips v7.0 teniendo en cuenta la data obtenida de discontinuidades obtenidas en campo.

En la figura N°28 se aprecia: (a) Diagrama de Roseta de diaclasas, (b) Diagrama de Polos.

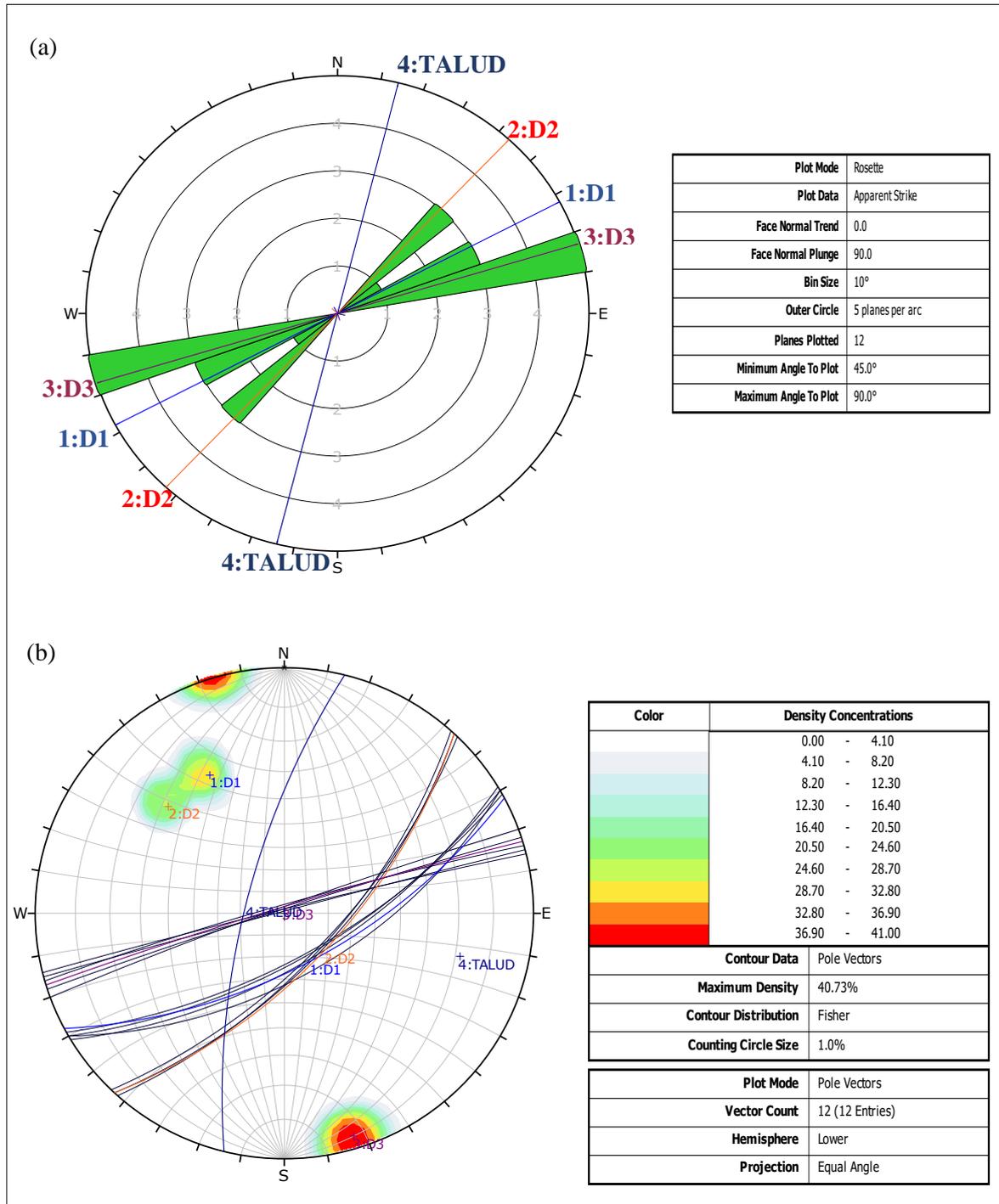


Figura 28. Análisis de discontinuidades del PC-02, usando software Dips. (a) Análisis de tendencias principales con gráfico de rosetas. (b) Análisis de familias principales y de los planos.

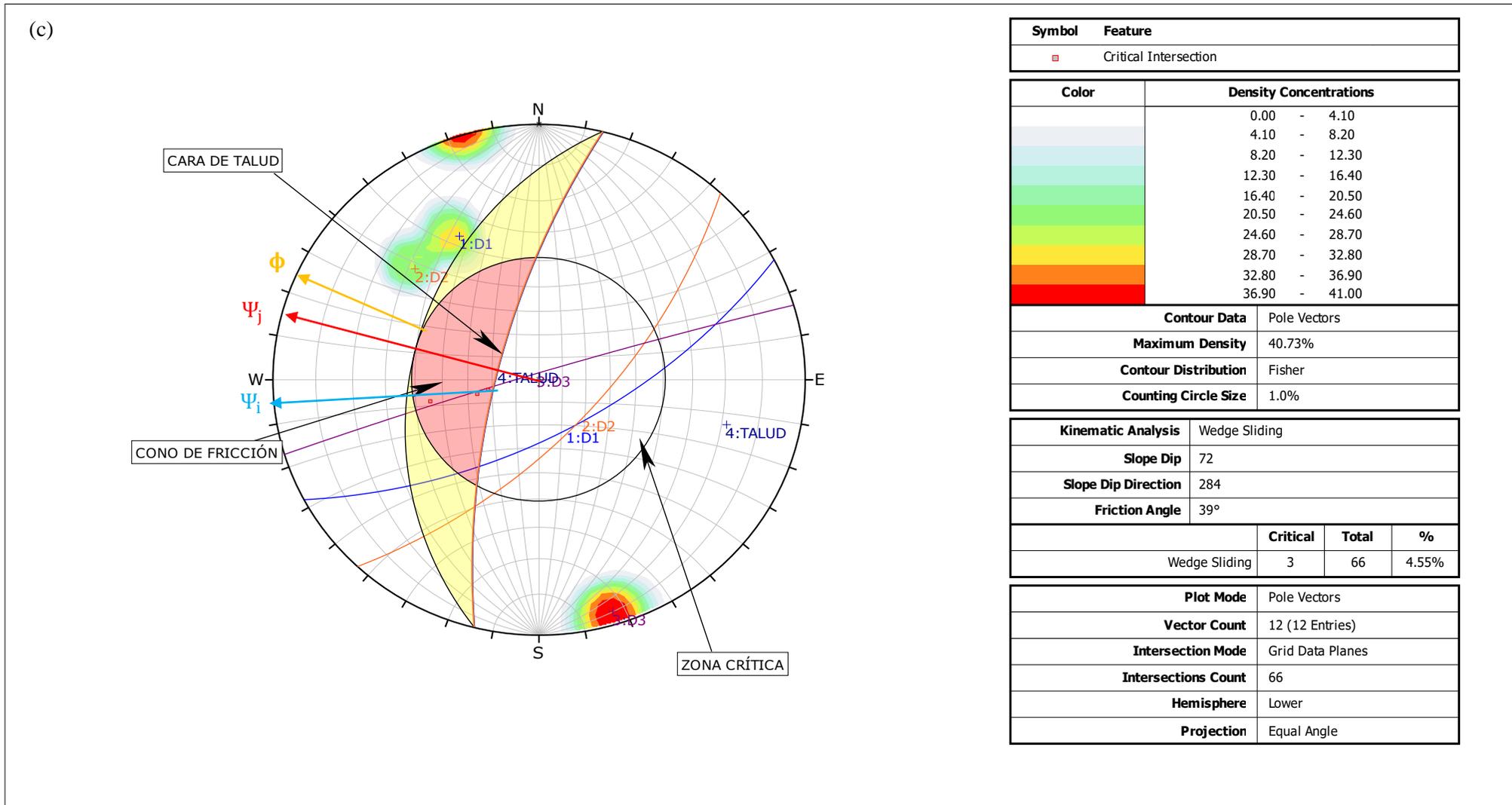


Figura 29. (c)Análisis cinemático PC-02, presenta rotura en cuña 4.55%.

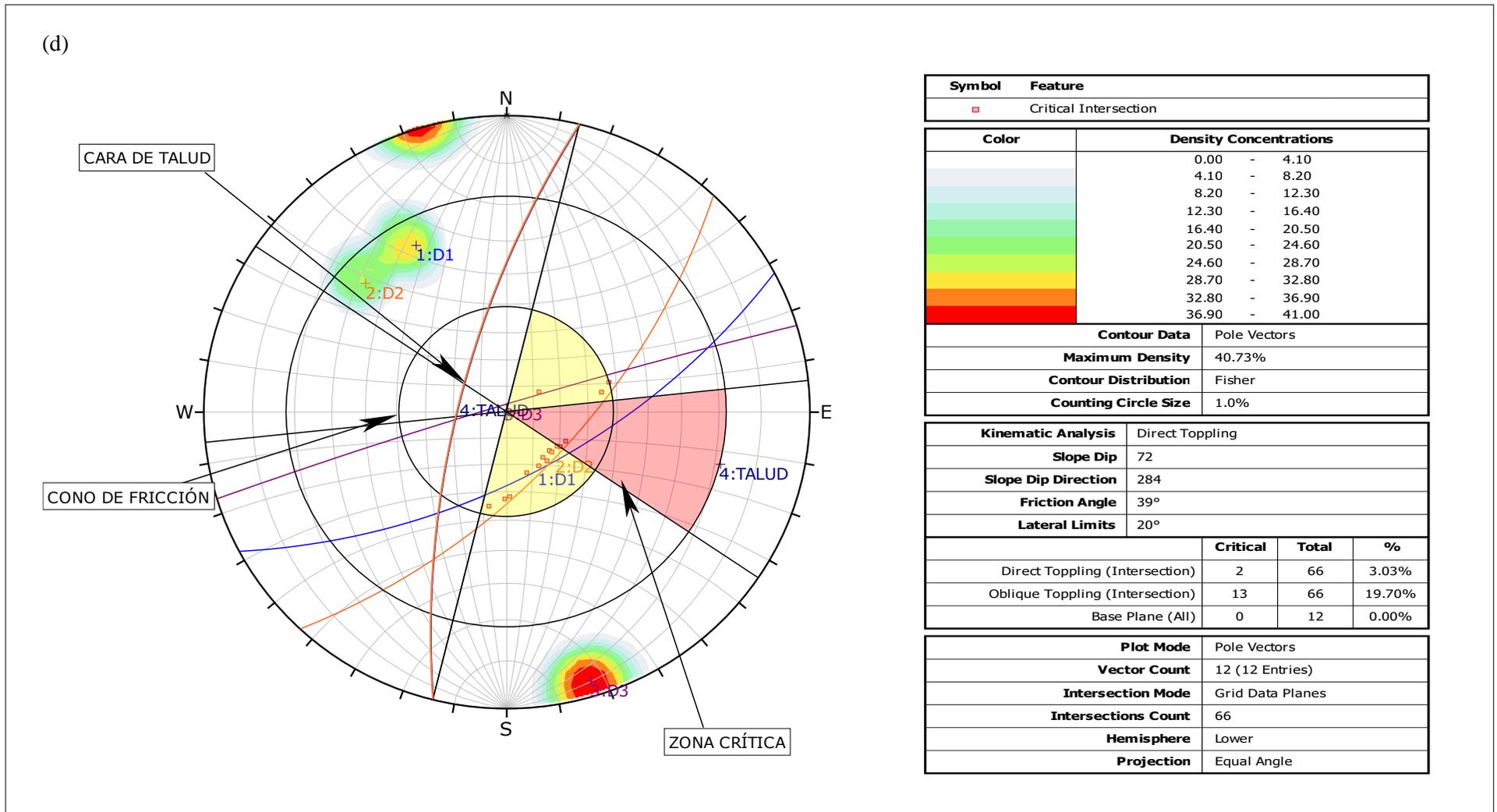


Figura 30. (d) Análisis cinemático PC-02, presenta rotura en vuelco Oblicuo 19.70%.

➤ **Cálculo del Factor de Seguridad (FS) mediante El Software - Slide v6.0**

Para el cálculo del FS de la estación PC-02, se usó los tres métodos: Bishop Simplificado, Janbu Simplificado y Gle/Morgenstern-Price. El resultado del Análisis se muestra en la Tabla N°32, donde se determina que el Talud de la estación PC-02 es estable con los 3 métodos; en condiciones normales y en condiciones efectivas más sismicidad.

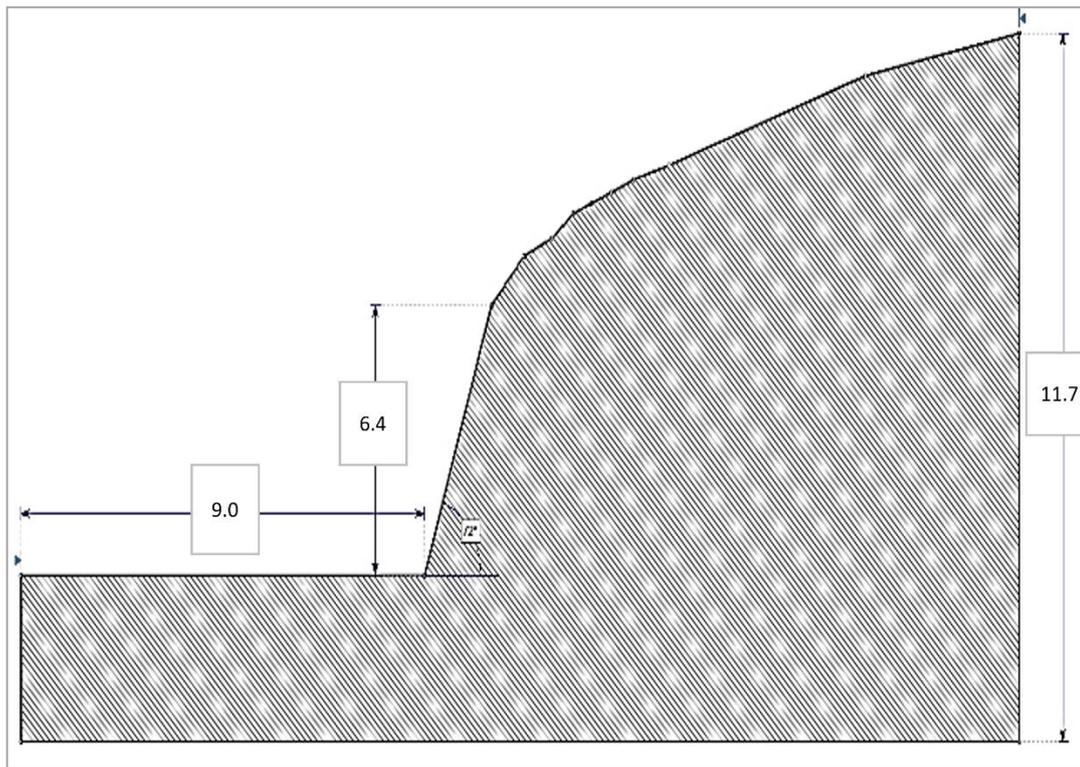


Figura 31. Punto de control PC-02, dimensiones del Talud

Tabla 32. Factor de Seguridad en el PC-02 según los diversos métodos

MÉTODOS	CONDICIONES	FS	TALUD
<b>Bishop simplificado</b>	Condiciones de Tensiones Totales	6.560	Estable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	4.854	Estable
<b>Janbu Simplificado</b>	Condiciones de Tensiones Totales	6.742	Estable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	4.642	Estable
<b>Gle/Morgenstern-Price</b>	Condiciones de Tensiones Totales	7.069	Estable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	4.838	Estable

## Tensiones Totales

### *Método de Equilibrio de Momentos (Bishop Simplificado)*

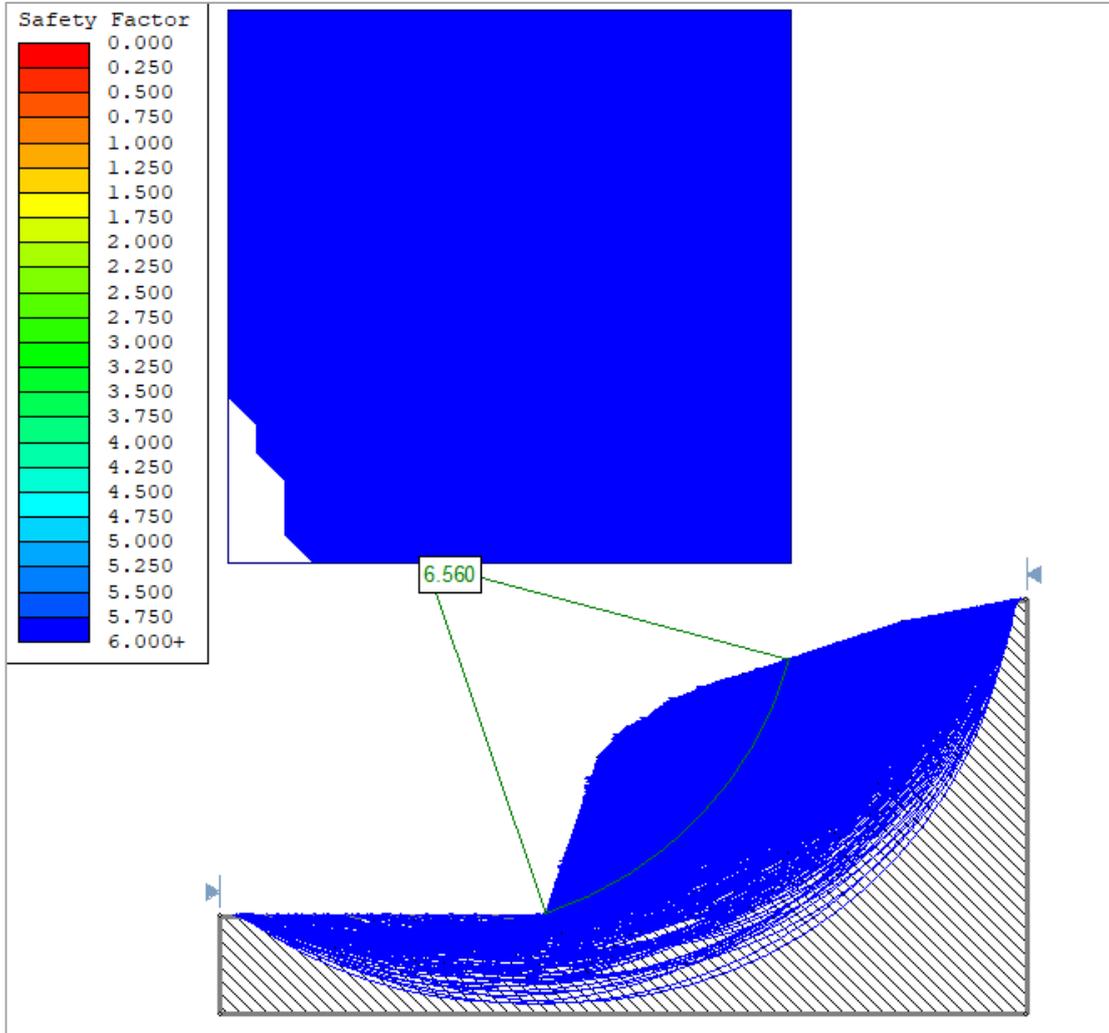


Figura 32. Factor de seguridad PC-02 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

*Método de Equilibrio de Fuerzas (Janbu Simplificado)*

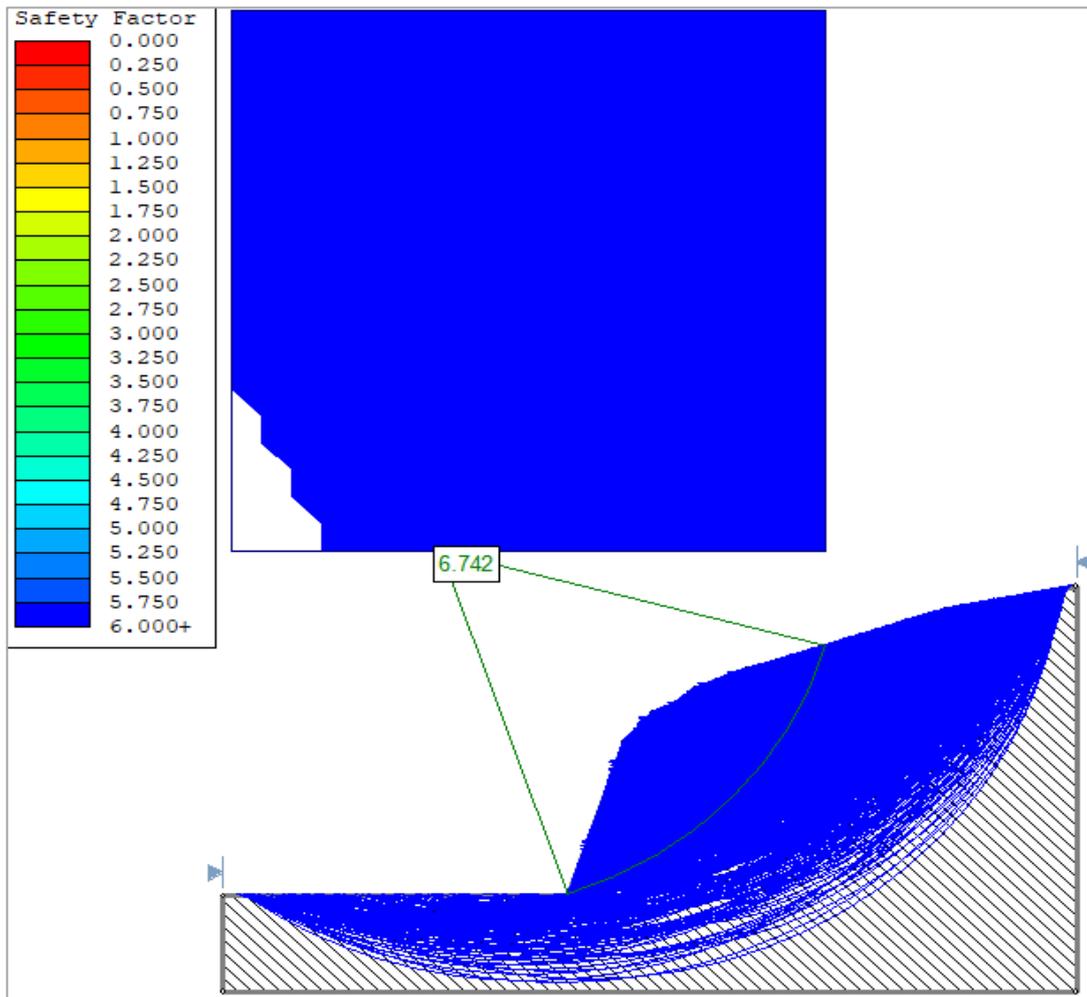


Figura 33. Factor de seguridad PC-02 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

*Método de Fuerzas y Momentos Morgenstern-Price*

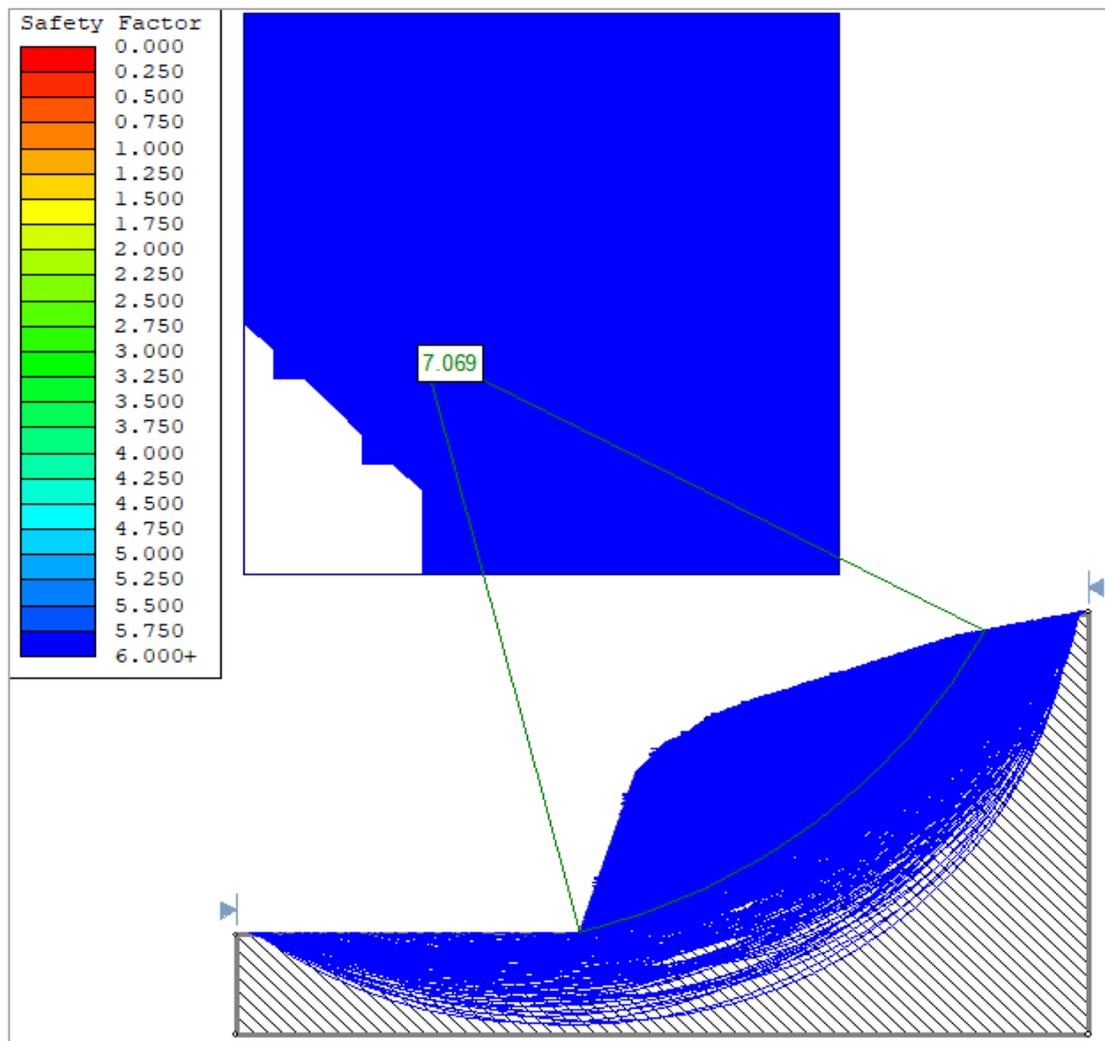


Figura 34. Factor de seguridad PC-02 por método de Gle /Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Totales.

## Tensiones Efectivas más Sismicidad

### *Método de Equilibrio de Momentos (Bishop Simplificado)*

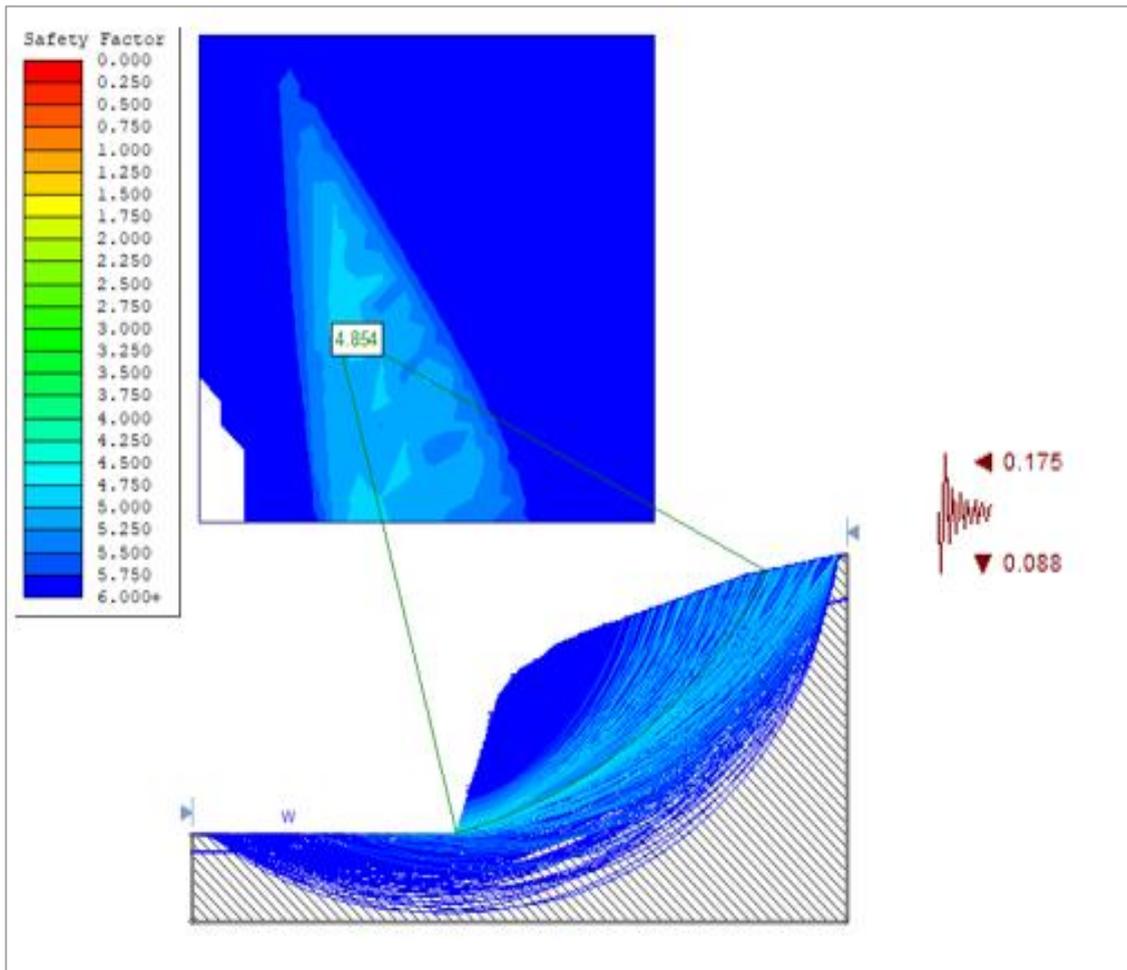


Figura 35. Factor de seguridad PC-02 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.

*Método de Equilibrio de Fuerzas (Jambu Simplificado)*

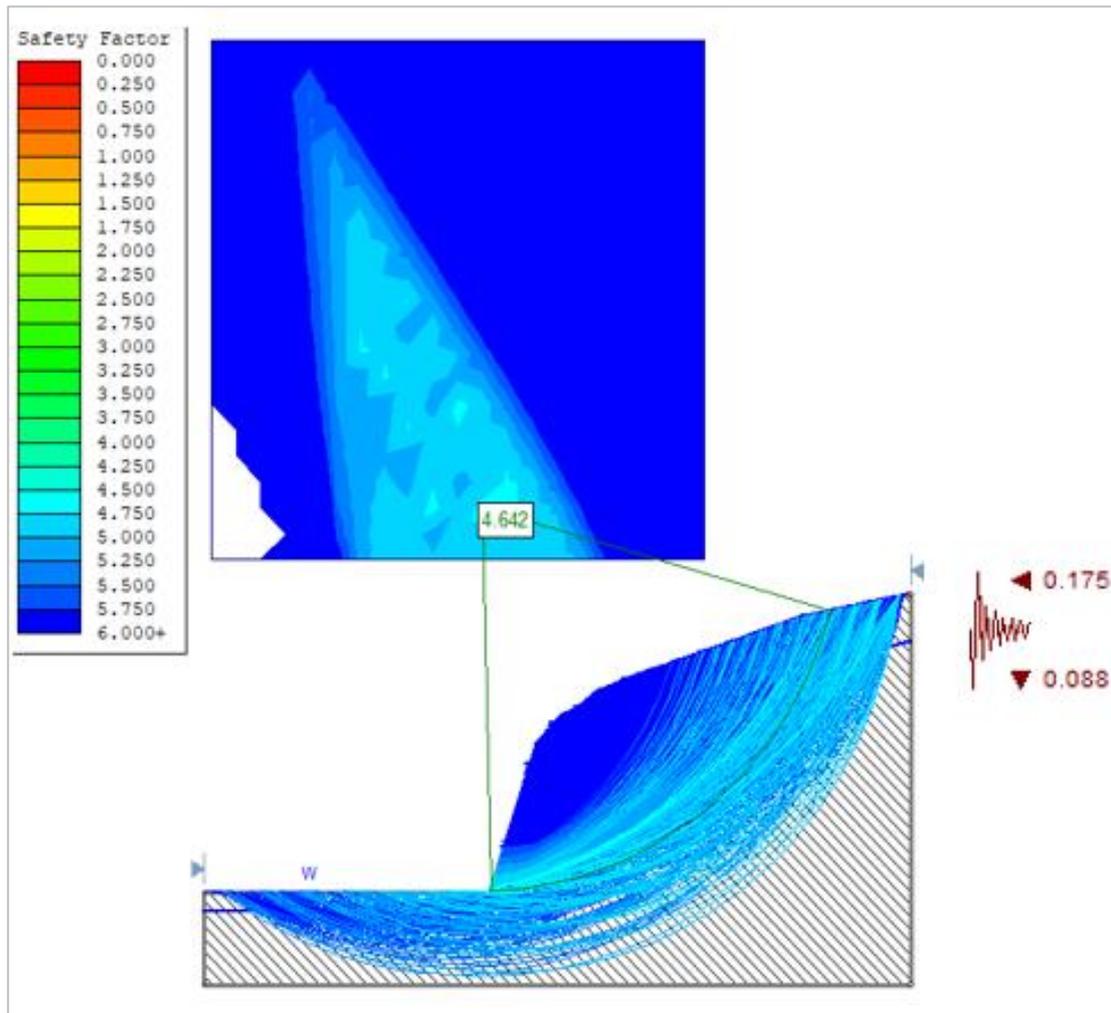


Figura 36. Factor de seguridad PC-02 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

*Método de Equilibrio de Fuerzas y Momentos (Morgenstern y Price)*

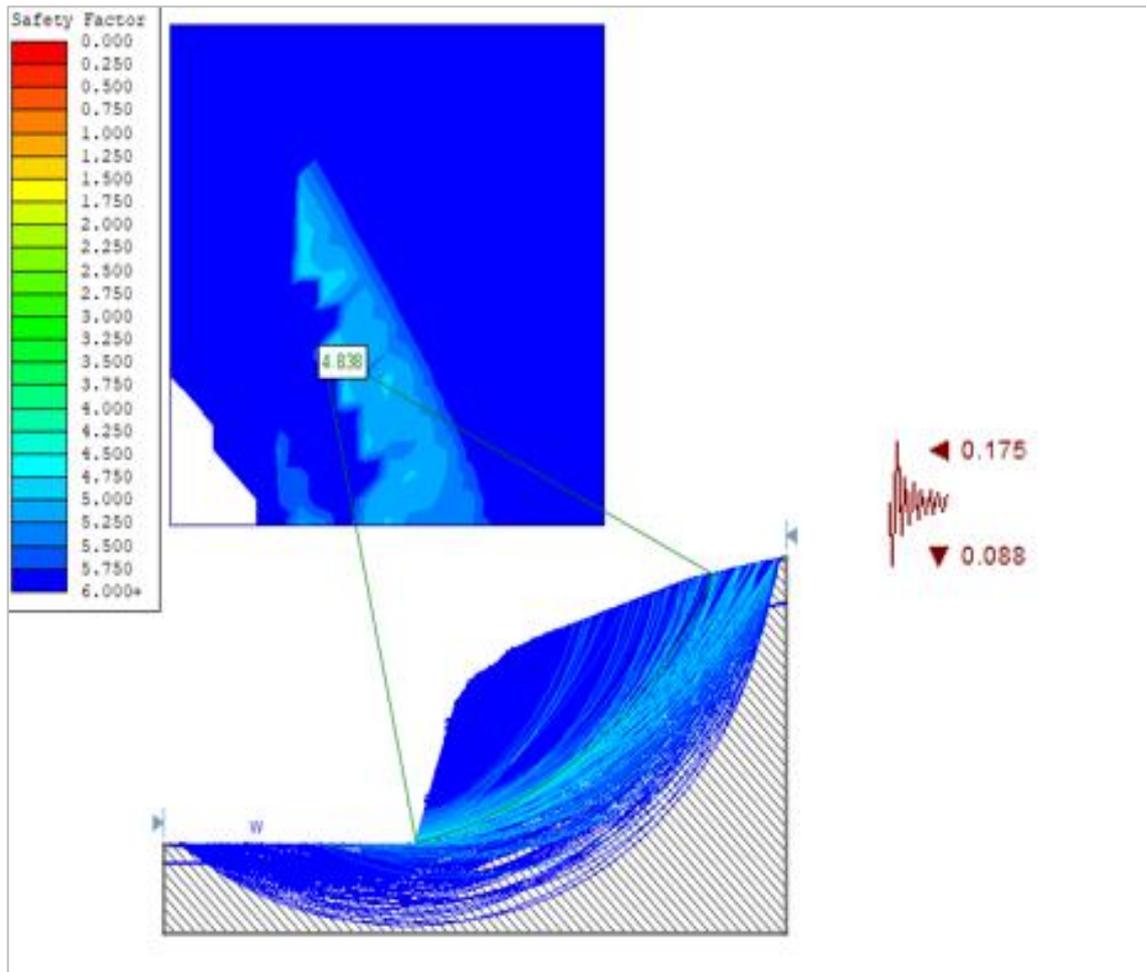


Figura 37. Factor de seguridad PC-02 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

### PUNTO DE CONTROL 03 – Progresiva km 3+550

En el punto de control 03, se realizó la excavación de una calicata de profundidad 1.00m de donde se extrajo dos muestras, la primera del primer estrato de 0,0.0- 0.50m y la segunda de 0,0.50-1.00. De manera que, en los ensayos de laboratorio se obtuvo de acuerdo a la clasificación SUCS, una Arena bien graduada con grava (SW) y según AASHTO A-1-b para el primer estrato, mientras que para el segundo estrato, se obtuvo una arena bien graduada con limo y grava (SW-SM) y A-2-4(0) respectivamente. En la figura N°38, se muestra el registro de excavación de la calicata N°1 en la progresiva km 2+000, según las normas técnicas NTP 339.150, ASTM D 2488 y MTC E 101.

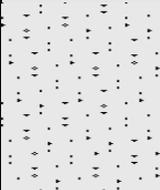
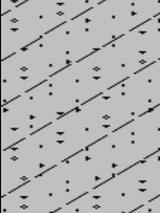
REGISTRO DE EXCAVACIÓN DE CALICATA NORMA (NTP 339.150   ASTM D 2488   MTC E 101)					
PROFUNDIDAD (m)	CLASIFICACIÓN SUCS	CLASIFICACIÓN AASHTO	SIMBOLOGÍA	DESCRIPCIÓN DE ESTRATIGRAFÍA	ESTRATO
0.50 m	SW	A-1-b		0.00 - 0.50m.- ARENA BIEN GRADUADA CON GRAVA. Suelo A - 1 - b (0) tiene como contenido de humedad 14,6%,color gris claro, con el 35,5% grava, de arena el 60,1%, y el 4,1% de finos, carece de límite líquido, límite plástico e índice plasticidad.	M1
1.20	SW-SM	A-2-4(0)		0.50 - 1.20m.- ARENA BIEN GRADUADA CON LIMO Y GRAVA Suelo A - 2 - 4 (0) posee humedad de 15,2 %, color gris medio, con el 25% grava, de arena el 65,2%, y el 9,9% de finos, con límite líquido de 38,4%, límite plástico 30,2% y 8,2% plasticidad. de 10.5%.	M2



Figura 38. Registro de Excavación de la Calicata N°2 (PC-03) en la progresiva Km 3+550.



### Análisis Granulométrico de la Muestra 1 de la Calicata N°2

Tabla 33. Análisis Granulométrico de la muestra 1 (M1) de la calicata N°2 en la progresiva Km 3+550 a una profundidad de 0.50m, según las Normas (NTP 339.128, ASTM D 422, MTC E 107)

TAMICES ASTM	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE PARCIAL RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA DE ENSAYO	
3"	75.000	0.0	0.0	0.0	100.0	PESO TOTAL	9560.0 gr
2 1/2"	63.000	-	-	-	-	PESO FRACCIÓN	166.7 gr
2"	50.000	220.0	2.3	2.3	97.7	TAMAÑO MÁXIMO	2
1 1/2"	37.500	124.0	1.3	3.6	96.4	PORC. DE GRAVA	35.5 %
1"	25.000	844.0	8.8	12.4	87.6	PORC. DE ARENA	60.1 %
3/4"	19.000	564.0	5.9	18.3	81.7	PORC. DE FINOS	4.5 %
1/2"	12.500	0.0	0.0	18.3	81.7	LÍMITE LÍQUIDO	NP %
3/8"	9.500	858.0	9.0	27.3	72.7	LÍMITE PLÁSTICO	NP %
N° 4	4.750	782.0	8.2	35.5	64.5	ÍNDICE PLÁSTICO	NP %
N° 8	2.360	-	-	-	-	CLASF. SUCS	SW
N° 10	2.000	-	-	-	-	CLASF. AASHTO	A - 1 - b
N° 16	1.180	-	-	-	-	D <sub>10</sub>	0.075 mm
N° 20	0.850	-	-	-	-	D <sub>30</sub>	0.222 mm
N° 30	0.600	-	-	-	-	D <sub>60</sub>	0.761 mm
N° 40	0.425	73.40	28.4	63.9	36.1	COEF. DE UNIF.	10.2
N° 50	0.300	-	-	-	-	COEF. DE CURV.	0.9
N° 60	0.250	-	-	-	-	MÓDULO DE FINEZA	3.45
N° 80	0.180	-	-	-	-		
N° 100	0.150	67.20	26.0	89.9	10.1	DESCRIPCIÓN	
N° 140	0.106	-	-	-	-	ARENA BIEN GRADUADA CON GRAVA	
N° 200	0.075	14.60	5.7	95.5	4.5		
FONDO		11.50	4.5	100.0			

En la Figura N°39, se observa la Curva Granulométrica de la muestra 1 (M1) de la calicata N°2 en la progresiva Km 3+550 a una profundidad de 0.50m, según las Normas (NTP 339.128 , ASTM D 422 y MTC E 107.

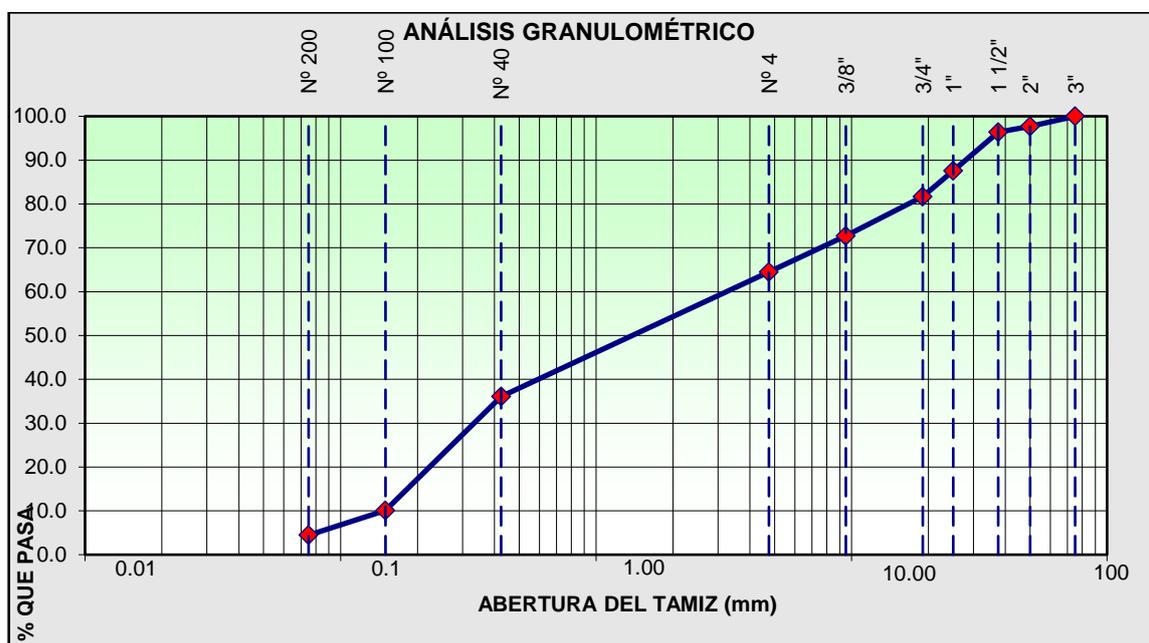


Figura 39. Curva Granulométrica de la muestra 1 (M1) de la calicata N°2 en la progresiva Km 3 +550

➤ **Límites de Atterberg de la Muestra 1 de la Calicata N°2**

Para determinar los límites de Atterberg (Límites de Consistencia), de la muestra 1 de la calicata N°2, se realizó el ensayo de laboratorio, de acuerdo a la siguiente normativa ((NTP 339.129, ASTM D 4318 y MTC E 110) para límite líquido , y para determinar el límite plástico e índice de plasticidad fue según las normas (NTP 339.129, ASTM D 4318, MTC E 111)Teniendo como resultado de la muestra que el límite líquido es de 0.0%, el límite plástico es de 0.0% y el índice de plasticidad es de 0.0%.

➤ **Contenido de Humedad de la Muestra 1 de la Calicata N°2**

Para determinar el contenido de humedad, se tuvo en cuenta las siguientes normas (NTP 339.127, ASTM D 2216 y MTC E 108), teniendo como resultado 14.6 % de contenido de humedad en la Muestra 1, de la Calicata N°2 en la Progresiva Km 3+550.

Tabla 34. Contenido de humedad en la Muestra 1 de la Calicata N°2 en la Progresiva Km 3+550

N°Muestra	Profundidad	Peso (Suelo Húmedo+ Tara gr)	Peso (Suelo Seco+ Tara gr)	Peso de Tara (gr)	Peso de agua (gr)	Peso de Suelo seco (gr)	Contenido de Humedad
M1	0.00 – 0.50 m	224.9	199.8	27.8	25.1	172.0	14.6%



### Análisis Granulométrico de la Muestra 2 de la Calicata N°2

Tabla 35. Análisis Granulométrico de la muestra 2 (M2) de la calicata N°2 en la progresiva Km 3+550 a una profundidad de 1.20m, según las Normas (NTP 339.128, ASTM D 422, MTC E 107)

TAMICES ASTM	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE PARCIAL RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA DE ENSAYO	
3"	75.000	0.0	0.0	0.0	<b>100.0</b>	<b>PESO TOTAL</b>	9855.0 gr
2 1/2"	63.000	-	-	-	-	<b>PESO FRACCIÓN</b>	158.0 gr
2"	50.000	342.0	3.5	3.5	<b>96.5</b>	<b>TAMAÑO MÁXIMO</b>	2
1 1/2"	37.500	412.0	4.2	7.7	<b>92.3</b>	<b>PORC. DE GRAVA</b>	25.0 %
1"	25.000	532.0	5.4	13.0	<b>87.0</b>	<b>PORC. DE ARENA</b>	65.2 %
3/4"	19.000	365.0	3.7	16.8	<b>83.2</b>	<b>PORC. DE FINOS</b>	9.9 %
1/2"	12.500	0.0				<b>LÍMITE LÍQUIDO</b>	38.4 %
3/8"	9.500	550.0	5.6	22.3	<b>77.7</b>	<b>LÍMITE PLÁSTICO</b>	30.2 %
N° 4	4.750	260.0	2.6	25.0	<b>75.0</b>	<b>ÍNDICE PLÁSTICO</b>	8.2 %
N° 8	2.360	-	-	-	-	<b>CLASF. SUCS</b>	SW-SM
N° 10	2.000	-	-	-	-	<b>CLASF. AASHTO</b>	A - 2 - 4(0)
N° 16	1.180	-	-	-	-	<b>D<sub>10</sub></b>	0.076 mm
N° 20	0.850	-	-	-	-	<b>D<sub>30</sub></b>	0.196 mm
N° 30	0.600	-	-	-	-	<b>D<sub>60</sub></b>	0.635 mm
N° 40	0.425	75.40	35.8	60.8	<b>39.2</b>	<b>COEF. DE UNIF.</b>	8.4
N° 50	0.300	-	-	-	-	<b>COEF. DE CURV.</b>	0.8
N° 60	0.250	-	-	-	-	<b>MÓDULO DE FINEZA</b>	2.88
N° 80	0.180	-	-	-	-		
N° 100	0.150	41.20	19.6	80.3	<b>19.7</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	
N° 140	0.106	-	-	-	-	<b>ARENA BIEN GRADUADA CON LIMO Y GRAVA</b>	
N° 200	0.075	20.60	9.8	90.1	<b>9.9</b>		
FONDO		20.80	9.9	100.0			

En la Figura N°40, se observa la Curva Granulométrica de la muestra 2 (M2) de la calicata N°2 en la progresiva Km 3+550 a una profundidad de 1.20m, según las Normas (NTP 339.128 , ASTM D 422 y MTC E 107).

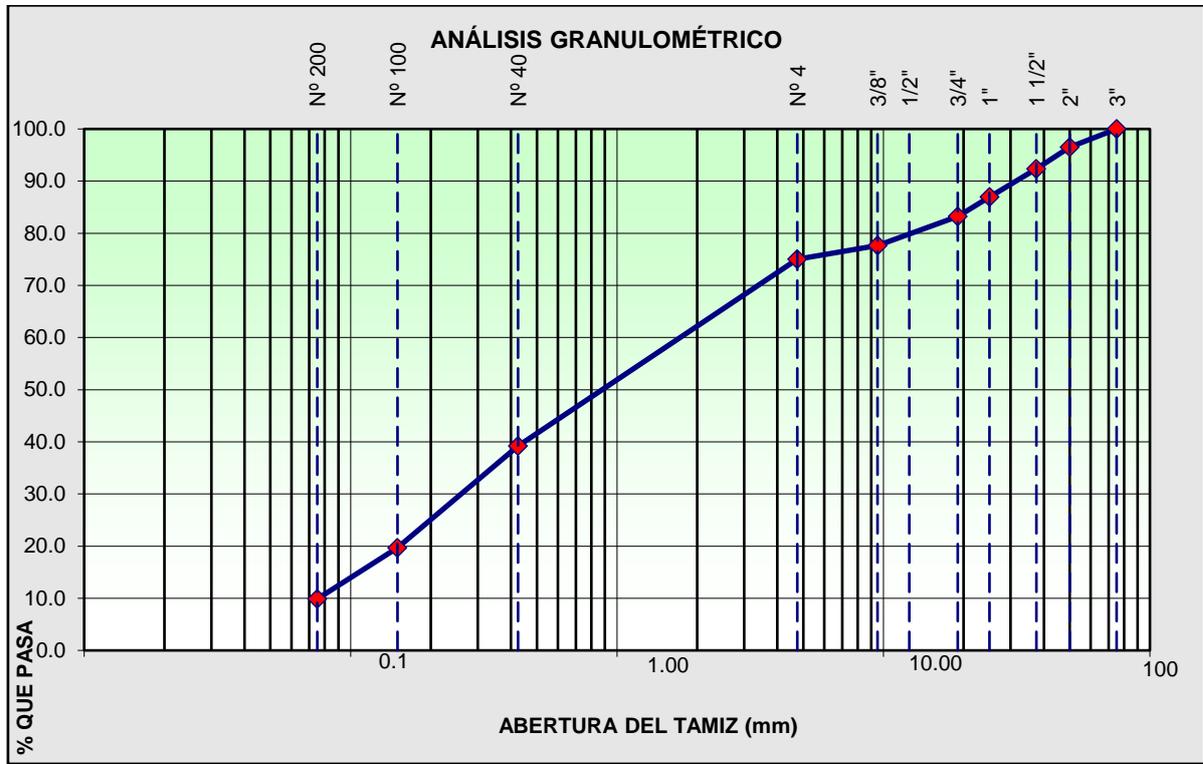


Figura 40. Curva Granulométrica de la muestra 2 (M2) de la calicata N°2 en la progresiva Km 3 +550

### ➤ Límites de Atterberg de la Muestra 2 de la Calicata N°2

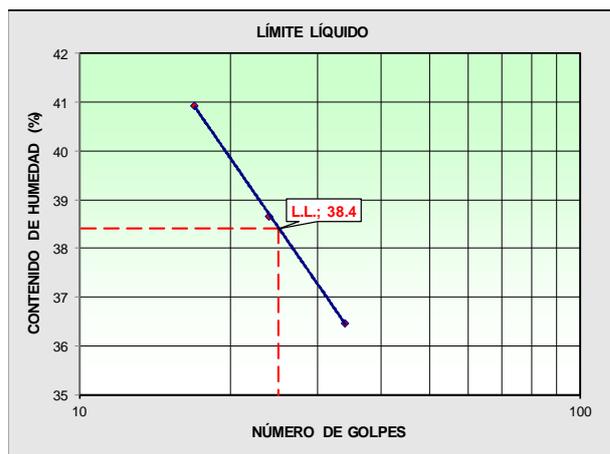
Para determinar los límites de Atterberg (Límites de Consistencia), de la muestra 2 de la calicata N°2, se realizó el ensayo de laboratorio, de acuerdo a la siguiente normativa ((NTP 339.129, ASTM D 4318 y MTC E 110) para límite líquido , y para determinar el límite plástico e índice de plasticidad fue según las normas (NTP 339.129, ASTM D 4318, MTC E 111)Teniendo como resultado de la muestra que el límite líquido es de 38,4%, el límite plástico es de 30,2% y el índice de plasticidad es de 8,2%.

**MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS**  
NORMA (NTP 339.129 | ASTM D 4318 | MTC E 110)

Nº DE TARA		-	-	-
PESO DE LA TARA (gr)		28.40	27.30	28.10
PESO DE SUELO HÚMEDO + TARA (gr)		53.10	55.10	55.30
PESO DE SUELO SECO + TARA (gr)		46.50	47.35	47.40
PESO DE AGUA (gr)		6.60	7.75	7.90
PESO DE SUELO SECO (gr)		18.10	20.05	19.30
HUMEDAD (%)		36.5%	38.7%	40.9%
Nº DE GOLPES		34	24	17

**MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS**  
NORMA (NTP 339.129 | ASTM D 4318 | MTC E 111)

Nº DE TARA		-	-	PROMEDIO
PESO DE LA TARA (gr)		28.00	28.30	
PESO DE SUELO HÚMEDO + TARA (gr)		40.20	41.30	
PESO DE SUELO SECO + TARA (gr)		37.35	38.30	
PESO DE AGUA (gr)		2.85	3.00	
PESO DE SUELO SECO (gr)		9.35	10.00	
HUMEDAD (%)		30.5%	30.0%	



CONSTANTES FÍSICAS DE LA MUESTRA	
LÍMITE LÍQUIDO	38.4%
LÍMITE PLÁSTICO	30.2%
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	8.2%

OBSERVACIONES:

---



---

Figura 41. Límites de Atterberg de la muestra 2, de la calicata N°2 en la progresiva Km 3+550.

➤ **Contenido de Humedad de la Muestra 2 de la Calicata N°2**

Para determinar el contenido de humedad, se tuvo en cuenta las siguientes normas (NTP 339.127, ASTM D 2216 y MTC E 108), teniendo como resultado 15.2 % de contenido de humedad en la Muestra 2, de la Calicata N°2 en la Progresiva Km 3+550.

Tabla 36. Contenido de humedad en la Muestra 2 de la Calicata N°2 en la Progresiva Km 3+550

Nº Muestra	Profundidad	Peso (Suelo Húmedo+ Tara gr)	Peso (Suelo Seco+ Tara gr)	Peso de Tara (gr)	Peso de agua (gr)	Peso de Suelo seco (gr)	Contenido de Humedad
M2	0.50 – 1.20 m	216	191.3	28.5	24.7	162.8	15.2%

➤ **Asentamiento en la Calicata N°2**

Para realizar el análisis del asentamiento en la calicata N°2 se realizó mediante el software Geo5, donde algunos parámetros de entrada se obtuvieron de los ensayos de laboratorio y los restantes se obtuvieron del software propiamente dicho. Para ello se utilizó el método del módulo edométrico.

Para determinar el asentamiento, se analizó en tres escenarios: En estado natural, con sobrecarga y con saturación y sobrecarga,

***En Estado Natural***

En estado Natural, es decir sin la presencia de sobrecarga, ni de saturación, la calicata no presenta asentamiento.

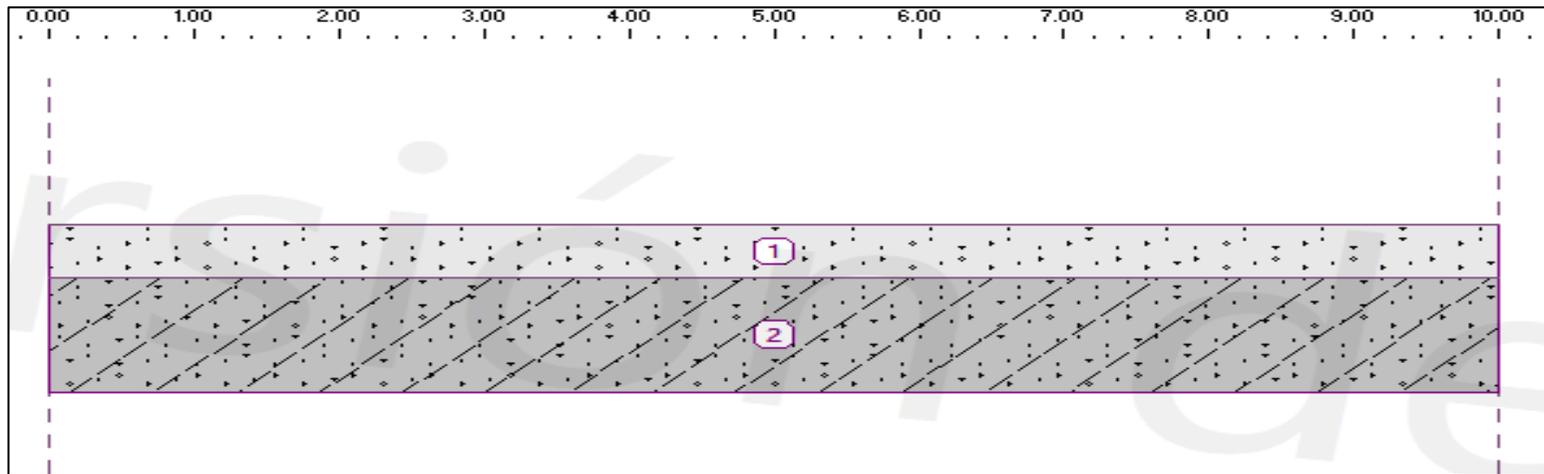


Figura 42. Asentamiento en la Calicata N°2 en estado natural.

### Sobrecarga

Para la sobrecarga se tuvo en cuenta lo estipulado por MTC, Reglamento Nacional de Vehículos (2003), es decir la tabla N°17, por ello que consideramos como carga de  $60 \text{ kN/m}^2$ .

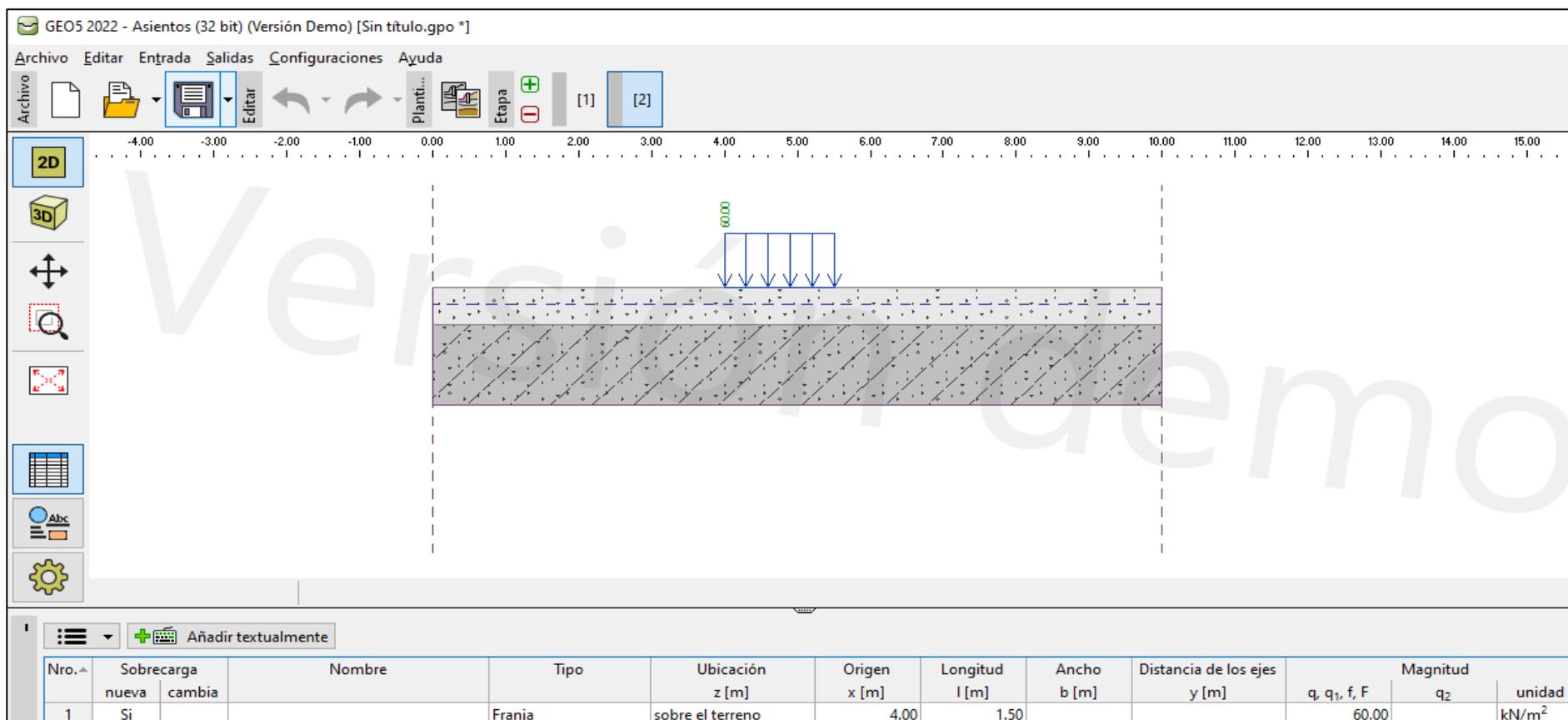


Figura 43. Asentamiento en la Calicata N°2 con una sobrecarga de  $60 \text{ kN/m}^2$ .

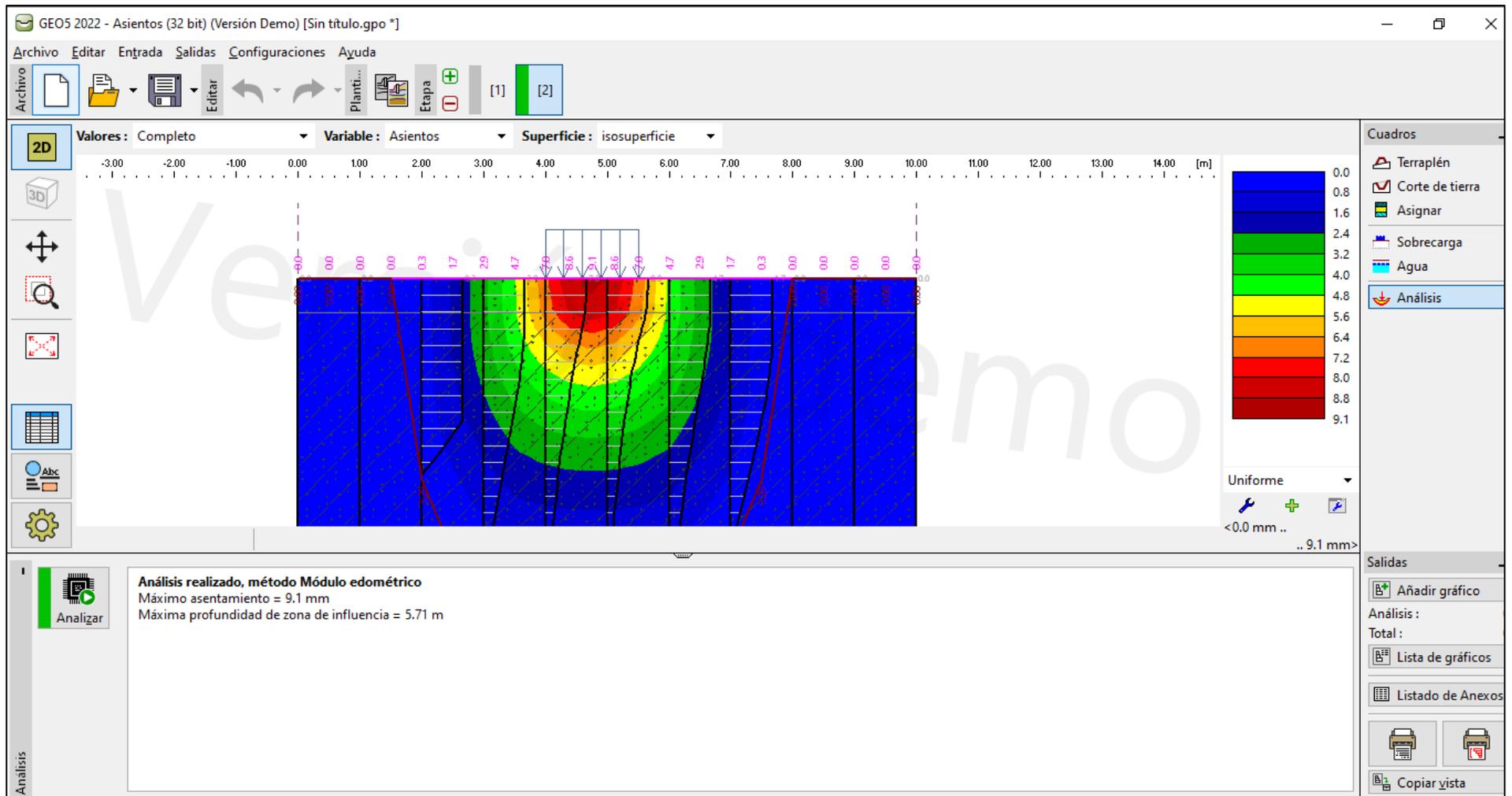


Figura 44. Análisis de Isosuperficie con el Módulo edómetro con la sobrecarga en la Calicata N°2, el máximo asentamiento es de 9.1mm y máxima profundidad de zona de influencia es 5.71m.

### Sobrecarga más Saturación

Para determinar sobrecarga más saturación se consideró dos parámetros importantes la sobrecarga de  $60 \text{ kN/m}^2$  y el nivel freático a 0.25 de profundidad.

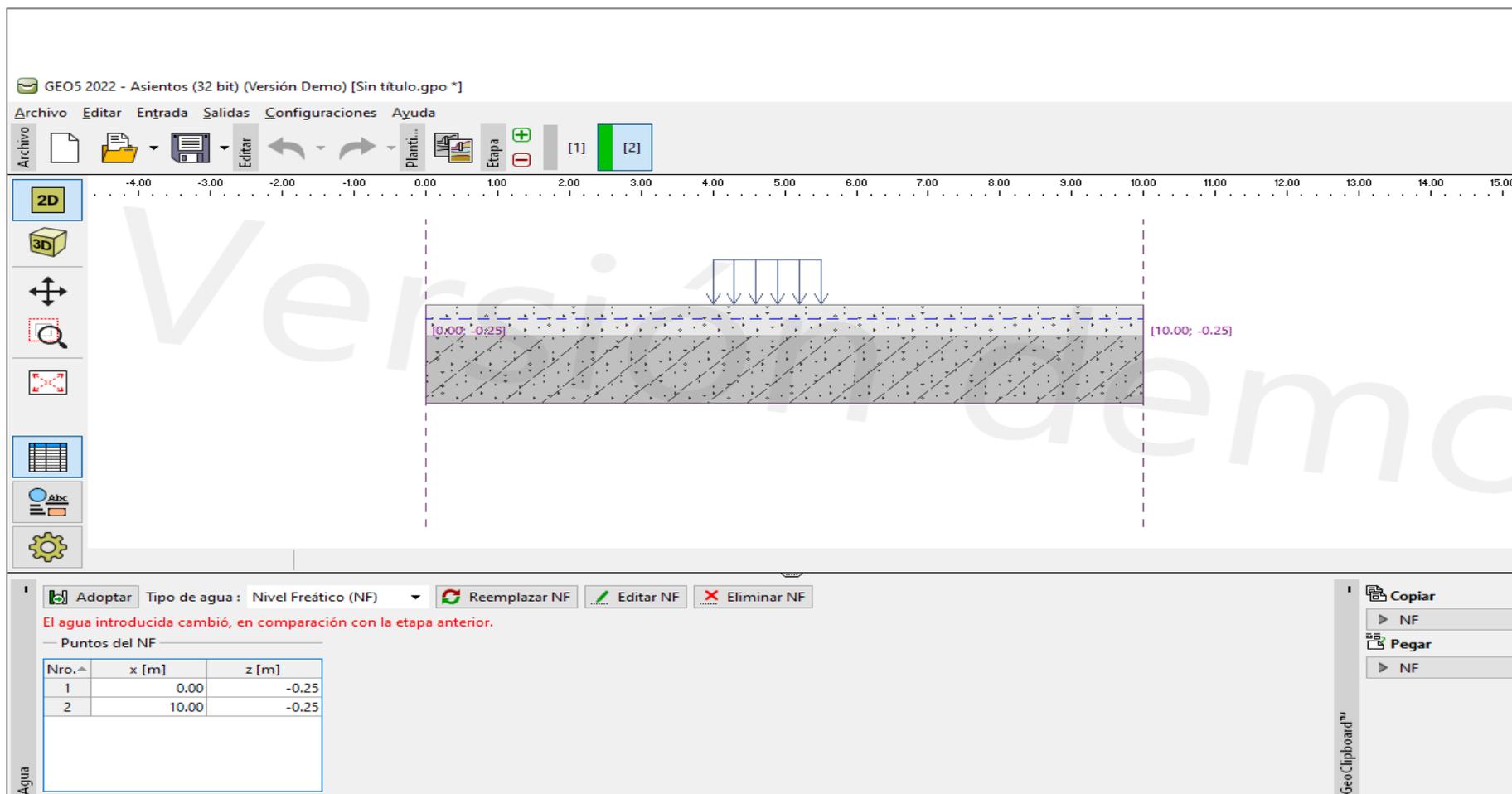


Figura 45. Asentamiento de la calicata N°2 con sobrecarga más saturación.

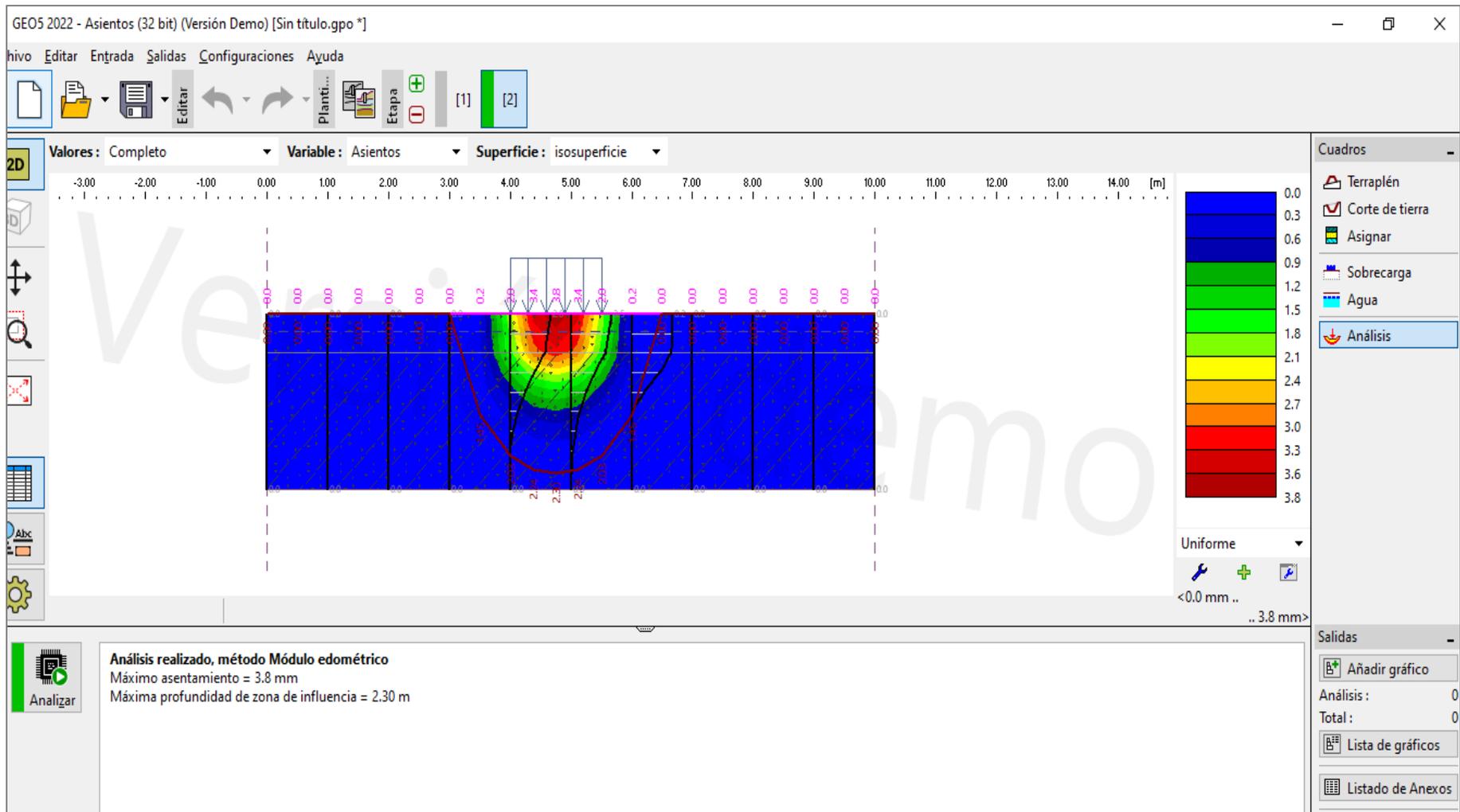


Figura 46. Análisis de Isosuperficie con el Módulo edométrico con sobrecarga y saturación en la calicata N°2, el máximo asentamiento es de 3.8 mm y máxima profundidad de zona de influencia es 2.30m.

➤ **Expansión en la Calicata N°2**

Según lo expuesto por Vásquez (2018), es decir, tomando como referencia la tabla N° 15 clasificación de suelos expansivos, para evaluar el potencial de expansividad de suelos en función al índice plástico y límite líquido y con los datos obtenidos en laboratorio de las dos muestras correspondientes a la calicata N°1, se puede determinar que son suelos de potencial de expansión bajo ya que su índice de plasticidad es menor a 18 y su límite líquido es mayor a 15

La muestra 1 de Calicata N°2, posee un índice de plasticidad de 0,0% y 0,0% en cuanto a índice de plasticidad, por lo cual según el intervalo descrito líneas arriba es un suelo que no presenta (NP) potencial de expansión,

Tabla 37. Potencial de Expansión de la muestra 1 de la Calicata N°2

Potencial de Expansión	Índice de plasticidad	Límite de Líquido
Bajo	<18	>15
NP	0.0%	0.0%

La muestra 2 (M2) de Calicata N°2, posee un índice de plasticidad de 12% y 44,8% en cuanto a índice de plasticidad, considerando estos parámetros es un suelo con potencial de expansión bajo.

Tabla 38. Potencial de Expansión de la muestra 2 de la Calicata N°2

Potencial de Expansión	Índice de plasticidad	Límite de Líquido
Bajo	<18	>15
Bajo	8,2%	38,4 %

#### PUNTO DE CONTROL 04 - Progresiva KM 4+200

La estación, está constituida por roca volcánica dacita de bajo grado de fracturamiento, meteorización fresca, con superficie rugosa, blocosidad primaria sectorizándolo en roca de grado medio, no presentado afectación de agua. Presentando parámetros de campo:  $\sigma_{ci} = 79$  MPa, RQD = 73.58 %, RMR = 55 (Tipo III), GSI = 50 Regular; presentando actualmente sección de corte V:H 10:1. (Ver Anexo 3.3, Formato de Clasificación de Rocas Volcánicas – Dacita).

Descripción	
Este (m.)	772707
Norte (m.)	9205914
Cota (msnm.)	3119
Parámetros del talud	
Dip (°)	87°
DD (°)	174°
Altura (m.)	11.00
Progresiva	04+200

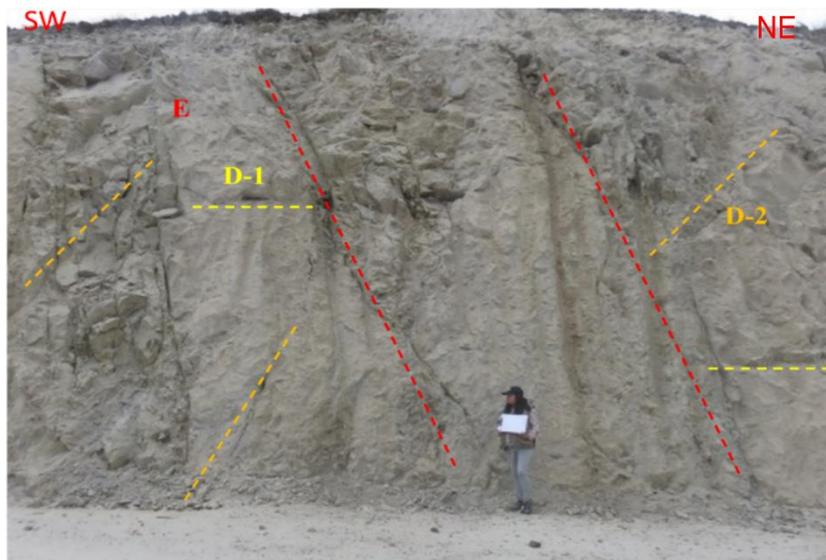


Foto 11. Roca volcánica Dacita, ubicada en el lado derecho de la carretera Santa Apolonia-Cumbe Mayo, en la progresiva 04+200, conformando un medio discontinuo.

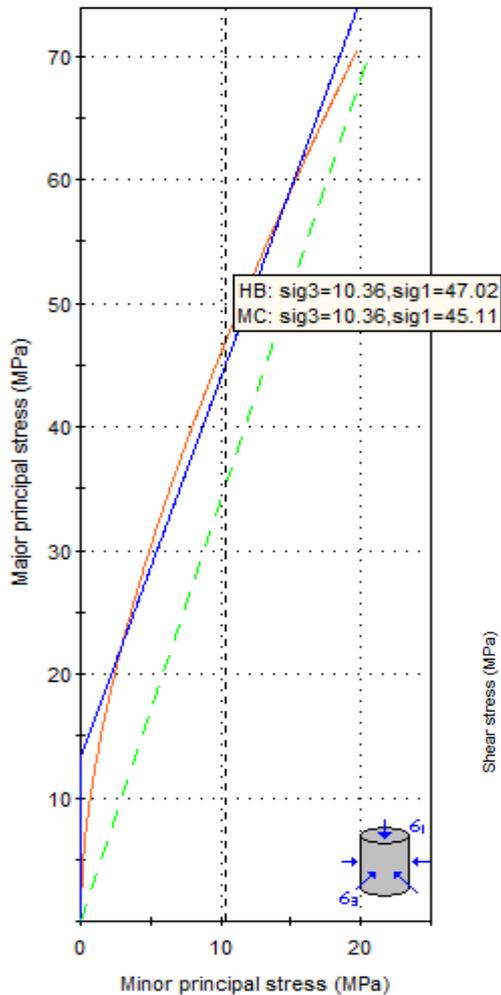
Tabla 39. Valoración del macizo Rocoso del punto de control geotécnico N°4

VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (RMR)							
PARAMETRO	RANGO DE VALORES Y VALORACIONES					Val.	
<b>Resistencia a compresión uniaxial (Mpa)</b>	>250 (15)	250-100 (12)	100-50 (7)	50-25 (4)	<25 (2) <5 (1) <1(0)	<b>7</b>	
<b>RQD (%)</b>  $\lambda = N^\circ \text{ discontinuidades } / \text{ longitud} = 40/4 = 10$  $RQD = 100 \times e^{(-0.1\lambda)} \times (0.1\lambda + 1) RQD = 73.58$	90 -100 (20)	75 – 90 (17)	50-75 (13)	25-50 (8)	<25 (3)	<b>13</b>	
<b>Espaciamiento (m)</b>	>2 m (20)	0.6 – 2 m (15)	0.2–0.6 (10)	0.06-0.2 (8)	<0.06 m (5)	<b>10</b>	
<b>Condición de las Juntas</b>	<b>Persistencia</b>	< 1m (6)	1-3 m (4)	3-10 m (2)	10-20m (1)	>20 m (0)	<b>2</b>
	<b>Abertura</b>	Cerrada (6)	< 0.01 mm (5)	0.1-1.0 mm (4)	1-5 mm (1)	>5mm (0)	<b>4</b>
	<b>Rugosidad</b>	Muy Rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Lisa (1)	Suave (0)	<b>5</b>
	<b>Relleno</b>	Ninguno (6)	Duro < 5mm (4)	Duro >5mm (2)	Suave <5mm (1)	Suave > 5mm (0)	<b>1</b>
	<b>Alteración</b>	Sana (6)	Lig. Alt (5)	Moder. Alt. (3)	Muy Alterada (1)	Descompuesta (0)	<b>3</b>
<b>AGUA SUBTERRANEA</b>	Seco (15)	Ligeramente Húmedo (10)	Húmedo (7)	Goteando (4)	Agua Fluyendo (0)	<b>10</b>	
<b>VALOR TOTAL RMR</b>						<b>55</b>	

<b>INDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICO GSI</b> <b>JUNTAS DE LA MASA ROCOSA</b> (Modificado por Hoek & Marinos, 2000).  A partir de la litología, estructura y la condición de superficie de las discontinuidades, estime el valor promedio de GSI.  No intente ser muy preciso. Escoger un rango de 33 a 37 es más realista de fijar GSI = 35. También notar que esta tabla no se aplica en mecanismos de falla controlado por estructuras. Donde se presenten planos estructuralmente débiles en una orientación desfavorable con respecto a la cara de la excavación, estos dominarán el comportamiento del macizo rocoso.  La resistencia al corte de las superficies en rocas que son propensas a deteriorarse como resultados de cambios en la humedad, se reducirá cuando exista presencia de agua. Cuando se trabaje en rocas de categoría regular a muy mala, puede moverse hacia la derecha para condiciones húmedas. La presión de poros se maneja en un análisis de esfuerzos efectivos.		CONDICIONES SUPERFICIALES		ESTRUCTURA		
		MUY BUENA Muy rugoso, Superficies frescas sin meteorización.	BUENO Rugoso, ligeramente meteorizado, superficies con óxidos.	REGULAR Lizas, moderadamente meteorizadas y superficies alteradas.	MALA Espejo de falla, altamente meteorizadas con recubrimientos compacto o rellenos o fragmentos.	MALA Espejo de falla, superficies altamente meteorizadas con recubrimientos de arcilla suave o rellenos.
		DISMINUYE CALIDAD DE SUPERFICIE ←		→		
	Intacta o Masivo: Espécimen de roca intacta o masivo in situ con pocas discontinuidades ampliamente espaciadas.	90			N/A	N/A
	Levemente fracturado: Macizo no disturbado, muy bien entrelazado, constituido por bloques cúbicos formados por tres familias de discontinuidades.	80	70			
	Moderadamente fracturado: Entrelazado macizo rocoso parcialmente disturbado con bloques angulosos de varias caras formado por 4 o más familias de discontinuidades.		60	50		
	Muy fracturado/Disturbado/Agrietada: Foleada con bloques angulosos formados por la intersección de muchas familias de discontinuidades. Persistencia de planos de estratificación o esquistocidad.			40		
	Desintegrado: Pobremente entrelazado, macizo altamente fracturado compuesto de una mezcla de pedazos de rocas angulosas y redondeadas.				30	
	Foliado/Laminado/Cizallado: Falta formación de bloques debido al pequeño espaciado o esquistocidad débil o planos de corte.	N/A	N/A		20	10

Figura 47. Sistema de clasificación de Hoek-Brown, el macizo rocoso presenta GSI 50.

Aplicando el programa RocData, se obtuvo las propiedades de resistencia de la masa rocosa, referidas a la compresión y tracción; en la en función de la gráfica  $\sigma_1$  vs.  $\sigma_3$ , se obtuvo la envolvente de falla, obteniendo tres parámetros de corte: tracción, compresión uniaxial y compresión triaxial; así mismo las constantes elásticas de la matriz rocosa se muestran en la siguiente figura, de los criterios equivalencia de áreas. En cambio, la gráfica  $\sigma_n$  vs.  $\sigma_t$ , se obtuvo la envolvente de falla de Mohr & Coulomb, congruente con la fractura de falla por corte al alcanzar la resistencia pico del material rocoso.



**Clasificación Hoek - Brown**

Resistencia comp. uniaxial intacta ( $\sigma_{ci}$ ) = 79 MPa  
 GSI = 50  $m_i$  = 26 Factor de disturbancia = 0.70  
 Módulo intacto ( $E_i$ ) = 33,970 MPa

**Criterio Hoek – Brown**

$m_b$  = 1.67  $s$  = 0.00071  $a$  = 0.51

**Morh - Coulomb**

Cohesión = 3.82 MPa Ángulo de fricción = 30.53

**Parámetros de la masa rocosa**

Resistencia a la tracción = -0.03 MPa  
 Resistencia compresión uniaxial = 2.02 MPa  
 Resistencia global = 13.38 MPa  
 Módulo de deformación = 3,644.36 MPa

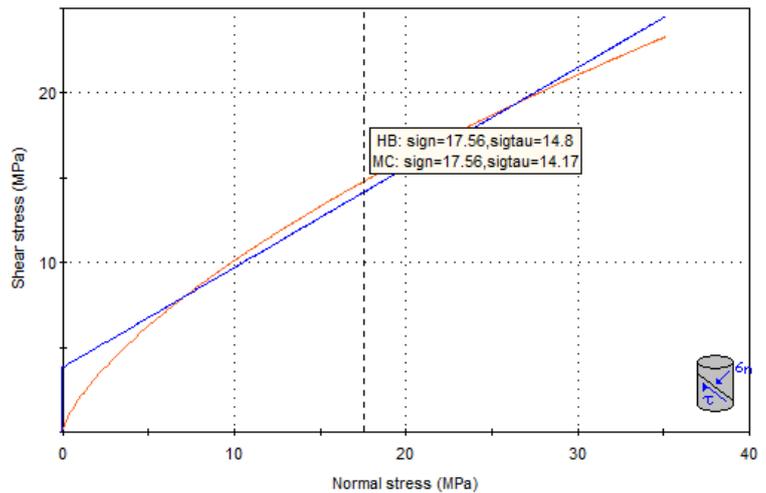


Figura 48. Método equivalencia de áreas – RocData, en función de esfuerzo principales: Mayor vs. Menor (H-B) y esfuerzo: Corte y normal (M-C), PC-04.

Tabla 40. Parámetros de entrada y salida del RocData en la progresiva Km 4+200 (PC-04)

PARÁMETROS DE ENTRADA (Clasificación de Hook— Brown)		PARÁMETROS DE SALIDA		
$\sigma_{ci}$ ( $\sigma$ )	79 Mpa	CRITERIO DE HOOK-BROWN	$m_b$	1.67
GSI	50		$s$	0.0007
$M_i$	26		$a$	0.51
D	0.70	PARAMETROS DE MOHR-COULOMB EQUIVALENTES	$c$	3.82 Mpa
$E_i$	33,97 Mpa		$\phi$	30.53
		PÁRAMETROS DEL MACIZO ROCOSO	$\sigma_{gt}$	-0.03 Mpa
			$\sigma_{gc}$	2.02 Mpa
			$\sigma_{gm}$	13.81 Mpa
		$E_{rm}$	3.64 Mpa	

➤ **Diseño en el Software Dips v7.0**

Para realizar el análisis cinemático del Talud del punto de control PC-04, se utilizó el software Dips v7.0 teniendo en cuenta la data obtenida de discontinuidades obtenidas en campo.

En la figura N°49 se aprecia: (a) Diagrama de Roseta de diaclasas, (b) Diagrama de Polos.

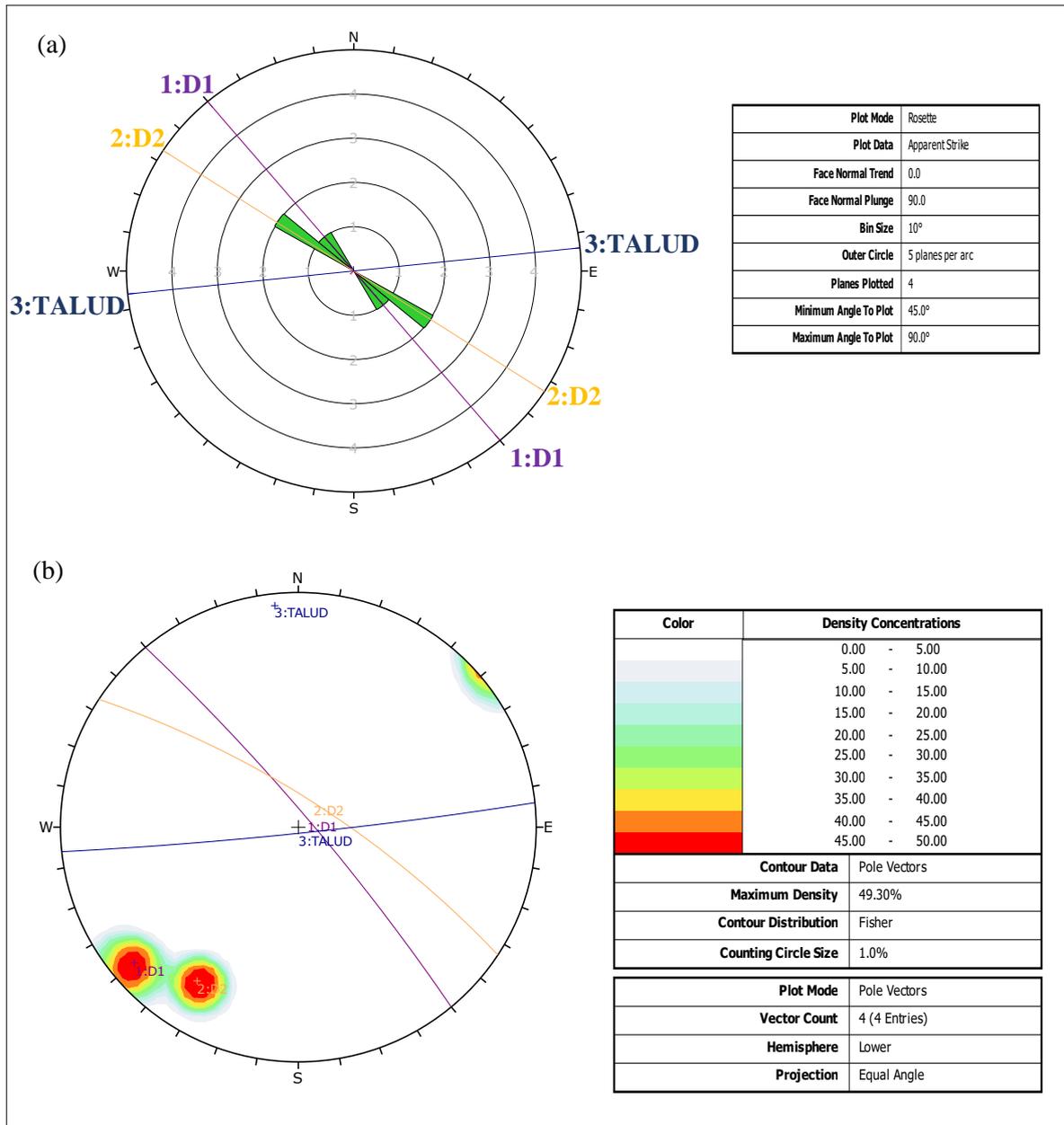
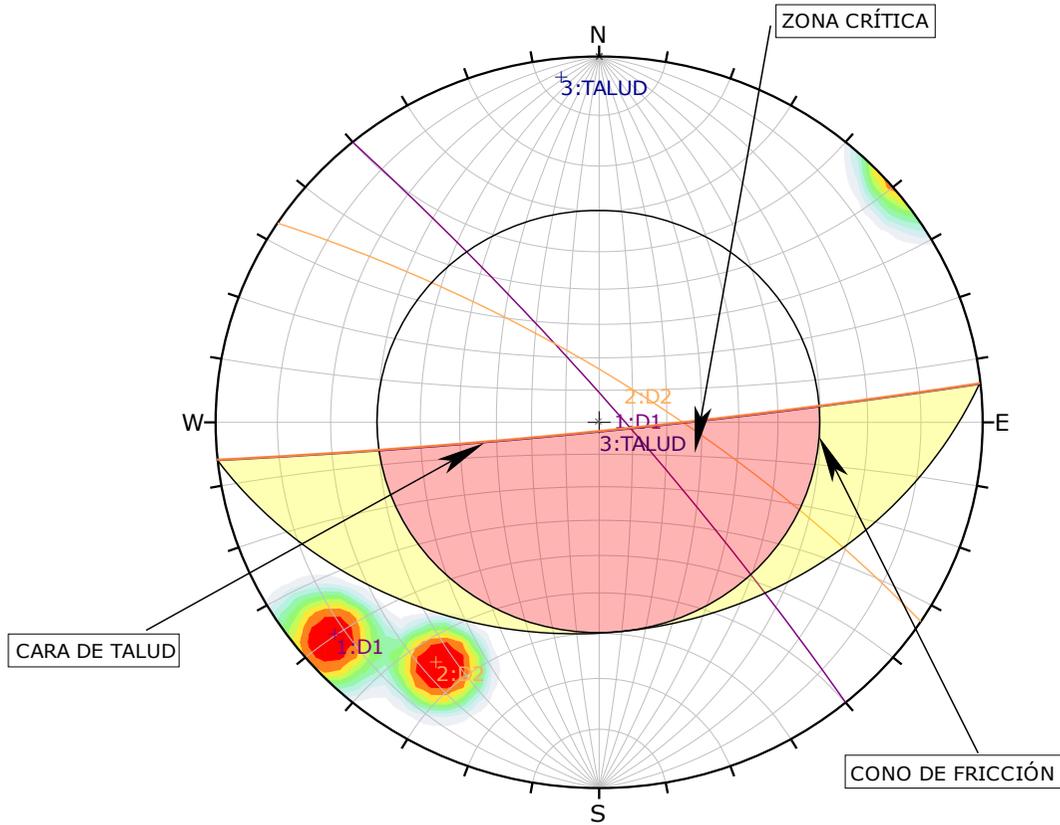


Figura 49. Análisis de discontinuidades del PC-02, usando software Dips. (a)Análisis de tendencias principales con gráfico de rosetas. (b)Análisis de familias principales y de los planos

(c)



Symbol	Feature
■	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 5.00
	5.00 - 10.00
	10.00 - 15.00
	15.00 - 20.00
	20.00 - 25.00
	25.00 - 30.00
	30.00 - 35.00
	35.00 - 40.00
	40.00 - 45.00
	45.00 - 50.00

<b>Contour Data</b>	Pole Vectors
<b>Maximum Density</b>	49.30%
<b>Contour Distribution</b>	Fisher
<b>Counting Circle Size</b>	1.0%

<b>Kinematic Analysis</b>	Wedge Sliding
<b>Slope Dip</b>	87
<b>Slope Dip Direction</b>	174
<b>Friction Angle</b>	30°

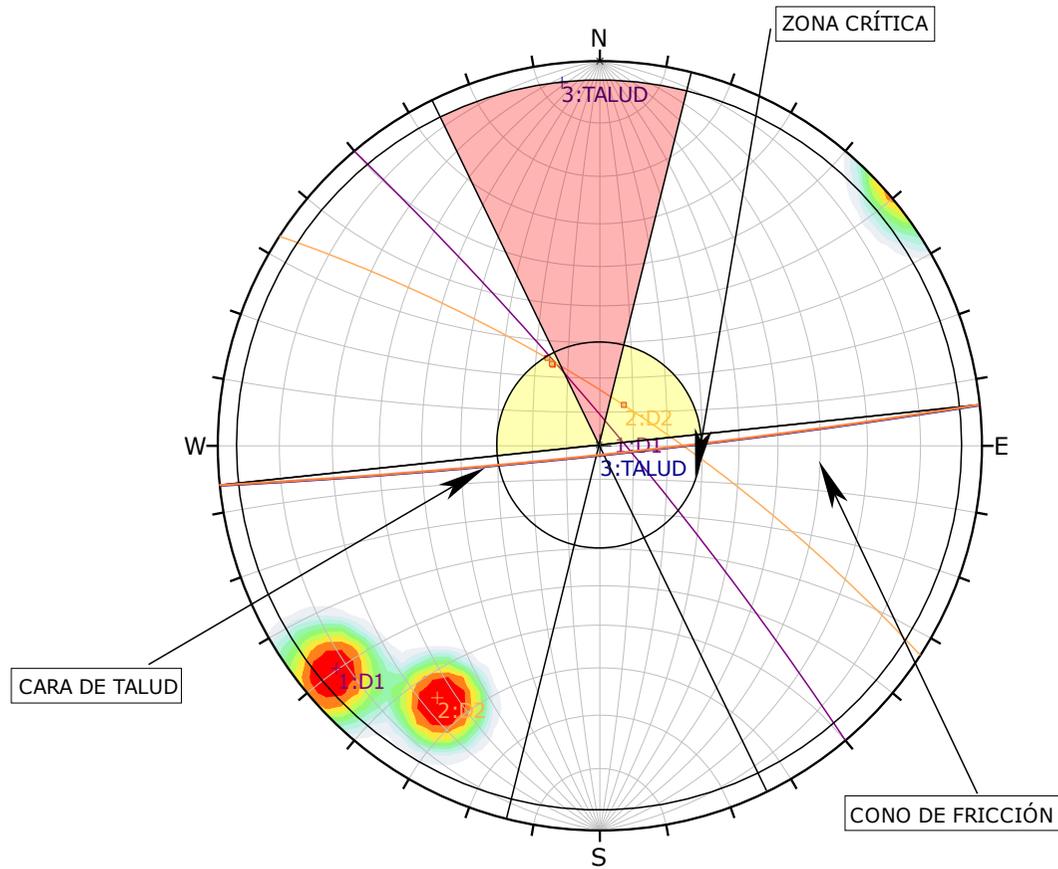
	Critical	Total	%
Wedge Sliding	0	6	0.00%

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	4 (4 Entries)
<b>Intersection Mode</b>	Grid Data Planes
<b>Intersections Count</b>	6
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Angle

Figura 50. (c) Análisis Cinemático PC-04, no presenta rotura en cuña 0.0%.

(d)



Symbol	Feature
■	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 5.00
	5.00 - 10.00
	10.00 - 15.00
	15.00 - 20.00
	20.00 - 25.00
	25.00 - 30.00
	30.00 - 35.00
	35.00 - 40.00
	40.00 - 45.00
	45.00 - 50.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	49.30%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Direct Toppling
Slope Dip	87
Slope Dip Direction	174
Friction Angle	30°
Lateral Limits	20°

	Critical	Total	%
Direct Toppling (Intersection)	0	6	0.00%
Oblique Toppling (Intersection)	5	6	83.33%
Base Plane (All)	0	4	0.00%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	4 (4 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	6
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Figura 51.(d) Análisis Cinemático PC-04, presenta rotura en vuelco 83.33%.

## Cálculo del Factor de Seguridad (FS) mediante el Software - Slide v6.0

Para el cálculo del FS de la estación PC-04, se usó los tres métodos: Bishop Simplificado, Janbu Simplificado y Gle/Morgenstern-Price. El resultado del Análisis se muestra en la Tabla N°41, donde se determina que el Talud de la estación PC-04 es estable con los 3 métodos; en condiciones normales y en condiciones efectivas más sismicidad.

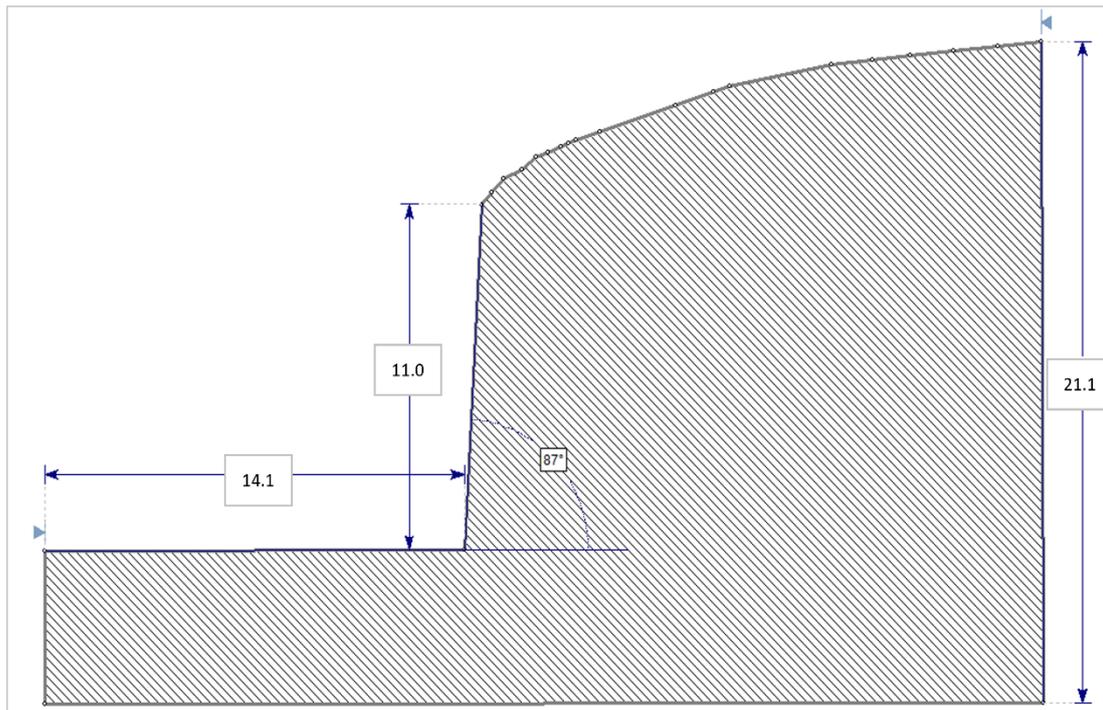


Figura 52. Punto de control PC-04, dimensiones del Talud

Tabla 41. Factor de Seguridad en el PC-04 según los diversos métodos

MÉTODOS	CONDICIONES	FS	TALUD
<b>Bishop simplificado</b>	Condiciones de Tensiones Totales	3.628	Estable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	2.422	Estable
<b>Janbu Simplificado</b>	Condiciones de Tensiones Totales	3.740	Estable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	2.192	Estable
<b>Gle/Morgenstern-Price</b>	Condiciones de Tensiones Totales	3.892	Estable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	2.248	Estable

## Tensiones Totales

### *Método de Equilibrio de Momentos (Bishop Simplificado)*

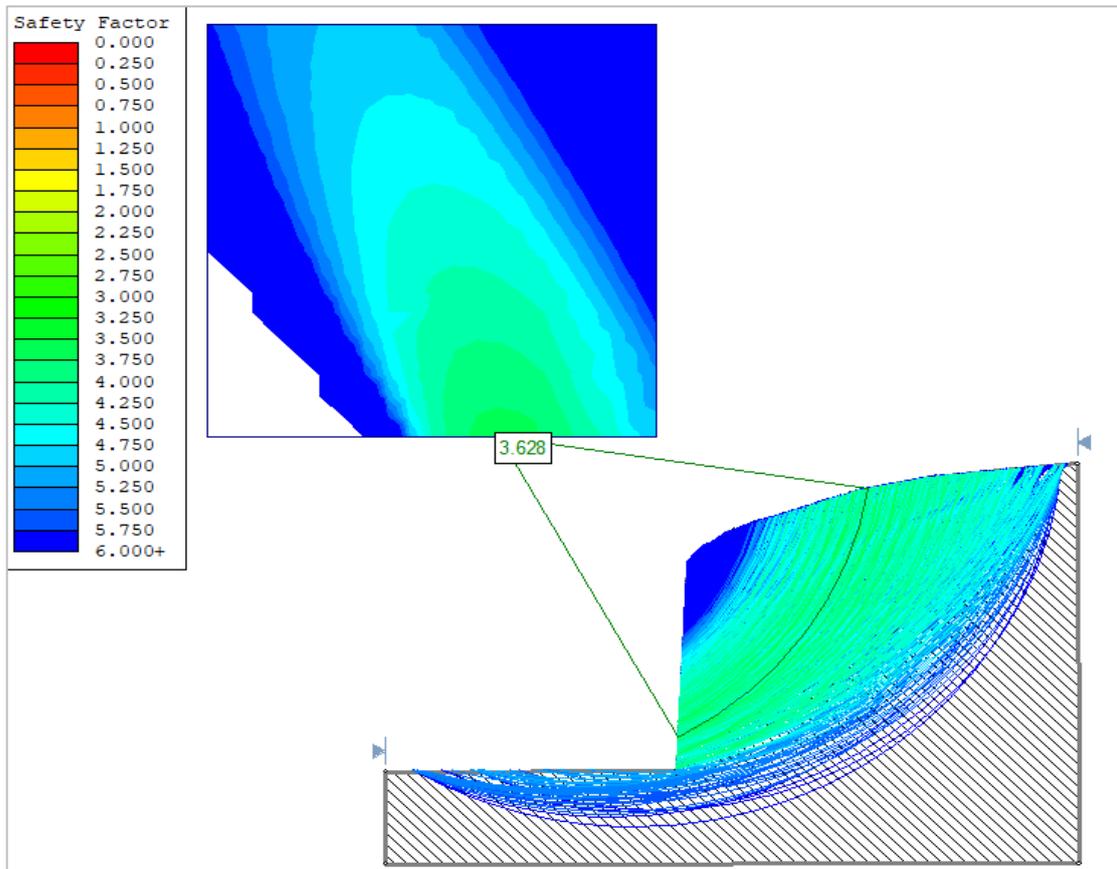


Figura 53. Factor de seguridad PC-04 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Totales

*Método de Equilibrio de Fuerzas (Jambu Simplificado)*

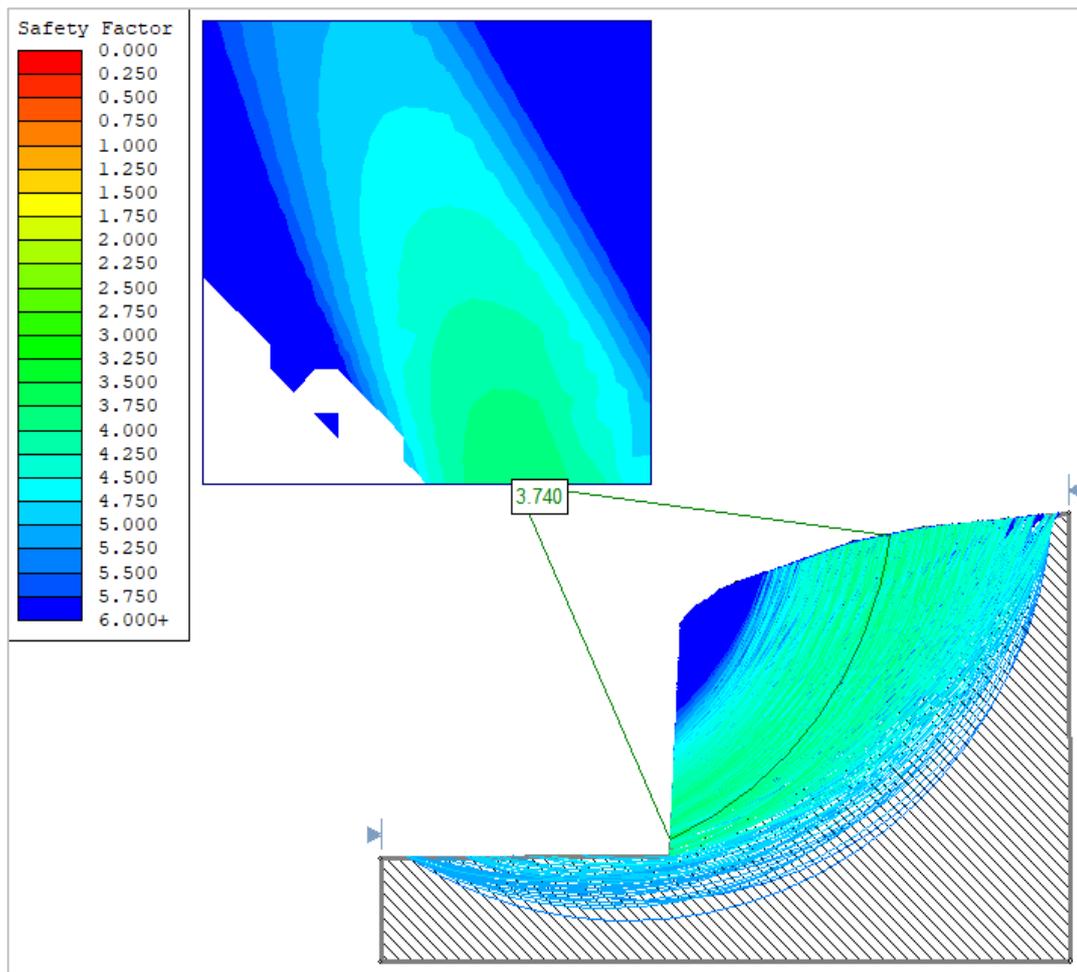


Figura 54. Factor de seguridad PC-04 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

*Método de Equilibrio de Fuerzas y Momentos (Morgenstern y Price)*

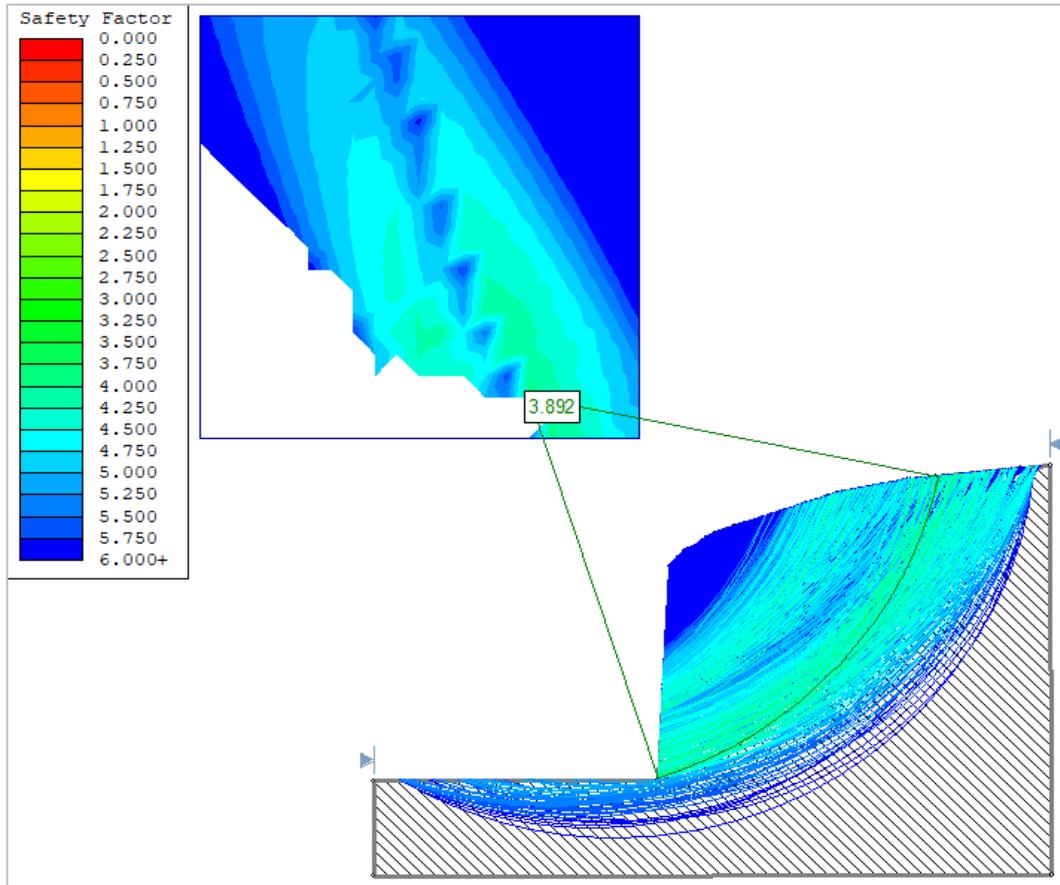


Figura 55. Factor de seguridad PC-04 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Totales.

## Tensiones Efectivas más Sismicidad

### *Método de Equilibrio de Momentos (Bishop Simplificado)*

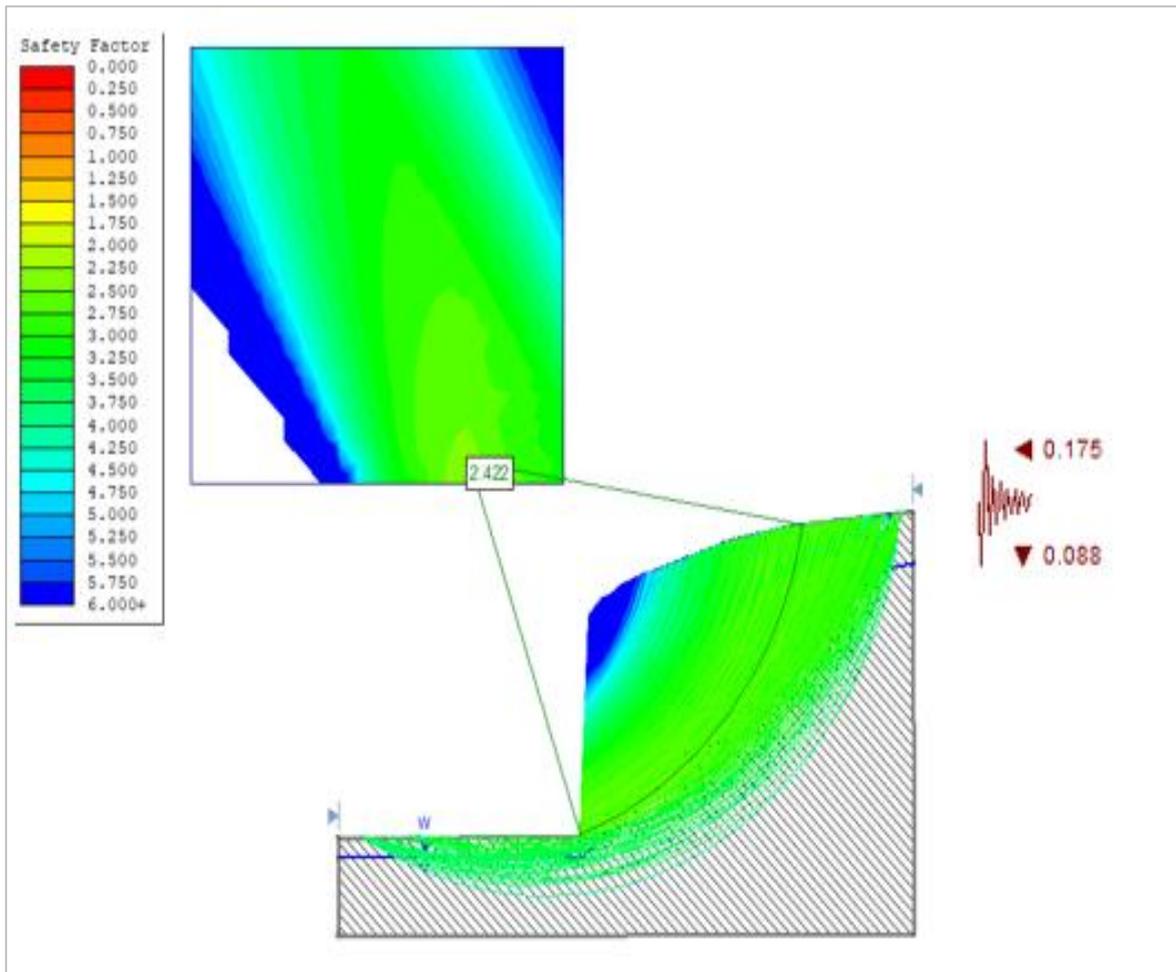


Figura 56. Factor de seguridad PC-04 por método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.

*Método de Equilibrio de Fuerzas (Jambu Simplificado)*

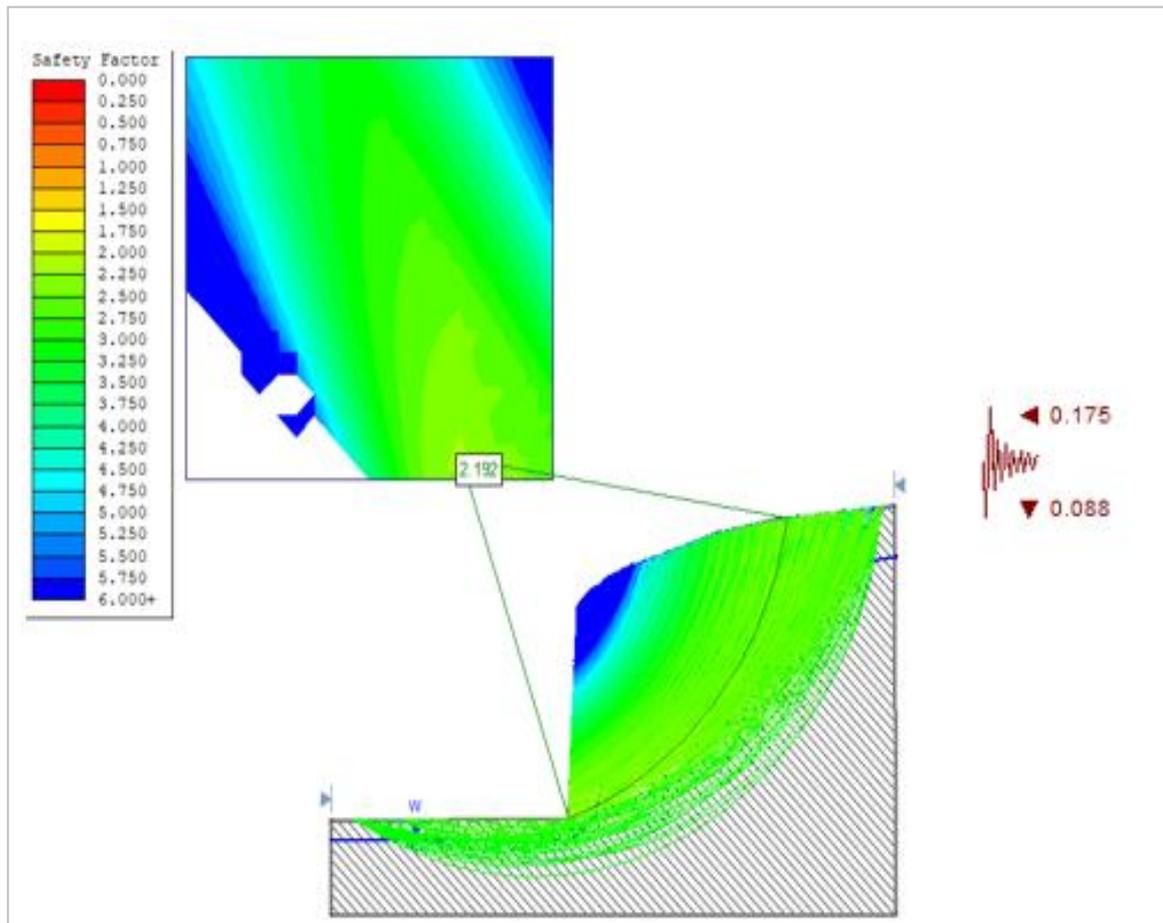


Figura 57. Factor de seguridad PC-04 por método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.

*Método de Equilibrio de Fuerzas y Momentos (Morgenstern y Price)*

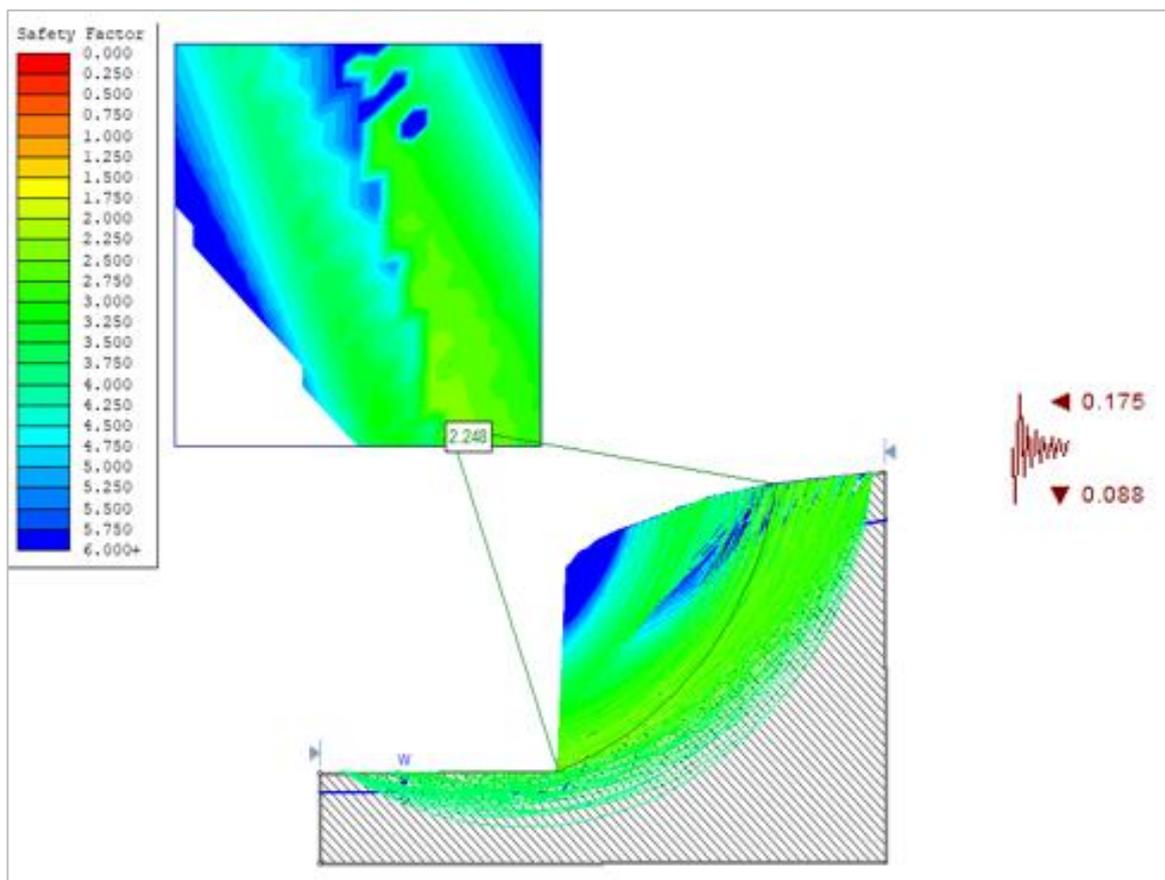


Figura 58. Factor de seguridad PC-04 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

## PUNTO DE CONTROL 05 – Progresiva km 4+920

En el punto de control 05, se realizó la excavación de una calicata de profundidad 1.20m de donde se extrajo dos muestras, la primera del primer estrato de 0,0.0- 0.50m y la segunda de 0,0.50-1.20. De manera que, en los ensayos de laboratorio se obtuvo de acuerdo a la clasificación SUCS, una Grava mal graduada con limo y arena (GP-GM) y según AASHTO A-2-4 (0) para el primer estrato, mientras que, para el segundo estrato, se obtuvo una Arena limosa (SM) y A-2-6.

En la figura N°59, se muestra el registro de excavación de la calicata N°1 en la progresiva km 2+000, según las normas técnicas NTP 339.150 , ASTM D 2488 y MTC E 10.

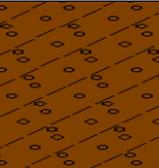
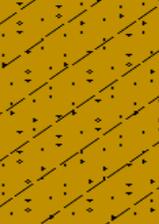
REGISTRO DE EXCAVACIÓN DE CALICATA NORMA (NTP 339.150   ASTM D 2488   MTC E 101)					
PROFUNDIDAD (m)	CLASIFICACIÓN SUCS	CLASIFICACIÓN AASHTO	SIMBOLOGÍA	DESCRIPCIÓN DE ESTRATIGRAFÍA	ESTRATO
0.50 m	GP-GM	A-2-4 (0)		0.00 - 0.50 m.- GRAVA MAL GRADUADA CON LIMO Y ARENA Suelo A - 2 - 4 (0) color marron oscuro ,con el 16,7% de humedad,71,8 de grava,20,6% arena y 7,6 de finos, en cuanto al limite liquido 33,6,% , limite plástico 23,8% , indice de plasticidad 9,8 % (baja plasticida).	E-01
1.20m	SM	A-2-6 (0)		0.50 - 1.20m.- ARENA LIMOSA. Suelo A - 26- 4 (0) posee humedad media 18,5%, color marron claro, con el 42,3%grava, de arena el 44,2%, y el 13,5% de finos,con limite liquido de 28%,limite plástico 27,5y de baja plasticidad .%	E - 02



Figura 59. Registro de Excavación de la Calicata N°3 (PC-05) en la progresiva Km 4+920.

➤ **Análisis Granulométrico de la Muestra 1 de la Calicata N°3**

Tabla 42. Análisis Granulométrico de la muestra 1 (M1) de la calicata N°3 en la progresiva Km 4+920 a una profundidad de 0.50m, según las Normas (NTP 339.128, ASTM D 422, MTC E 107)

TAMICES ASTM	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE PARCIAL RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA DE ENSAYO	
3"	75.000	0.0	0.0	0.0	100.0	<b>PESO TOTAL</b>	10632.0 gr
2 1/2"	63.000	0.0	0.0	0.0	100.0	<b>PESO FRACCIÓN</b>	127.5 gr
2"	50.000	654.0	6.2	6.2	93.8	<b>TAMAÑO MÁXIMO</b>	2 1/2
1 1/2"	37.500	1396.0	13.1	19.3	80.7	<b>PORC. DE GRAVA</b>	71.8 %
1"	25.000	1472.0	13.8	33.1	66.9	<b>PORC. DE ARENA</b>	20.6 %
3/4"	19.000	944.0	8.9	42.0	58.0	<b>PORC. DE FINOS</b>	7.6 %
1/2"	12.500	0.0				<b>LÍMITE LÍQUIDO</b>	33.6 %
3/8"	9.500	2020.0	19.0	61.0	39.0	<b>LÍMITE PLÁSTICO</b>	23.8 %
N° 4	4.750	1150.0	10.8	71.8	28.2	<b>ÍNDICE PLÁSTICO</b>	9.8 %
N° 8	2.360	-	-	-	-	<b>CLASF. SUCS</b>	GP - GM
N° 10	2.000	-	-	-	-	<b>CLASF. AASHTO</b>	A - 2 - 4 (0)
N° 16	1.180	-	-	-	-	<b>D<sub>10</sub></b>	0.157 mm
N° 20	0.850	-	-	-	-	<b>D<sub>30</sub></b>	5.338 mm
N° 30	0.600	-	-	-	-	<b>D<sub>60</sub></b>	20.215 mm
N° 40	0.425	58.70	13.0	84.8	15.2	<b>COEF. DE UNIF.</b>	128.9
N° 50	0.300	-	-	-	-	<b>COEF. DE CURV.</b>	9.0
N° 60	0.250	-	-	-	-	<b>MÓDULO DE FINEZA</b>	5.85
N° 80	0.180	-	-	-	-		
N° 100	0.150	25.80	5.7	90.5	9.5	<b>DESCRIPCIÓN</b>	
N° 140	0.106	-	-	-	-	<b>GRAVA MAL GRADUADA CON LIMO Y ARENA</b>	
N° 200	0.075	8.60	1.9	92.4	7.6		
FONDO		34.40	7.6	100.0			

En la Figura N°60, se observa la Curva Granulométrica de la muestra 1 (M1) de la calicata N°3 en la progresiva Km 4+920 a una profundidad de 0.50m, según las Normas (NTP 339.128 , ASTM D 422 y MTC E 107).

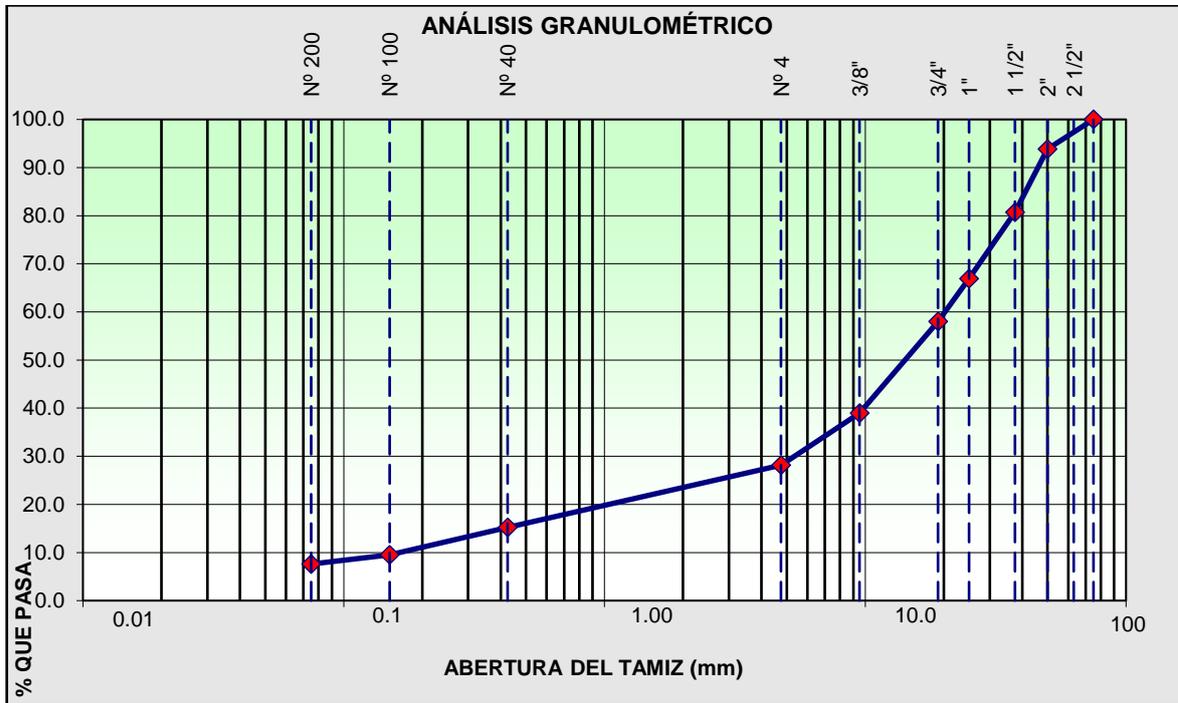


Figura 60. Curva Granulométrica de la muestra 1 (M1) de la calicata N°3 en la progresiva Km 4+920

➤ **Límites de Atterberg de la Muestra 1 de la Calicata N°3**

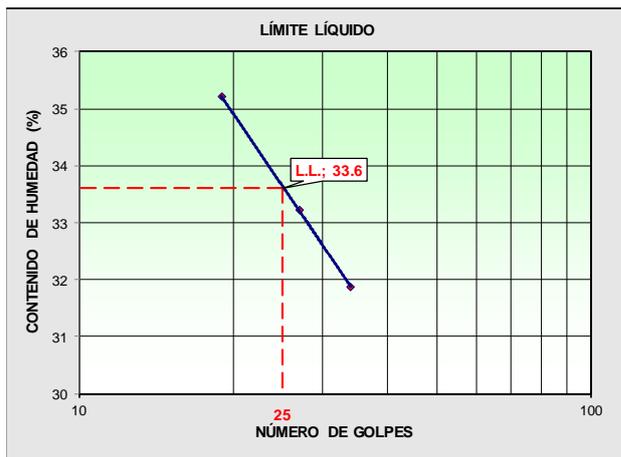
Para determinar los límites de Atterberg (Límites de Consistencia), de la muestra 1 de la calicata N°3, se realizó el ensayo de laboratorio, de acuerdo a la siguiente normativa ((NTP 339.129, ASTM D 4318 y MTC E 110) para límite líquido, y para determinar el límite plástico e índice de plasticidad fue según las normas (NTP 339.129, ASTM D 4318, MTC E 111). Teniendo como resultado de la muestra que el límite líquido es de 33.6%, el límite plástico es de 23.8% y el índice de plasticidad es de 9.8%.

**MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS**  
NORMA (NTP 339.129 | ASTM D 4318 | MTC E 110)

Nº DE TARA		-	-	-
PESO DE LA TARA (gr)		26.50	28.50	28.40
PESO DE SUELO HÚMEDO + TARA (gr)		62.50	65.80	66.80
PESO DE SUELO SECO + TARA (gr)		53.80	56.50	56.80
PESO DE AGUA (gr)		8.70	9.30	10.00
PESO DE SUELO SECO (gr)		27.30	28.00	28.40
HUMEDAD (%)		31.9%	33.2%	35.2%
Nº DE GOLPES		34	27	19

**MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS**  
NORMA (NTP 339.129 | ASTM D 4318 | MTC E 111)

Nº DE TARA		-	-	PROMEDIO
PESO DE LA TARA (gr)		28.10	28.30	
PESO DE SUELO HÚMEDO + TARA (gr)		37.20	38.45	
PESO DE SUELO SECO + TARA (gr)		35.40	36.55	
PESO DE AGUA (gr)		1.80	1.90	
PESO DE SUELO SECO (gr)		7.30	8.25	
HUMEDAD (%)		24.7%	23.0%	



CONSTANTES FÍSICAS DE LA MUESTRA	
LÍMITE LÍQUIDO	33.6%
LÍMITE PLÁSTICO	23.8%
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	9.8%

OBSERVACIONES:

---



---

Figura 61. Límites de Atterberg de la Muestra 1 de la Calicata N°3 en la Progresiva 4+920

➤ **Contenido de Humedad de la Muestra 1 de la Calicata N°3**

Para determinar el contenido de humedad, se tuvo en cuenta las siguientes normas (NTP 339.127, ASTM D 2216 y MTC E 108), teniendo como resultado 16.7 % de contenido de humedad en la Muestra 1, de la Calicata N°3 en la Progresiva Km 4+920.

Tabla 43. Contenido de humedad en la Muestra 1 de la Calicata N°3 en la Progresiva Km 4+920

Nº Muestra	Profundidad	Peso (Suelo Húmedo+ Tara gr)	Peso (Suelo Seco+ Tara gr)	Peso de Tara (gr)	Peso de agua (gr)	Peso de Suelo seco (gr)	Contenido de Humedad
M1	0.00 – 0.50 m	221.2	193.6	28.1	27.6	165.5	16.7%

➤ **Análisis Granulométrico de la Muestra 2 de la Calicata N°3**

Tabla 44. Análisis Granulométrico de la muestra 1 (M2) de la calicata N°3 en la progresiva Km 4+920 a una profundidad de 0.50m, según las Normas (NTP 339.128, ASTM D 422, MTC E 107)

TAMICES ASTM	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE PARCIAL RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA (%)	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA DE ENSAYO	
3"	75.000	0.0	0.0	0.0	100.0	PESO TOTAL	11432.0 gr
2 1/2"	63.000	0.0	0.0	0.0	100.0	PESO FRACCIÓN	179.4 gr
2"	50.000	753.0	6.6	6.6	93.4	TAMAÑO MÁXIMO	2 1/2
1 1/2"	37.500	1108.0	9.7	16.3	83.7	PORC. DE GRAVA	42.3 %
1"	25.000	905.0	7.9	24.2	75.8	PORC. DE ARENA	44.2 %
3/4"	19.000	944.0	8.3	32.5	67.5	PORC. DE FINOS	13.5 %
1/2"	12.500	0.0	0.0	32.5	67.5	LÍMITE LÍQUIDO	38.0 %
3/8"	9.500	705.0	6.2	38.6	61.4	LÍMITE PLÁSTICO	27.5 %
N° 4	4.750	420.0	3.7	42.3	57.7	ÍNDICE PLÁSTICO	10.5 %
N° 8	2.360	-	-	-	-	CLASF. SUCS	SM
N° 10	2.000	-	-	-	-	CLASF. AASHTO	A - 2 - 6 (0)
N° 16	1.180	-	-	-	-	D <sub>10</sub>	0.041 mm
N° 20	0.850	-	-	-	-	D <sub>30</sub>	0.436 mm
N° 30	0.600	-	-	-	-	D <sub>60</sub>	7.322 mm
N° 40	0.425	89.40	28.8	71.1	28.9	COEF. DE UNIF.	178.9
N° 50	0.300	-	-	-	-	COEF. DE CURV.	0.6
N° 60	0.250	-	-	-	-	MÓDULO DE FINEZA	4.10
N° 80	0.180	-	-	-	-		
N° 100	0.150	35.30	11.4	82.4	17.6	DESCRIPCIÓN	
N° 140	0.106	-	-	-	-	ARENA LIMOSA CON GRAVA	
N° 200	0.075	12.60	4.1	86.5	13.5		
FONDO		42.10	13.5	100.0			

En la Figura N°62, se observa la Curva Granulométrica de la muestra 2 (M2) de la calicata N°3 en la progresiva Km 4+920 a una profundidad de 1.20m, según las Normas (NTP 339.128 , ASTM D 422 y MTC E 107).

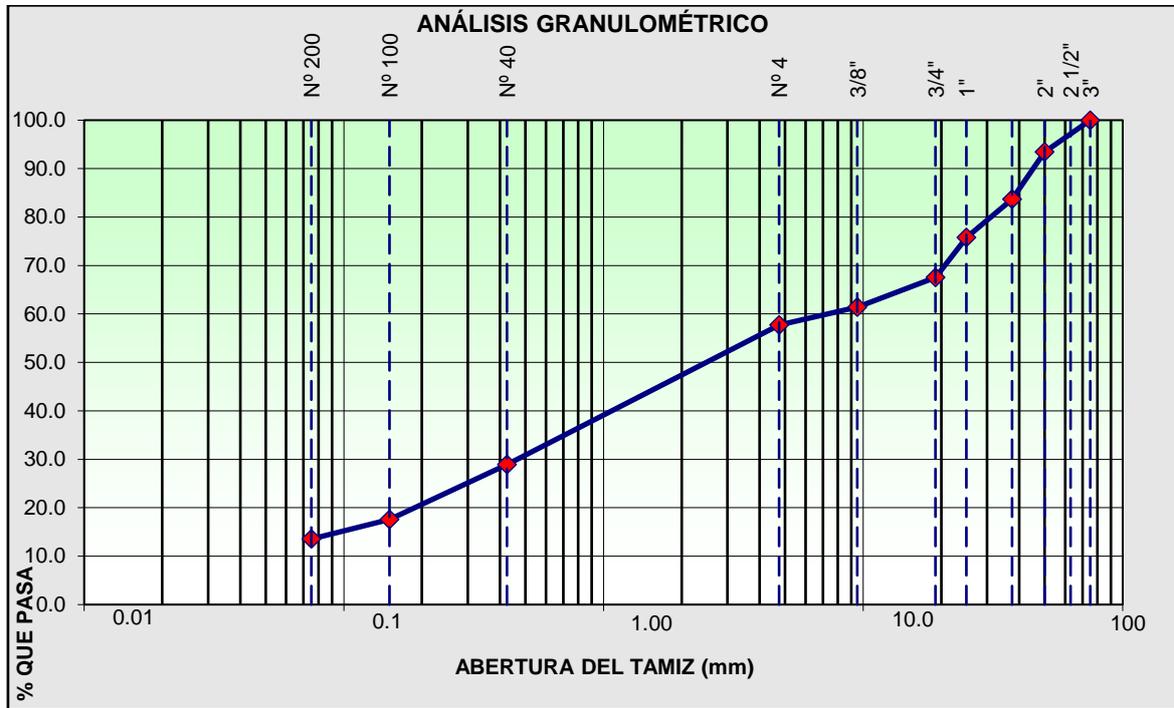


Figura 62. Curva Granulométrica de la muestra 2 (M2) de la calicata N°3 en la progresiva Km 4+920.

➤ **Límites de Atterberg de la Muestra 2 de la Calicata N°3**

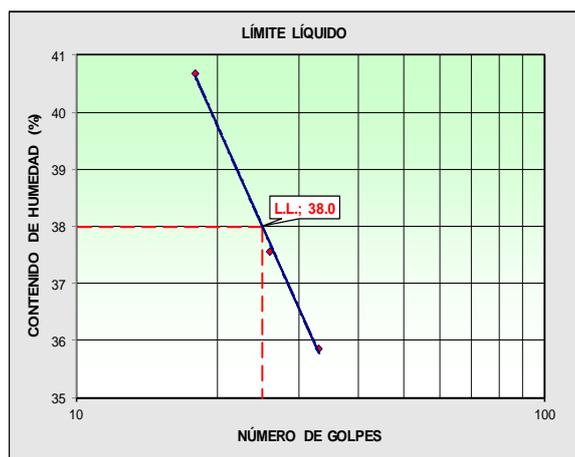
Para determinar los límites de Atterberg (Límites de Consistencia), de la muestra 2 de la calicata N°3, se realizó el ensayo de laboratorio, de acuerdo a la siguiente normativa ((NTP 339.129, ASTM D 4318 y MTC E 110) para límite líquido, y para determinar el límite plástico e índice de plasticidad fue según las normas (NTP 339.129, ASTM D 4318, MTC E 111). Teniendo como resultado de la muestra que el límite líquido es 38%, el límite plástico es de 27.5% y el índice de plasticidad es de 10.5%.

**MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS**  
NORMA (NTP 339.129 | ASTM D 4318 | MTC E 110)

Nº DE TARA		-	-	-
PESO DE LA TARA (gr)		27.30	28.20	28.00
PESO DE SUELO HÚMEDO + TARA (gr)		54.20	56.40	57.40
PESO DE SUELO SECO + TARA (gr)		47.10	48.70	48.90
PESO DE AGUA (gr)		7.10	7.70	8.50
PESO DE SUELO SECO (gr)		19.80	20.50	20.90
HUMEDAD (%)		35.9%	37.6%	40.7%
Nº DE GOLPES		33	26	18

**MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS**  
NORMA (NTP 339.129 | ASTM D 4318 | MTC E 111)

Nº DE TARA		-	-	PROMEDIO
PESO DE LA TARA (gr)		27.90	28.00	
PESO DE SUELO HÚMEDO + TARA (gr)		38.40	39.80	
PESO DE SUELO SECO + TARA (gr)		36.10	37.30	
PESO DE AGUA (gr)		2.30	2.50	
PESO DE SUELO SECO (gr)		8.20	9.30	
HUMEDAD (%)		28.0%	26.9%	27.5%



CONSTANTES FÍSICAS DE LA MUESTRA	
LÍMITE LÍQUIDO	38.0%
LÍMITE PLÁSTICO	27.5%
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	10.5%

OBSERVACIONES:

---



---

Figura 63. Límites de Atterberg de la Muestra 2 de la Calicata N°3 en la Progresiva Km 4+920.

➤ **Contenido de Humedad de la Muestra 2 de la Calicata N°3**

Para determinar el contenido de humedad, se tuvo en cuenta las siguientes normas (NTP 339.127, ASTM D 2216 y MTC E 108), teniendo como resultado 18.5 % de contenido de humedad en la Muestra 2, de la Calicata N°3 en la Progresiva Km 4+920.

Tabla 45. Contenido de humedad en la Muestra 2 de la Calicata N°3 en la Progresiva Km 4+920

Nº Muestra	Profundidad	Peso (Suelo Húmedo+ Tara gr)	Peso (Suelo Seco+ Tara gr)	Peso de Tara (gr)	Peso de agua (gr)	Peso de Suelo seco (gr)	Contenido de Humedad
M2	0.50- 1.20 m	245.3	211.3	27.8	34.0	183.5	18.5%

➤ **Asentamiento en la Calicata N°3**

Para realizar el análisis del asentamiento en la calicata N°3 se realizó mediante el software Geo5, dónde algunos parámetros de entrada se obtuvieron de los ensayos de laboratorio y los restantes se obtuvieron del software propiamente dicho. Para ello se utilizó el método del módulo edométrico.

Para determinar el asentamiento, se analizó en tres escenarios: En estado natural, con sobrecarga y con saturación más sobrecarga,

***En Estado Natural***

En estado Natural, es decir sin la presencia de sobrecarga, ni de saturación total, la calicata no presenta asentamiento.

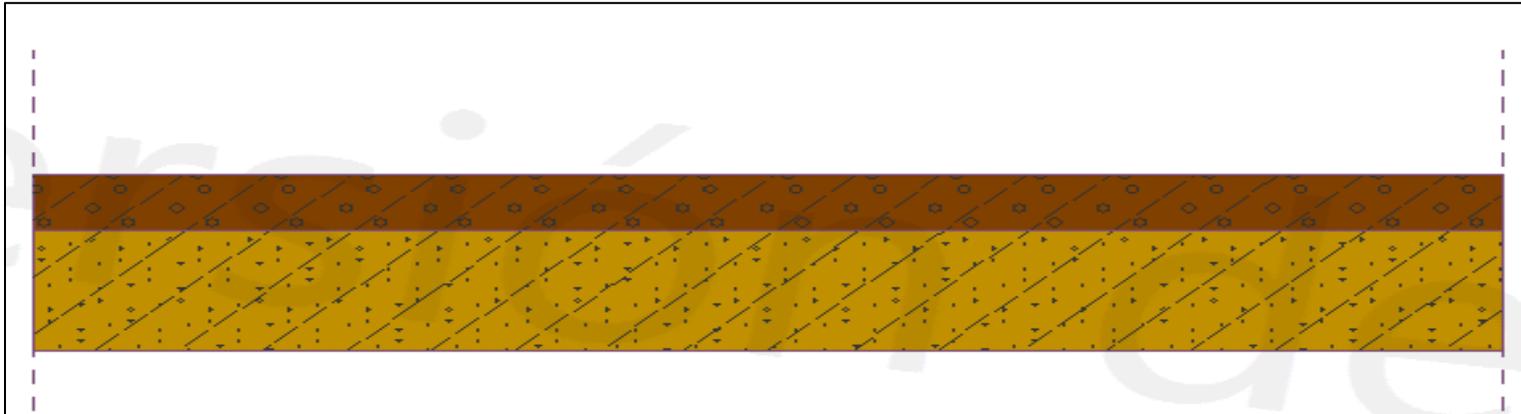


Figura 64. Asentamiento en la Calicata N°3 en estado natural.

## Sobrecarga

Para la sobrecarga se tuvo en cuenta lo estipulado por MTC, Reglamento Nacional de Vehículos (2003), es decir la tabla N°17, por ello que consideramos como carga de  $60 \text{ kN/m}^2$ .

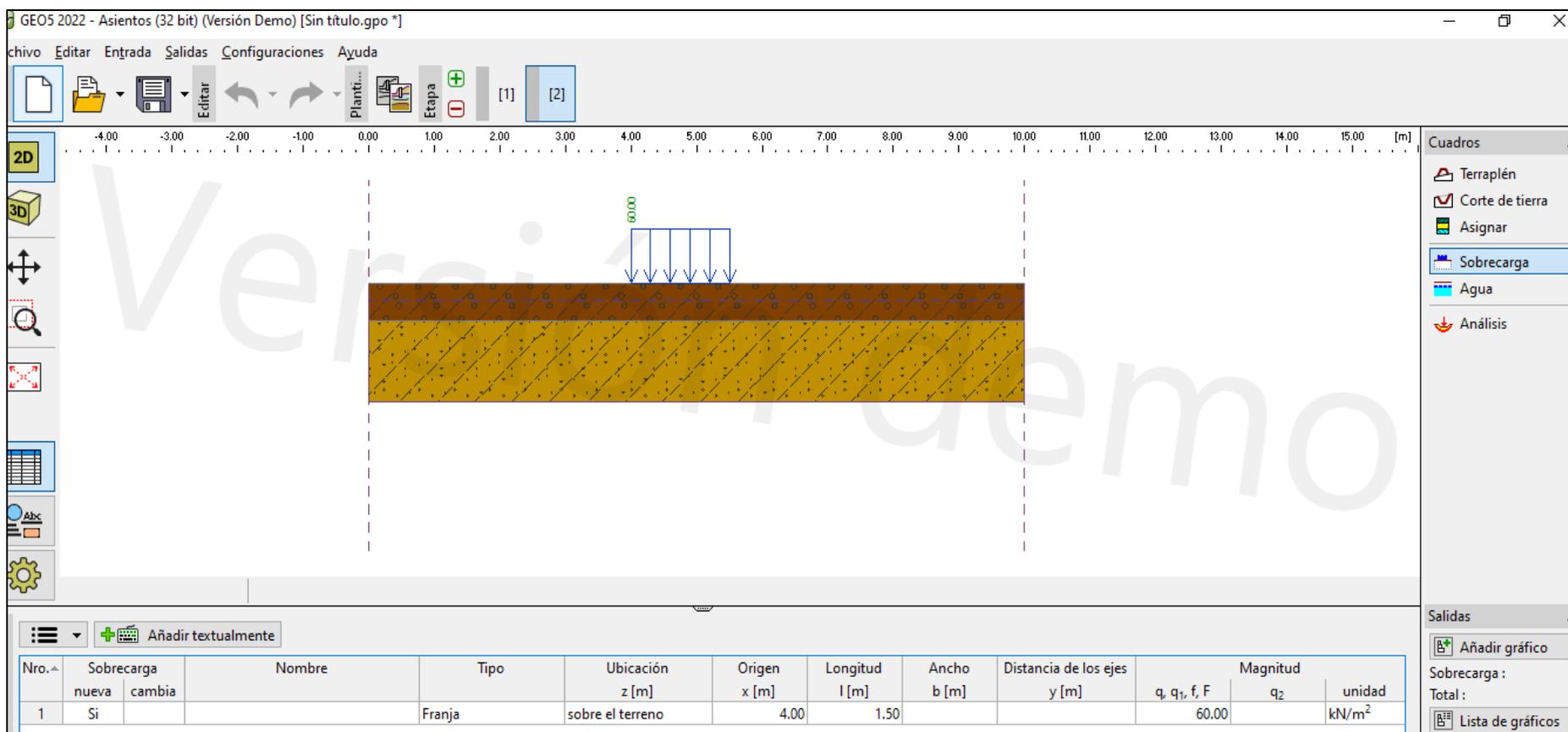


Figura 65. Asentamiento en la Calicata N°3 con una sobrecarga de  $60 \text{ kN/m}^2$ .

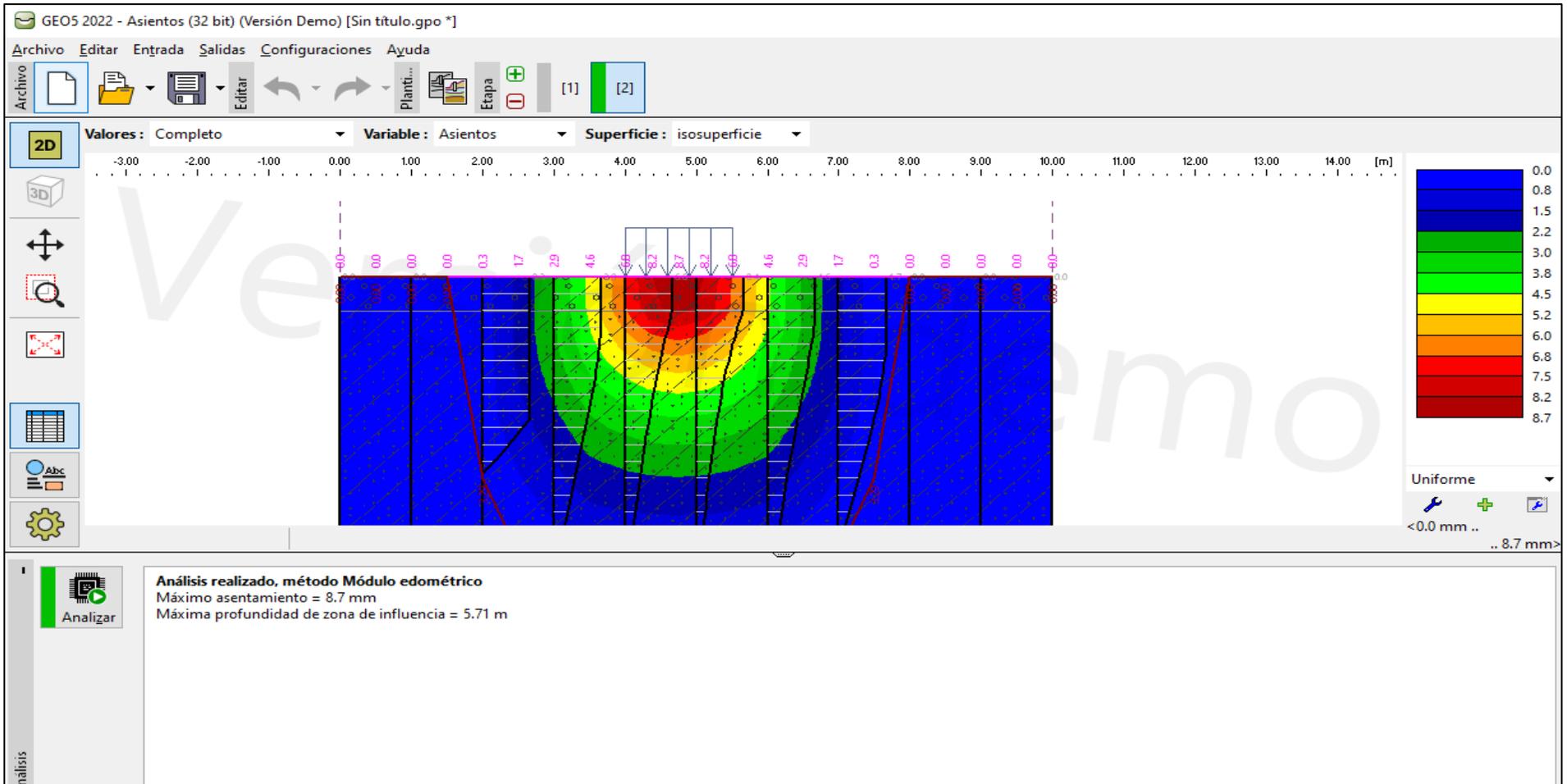


Figura 66. Análisis de Isosuperficie con el Módulo edométrico con la sobrecarga en la Calicata N°3, el máximo asentamiento es de 8.7mm y máxima profundidad de zona de influencia es 5.71m.

### Sobrecarga más Saturación

Para determinar sobrecarga más saturación se consideró dos parámetros importantes la sobrecarga de  $60 \text{ kN/m}^2$  y el nivel freático a 0.25 de profundidad.

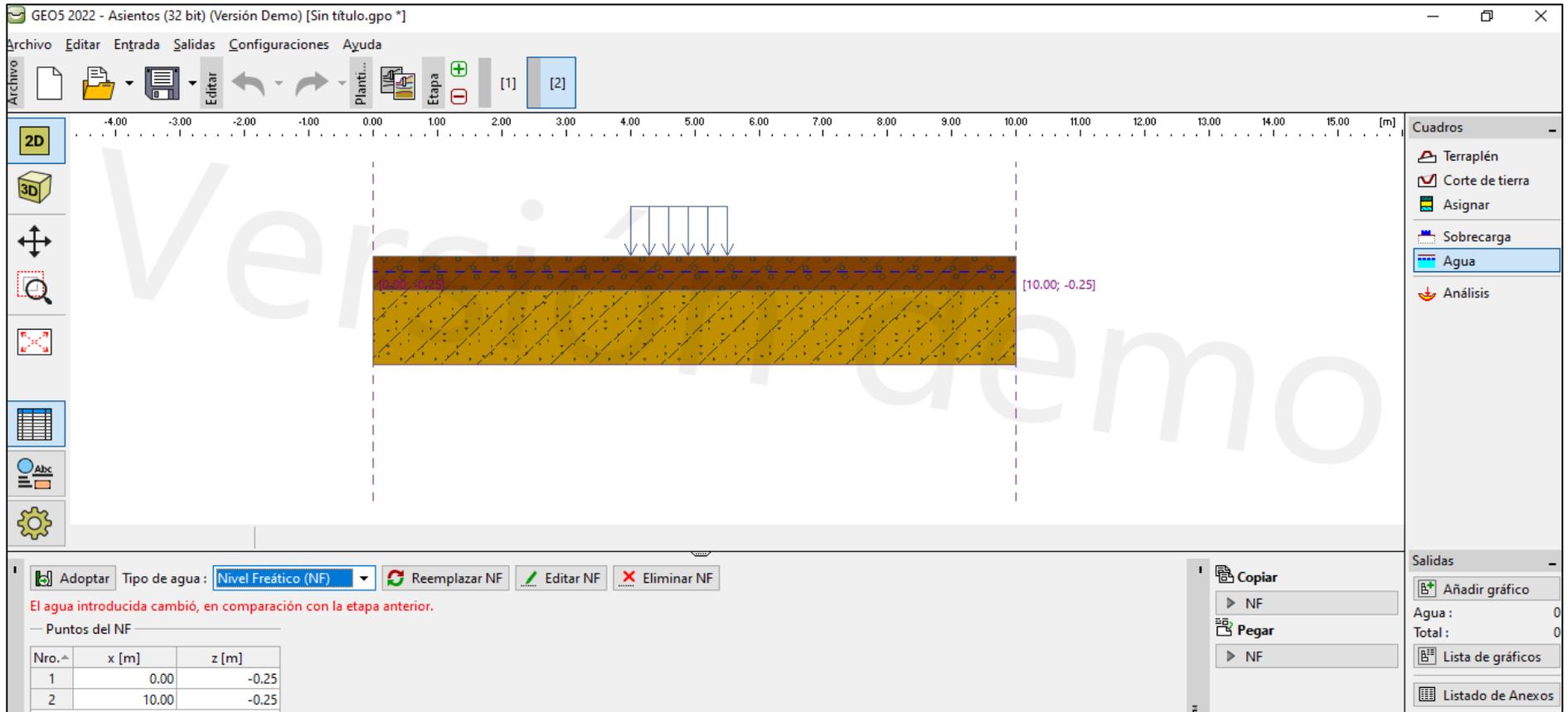


Figura 67. Asentamiento de la calicata N°3 con sobrecarga más saturación.

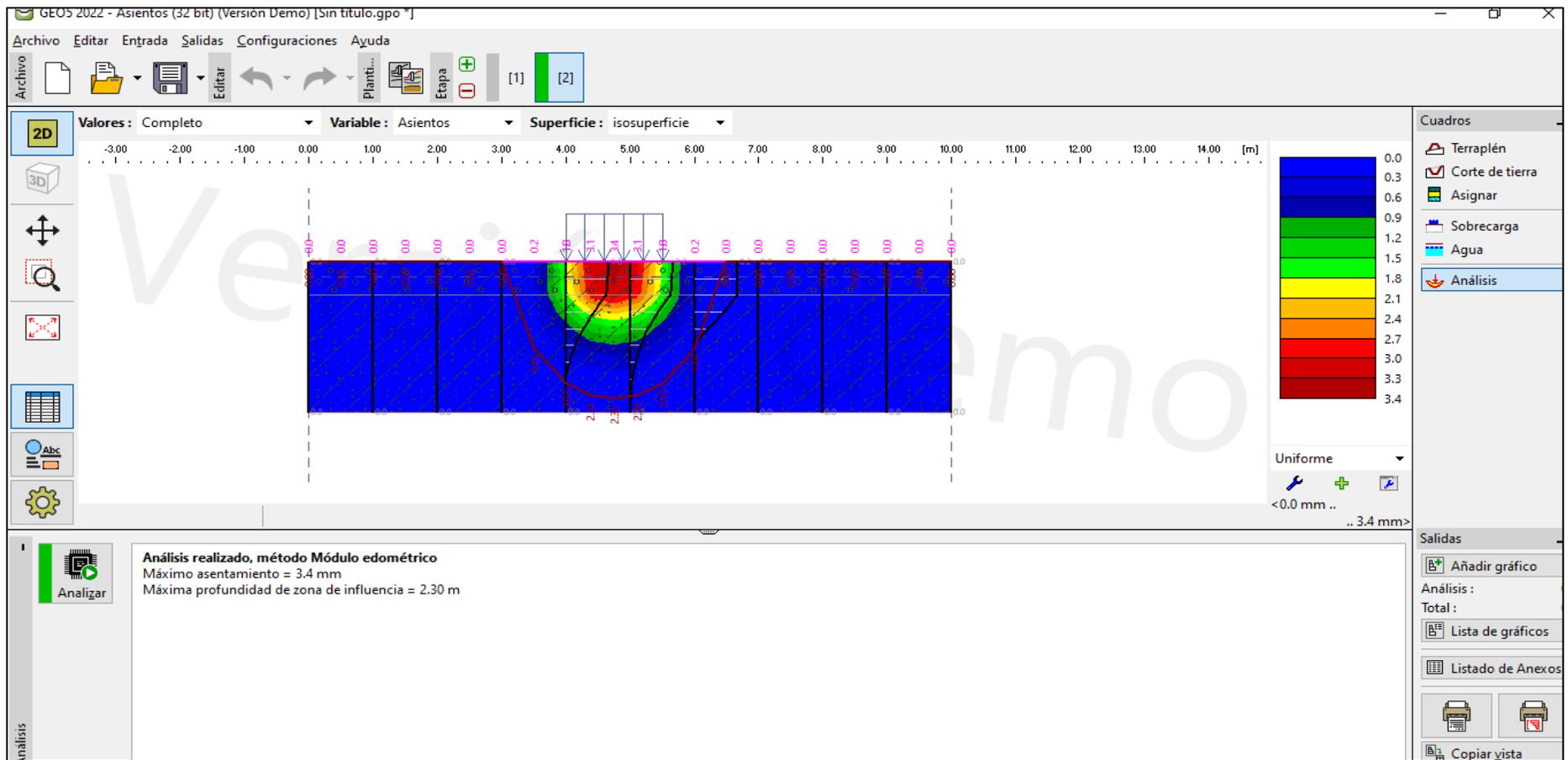


Figura 68. Análisis de Isosuperficie con el Módulo edómetro con sobrecarga y saturación en la calicata N°3, el máximo asentamiento es de 3.4 mm y máxima profundidad de zona de influencia es 2.30m.

➤ **Expansión en la Calicata N°3**

Según lo expuesto por Vásquez (2018), es decir, tomando como referencia la tabla N° 15 clasificación de suelos expansivos, para evaluar el potencial de expansividad de suelos en función al índice plástico y límite líquido y con los datos obtenidos en laboratorio de las dos muestras correspondientes a la calicata N°1, se puede determinar que son suelos de potencial de expansión bajo ya que su índice de plasticidad es menor a 18 y su límite líquido es mayor a 15

La muestra 1 de Calicata N°3, posee un índice de plasticidad de 9.8% y 33.6% en cuanto a índice de plasticidad, por lo cual según el intervalo descrito líneas arriba es un suelo que no presenta (NP) potencial de expansión,

Tabla 46. Potencial de expansión de la muestra 1 de Calicata N°3

<b>Potencial de Expansión</b>	<b>Índice de plasticidad</b>	<b>Límite de Líquido</b>
<b>Bajo</b>	<18	>15
<b>Bajo</b>	9.8%	33.6%

La muestra 2 (M2) de Calicata N°3, posee un índice de plasticidad de y en cuanto a índice de plasticidad, considerando estos parámetros es un suelo con potencial de expansión bajo.

Tabla 47. Potencial de expansión de la muestra 2 de Calicata N°3

<b>Potencial de Expansión</b>	<b>Índice de plasticidad</b>	<b>Límite de Líquido</b>
<b>Bajo</b>	<18	>15
<b>Bajo</b>	10.5%	38.0%

## PUNTO DE CONTROL 06 – Progresiva km 5+000

El cartografiado geomecánico muestra rocas dacitas de calidad buena con espesor: 1.00 m. a 1.50 m, con pseudoestratificación subvertical; con parámetros:  $\sigma_{ci} = 98$  MPa, RQD = 88.37%, RMR = 64 (Tipo II), y GSI = 59. Sin embargo, la intersección de juntas de pseudoestratificación (E) y diaclasa (D2), está generando rupturas en cuña afectado un tramo de 30 m. de inestabilidad; ocasionando caídas de rocas de dimensiones: 0.30 m<sup>3</sup>. 0.60 m<sup>3</sup>, constantemente acelerando el transporte de público. (Ver Anexo 3.4, Formato de Clasificación de Rocas Volcánicas – Dacita).

Descripción	
Este (m.)	772963
Norte (m.)	9205508
Cota (msnm.)	3163
Parámetros del talud	
Dip (°)	79°
DD (°)	130°
Altura (m.)	9.00
Progresiva	05+000



Foto 12. Roca volcánica Dacita, ubicada en el flanco derecho de la carretera Santa Apolonia – Cumbe Mayo, en la progresiva km 5+000, constituida por tres discontinuidades definiendo medio discontinuo, que conforman el macizo rocoso del talud.

Tabla 48. Valoración del macizo Rocoso del punto de control geotécnico N°6

VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (RMR)							
PARAMETRO	RANGO DE VALORES Y VALORACIONES					Val.	
Resistencia a compresión uniaxial (Mpa)	>250 (15)	250-100 (12)	100-50 (7)	50-25 (4)	<25 (2) <5 (1) <1(0)	7	
<b>RQD (%)</b>  $\lambda = N^\circ \text{ discontinuidades } / \text{ longitud} = 35/6 = 5.83$  $RQD = 100 \times e^{(-0.1\lambda)} \times (0.1\lambda + 1) \quad RQD = 88.37$	90 -100 (20)	75 – 90 (17)	50-75 (13)	25-50 (8)	<25 (3)	17	
Espaciamiento (m)	>2 m (20)	0.6 – 2 m (15)	0.2–0.6 (10)	0.06-0.2 (8)	<0.06 m (5)	10	
<b>Condición de las Juntas</b>	Persistencia	< 1m (6)	1-3 m (4)	3-10 m (2)	10-20m (1)	>20 m (0)	4
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.01 mm (5)	0.1-1.0 mm (4)	1-5 mm (1)	>5mm (0)	4
	Rugosidad	Muy Rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Lisa (1)	Suave (0)	5
	Relleno	Ninguno (6)	Duro < 5mm (4)	Duro >5mm (2)	Suave <5mm (1)	Suave > 5mm (0)	2
	Alteración	Sana (6)	Lig. Alt (5)	Moder. Alt. (3)	Muy Alterada (1)	Descompuesta (0)	5
AGUA SUBTERRANEA	Seco (15)	Ligeramente Húmedo (10)	Húmedo (7)	Goteando (4)	Agua Fluyendo (0)	10	
<b>VALOR TOTAL RMR</b>						<b>64</b>	

<b>INDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICO GSI</b> <b>JUNTAS DE LA MASA ROCOSA</b> (Modificado por Hoek & Marinos, 2000).  A partir de la litología, estructura y la condición de superficie de las discontinuidades, estime el valor promedio de GSI.  No intente ser muy preciso. Escoger un rango de 33 a 37 es más realista de fijar GSI = 35. También notar que esta tabla no se aplica en mecanismos de falla controlado por estructuras. Donde se presenten planos estructuralmente débiles en una orientación desfavorable con respecto a la cara de la excavación, estos dominarán el comportamiento del macizo rocoso.  La resistencia al corte de las superficies en rocas que son propensas a deteriorarse como resultados de cambios en la humedad, se reducirá cuando exista presencia de agua. Cuando se trabaje en rocas de categoría regular a muy mala, puede moverse hacia la derecha para condiciones húmedas. La presión de poros se maneja en un análisis de esfuerzos efectivos.		CONDICIONES SUPERFICIALES				
ESTRUCTURA		MUY BUENA	BUENO	REGULAR	MALA	MALA
		Muy rugoso, Superficies frescas sin meteorización.	Rugoso, ligeramente meteorizadas, superficies con óxidos.	Lizas, moderadamente meteorizadas y superficies alteradas.	Espejo de falla, altamente meteorizadas con recubrimientos compacto o rellenos o fragmentos.	Espejo de falla, superficies altamente meteorizadas con recubrimientos de arcilla suave o rellenos.
		DISMINUYE CALIDAD DE SUPERFICIE				
Intacta o Masivo: Especimen de roca intacta o masivo in situ con pocas discontinuidades ampliamente espaciadas.	Levemente fracturado: Macizo no disturbado, muy bien entrelazado, constituido por bloques cúbicos formados por tres familias de discontinuidades.	90	80			
Moderadamente fracturado: Entrelazado macizo rocoso parcialmente disturbado con bloques angulosos de varias caras formado por 4 o más familias de discontinuidades.	Muy fracturado/Disturbado/Agrietada: Foliada con bloques angulosos formados por la intersección de muchas familias de discontinuidades. Persistencia de planos de estratificación o esquistocidad.		70	60		
Desintegrado: Pobremente entrelazado, macizo altamente fracturado compuesto de una mezcla de pedazos de rocas angulosas y redondeadas.	Foliado/Laminado/Cizallado: Falta formación de bloques debido al pequeño espaciamiento o esquistocidad débil o planos de corte.			50	40	
					30	
					20	
		N/A	N/A			10

GSI  
59

Figura 69. Sistema de clasificación de Hoek-Brown, el macizo rocoso presenta GSI 59.

Aplicando el programa RocData, se obtuvo las propiedades de resistencia de la masa rocosa, referidas a la compresión y tracción; en la en función de la gráfica  $\sigma_1$  vs.  $\sigma_3$ , se obtuvo la envolvente de falla, obteniendo tres parámetros de corte: tracción, compresión uniaxial y compresión triaxial; así mismo las constantes elásticas de la matriz rocosa se muestran en la siguiente figura, de los criterios equivalencia de áreas. En cambio, la gráfica  $\sigma_n$  vs.  $\sigma_t$ , se obtuvo la envolvente de falla de Mohr & Coulomb, congruente con la fractura de falla por corte al alcanzar la resistencia pico del material rocoso.

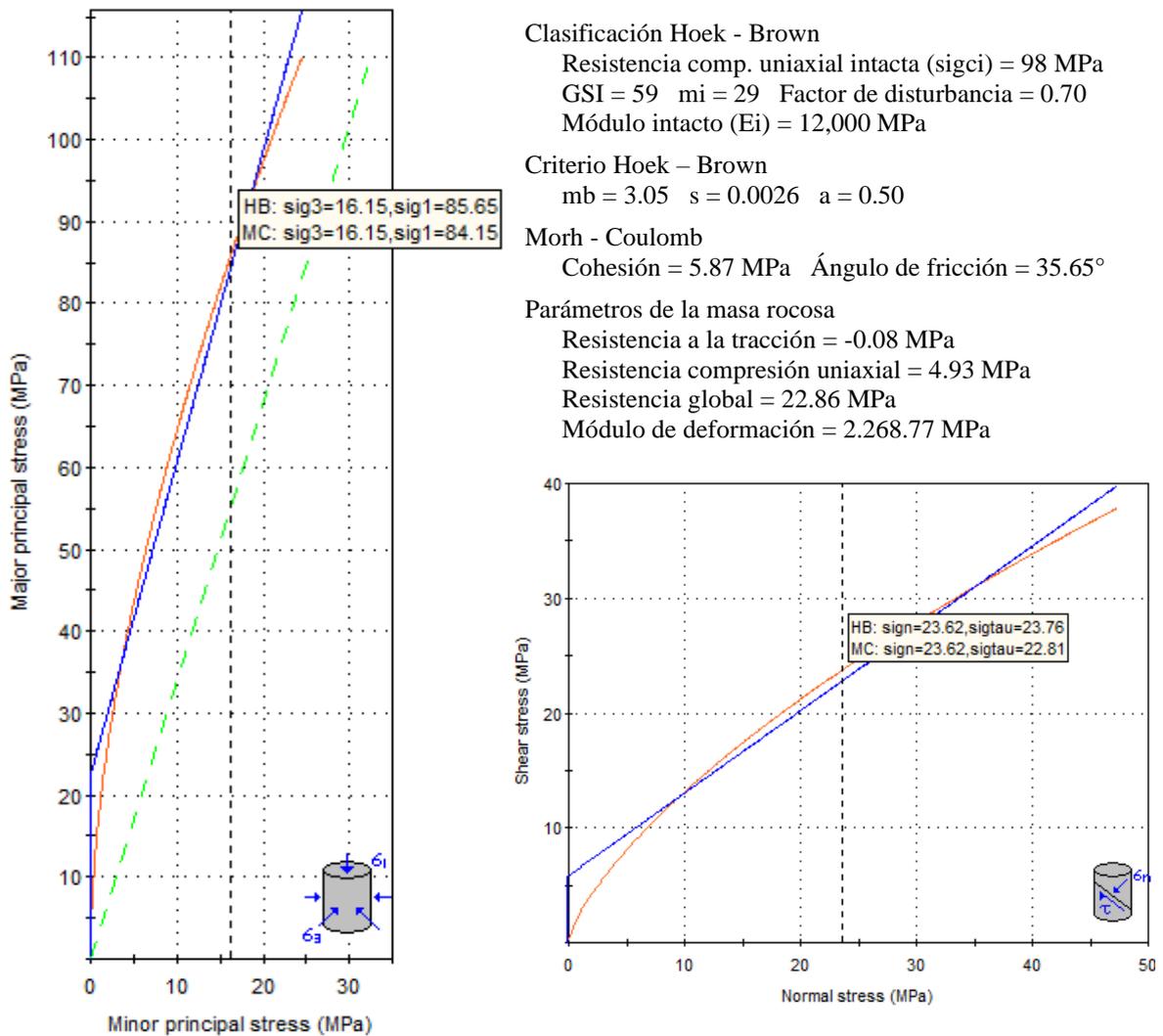


Figura 70. Método equivalencia de áreas – RocData, en función de esfuerzo principales: Mayor vs. Menor (H-B) y esfuerzo: Corte y normal (M-C), PC-06.

Tabla 49. Parámetros de entrada y salida del RocData en la progresiva Km 5+000 (PC-06)

PARÁMETROS DE ENTRADA (Clasificación de Hook— Brown)		PARÁMETROS DE SALIDA		
$\sigma_{ci}$ ( $\sigma$ )	98 Mpa	CRITERIO DE HOOK-BROWN	$m_b$	3.05
GSI	59		$s$	0.0026
$M_i$	29		$a$	0.50
D	0.70		$c$	5.87 Mpa
$E_i$	12.00 Mpa		$\phi$	35.65
		PÁRAMETROS DEL MACIZO ROCOSO	$\sigma_{gt}$	-0.08 Mpa
			$\sigma_{gc}$	4.93 Mpa
			$\sigma_{gcm}$	22.86 Mpa
			$E_{rm}$	2.26 Mpa

➤ **Diseño en el Software Dips v7.0**

Para realizar el análisis cinemático del Talud del punto de control PC-06, se utilizó el software Dips v7.0 teniendo en cuenta la data obtenida de discontinuidades obtenidas en campo.

En la figura N°71 se aprecia: (a) Diagrama de Roseta de diaclasas, (b) Diagrama de Polos.

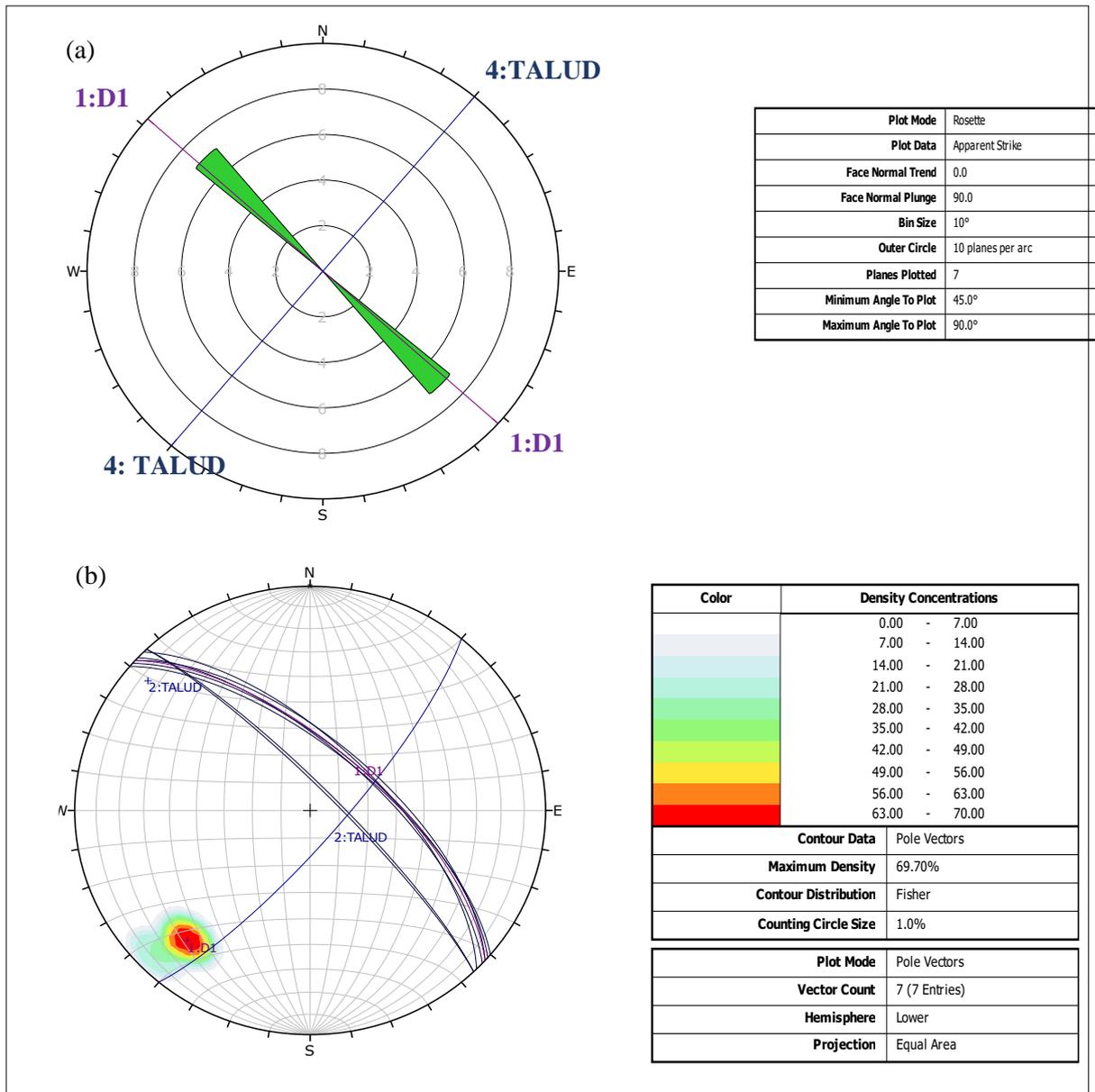


Figura 71. Análisis de discontinuidades del PC-02, usando software Dips. (a) Análisis de tendencias principales con gráfico de rosetas. (b) Análisis de familias principales y de los planos.

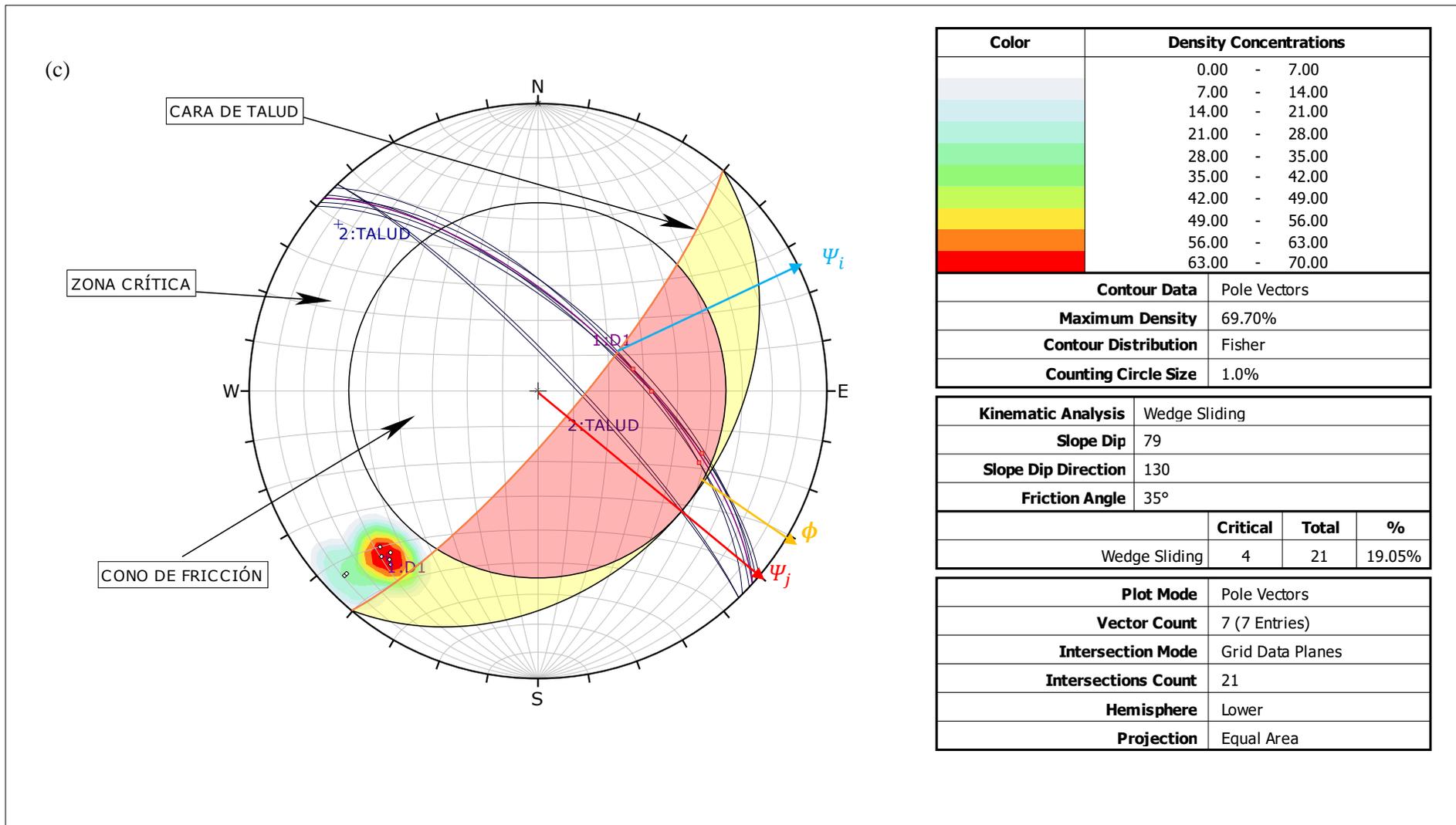


Figura 72.(c) Análisis Cinemático del PC-06, presenta rotura en cuña 19.05%.

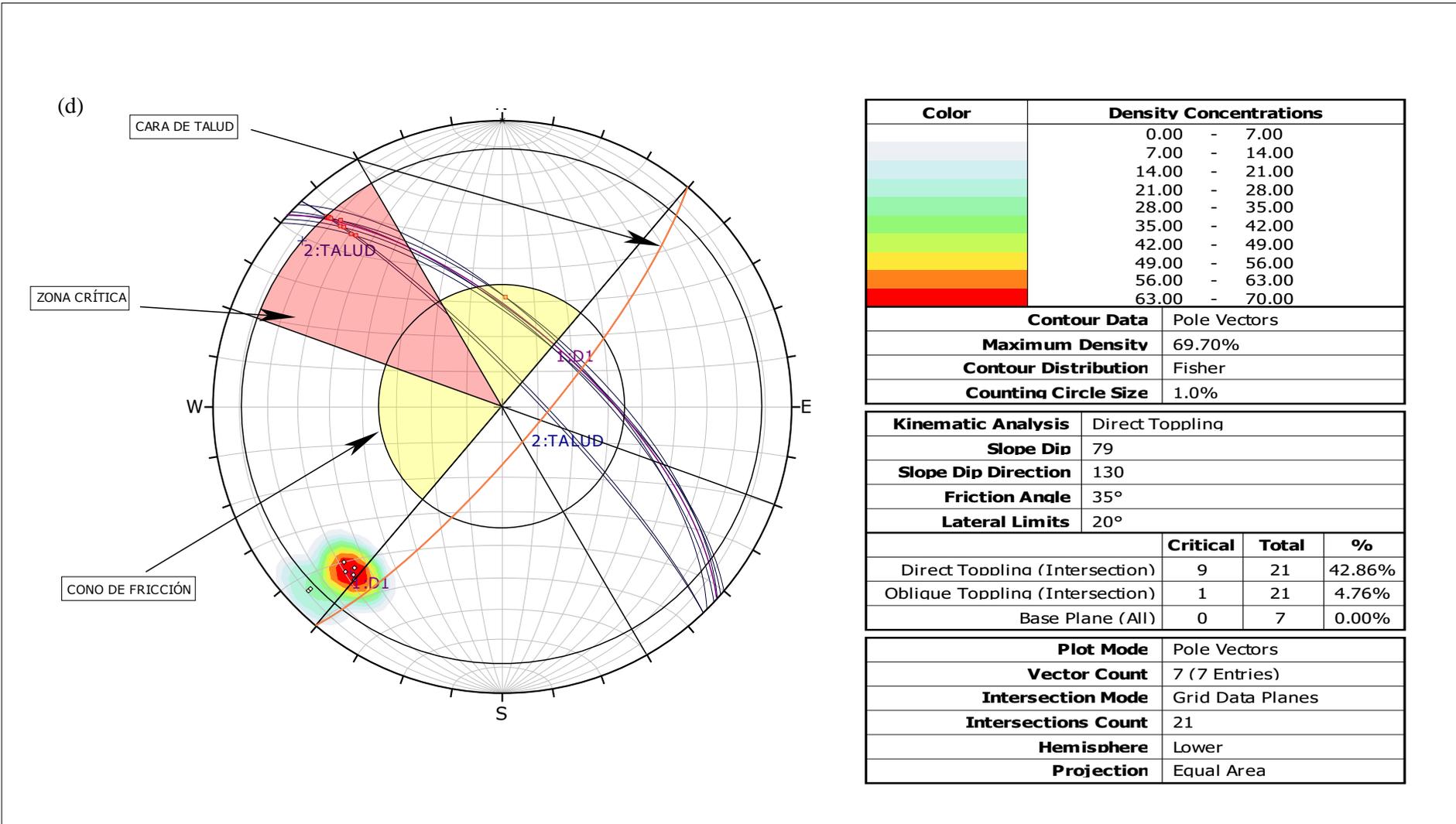


Figura 73. (d) Análisis Cinemático del PC-06, rotura por vuelco directo 42,86%.

➤ **Cálculo del Factor de Seguridad (FS) mediante El Software - Slide v6.0**

Para el cálculo del FS de la estación PC-06, se usó los tres métodos: Bishop Simplificado, Janbu Simplificado y Gle/Morgenstern-Price. El resultado del Análisis se muestra en la Tabla N°50, donde se determina que el Talud de la estación PC-06 es estable con los 3 métodos; en condiciones normales y en condiciones efectivas más sismicidad.

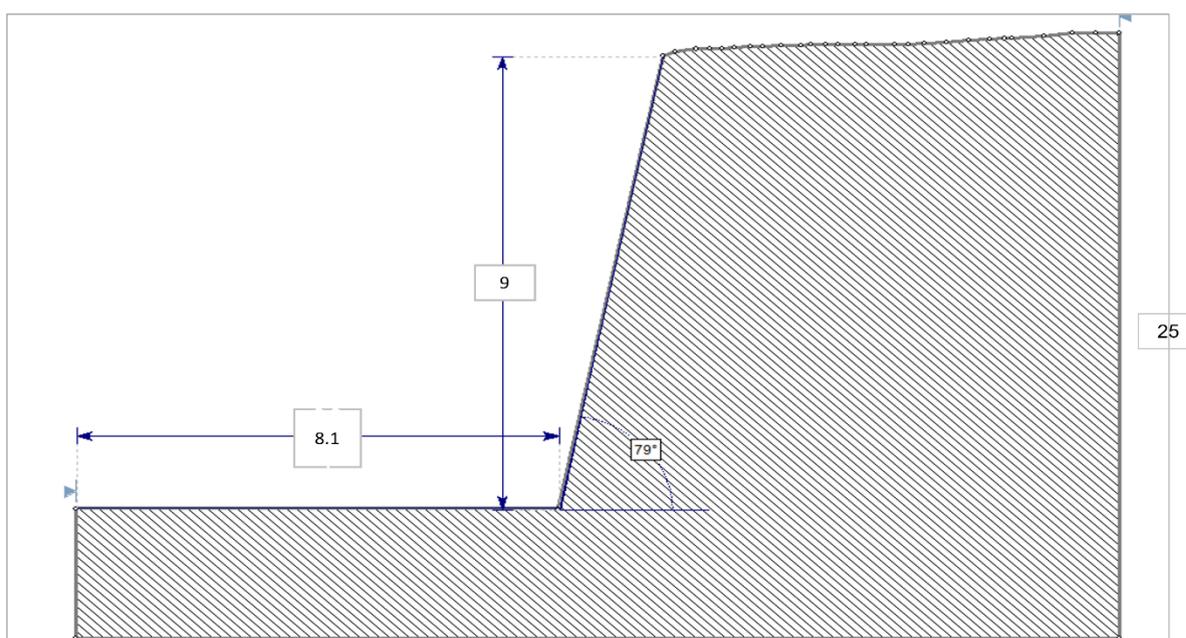


Figura 74. Estación PC-06, dimensiones del Talud.

Tabla 50. Factor de Seguridad en el PC-04 según los diversos métodos

MÉTODOS	CONDICIONES	FS	TALUD
<b>Bishop simplificado</b>	Condiciones de Tensiones Totales	2.074	Estable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	1.186	Estable
<b>Janbu Simplificado</b>	Condiciones de Tensiones Totales	2.108	Estable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	1.427	Estable
<b>Gle/Morgenstern-Price</b>	Condiciones de Tensiones Totales	2.136	Estable
	Tensiones Efectivas + Sismicidad	1.492	Estable

## Tensiones Totales

### *Método de Equilibrio de Momentos (Bishop Simplificado)*

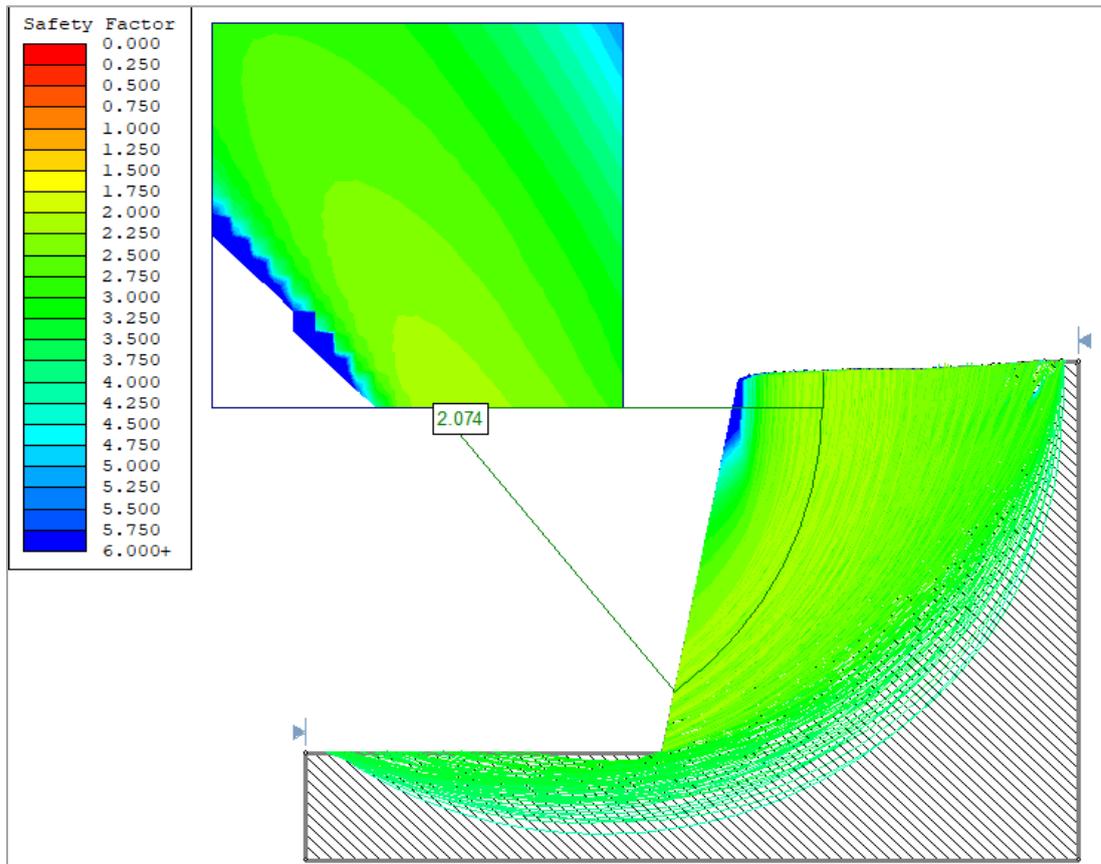


Figura 75. Factor de seguridad PC-06 por método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

*Método de Equilibrio de Fuerzas (Janbu Simplificado)*

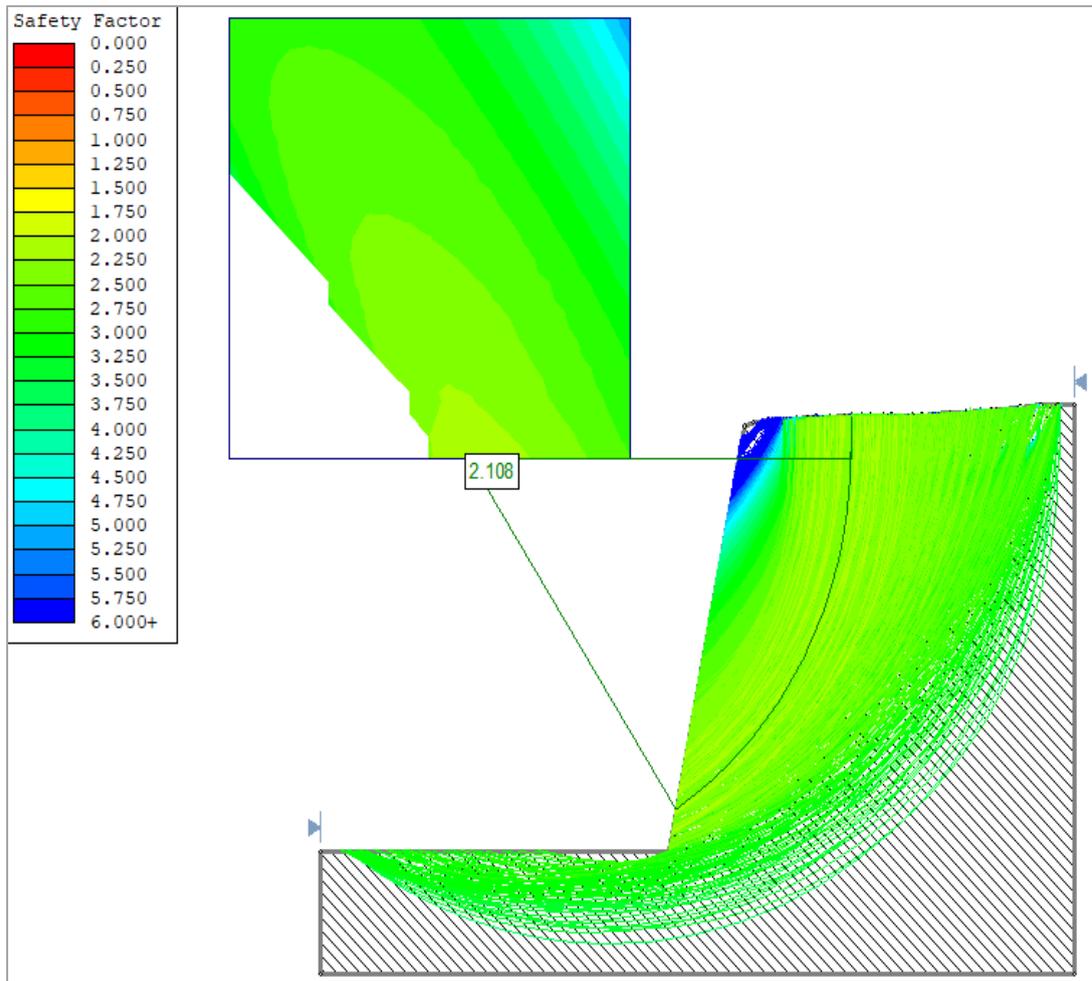


Figura 76. Factor de seguridad PC-06 por método de Janbu simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

*Método de Equilibrio de Fuerzas y Momentos (Morgenstern y Price)*

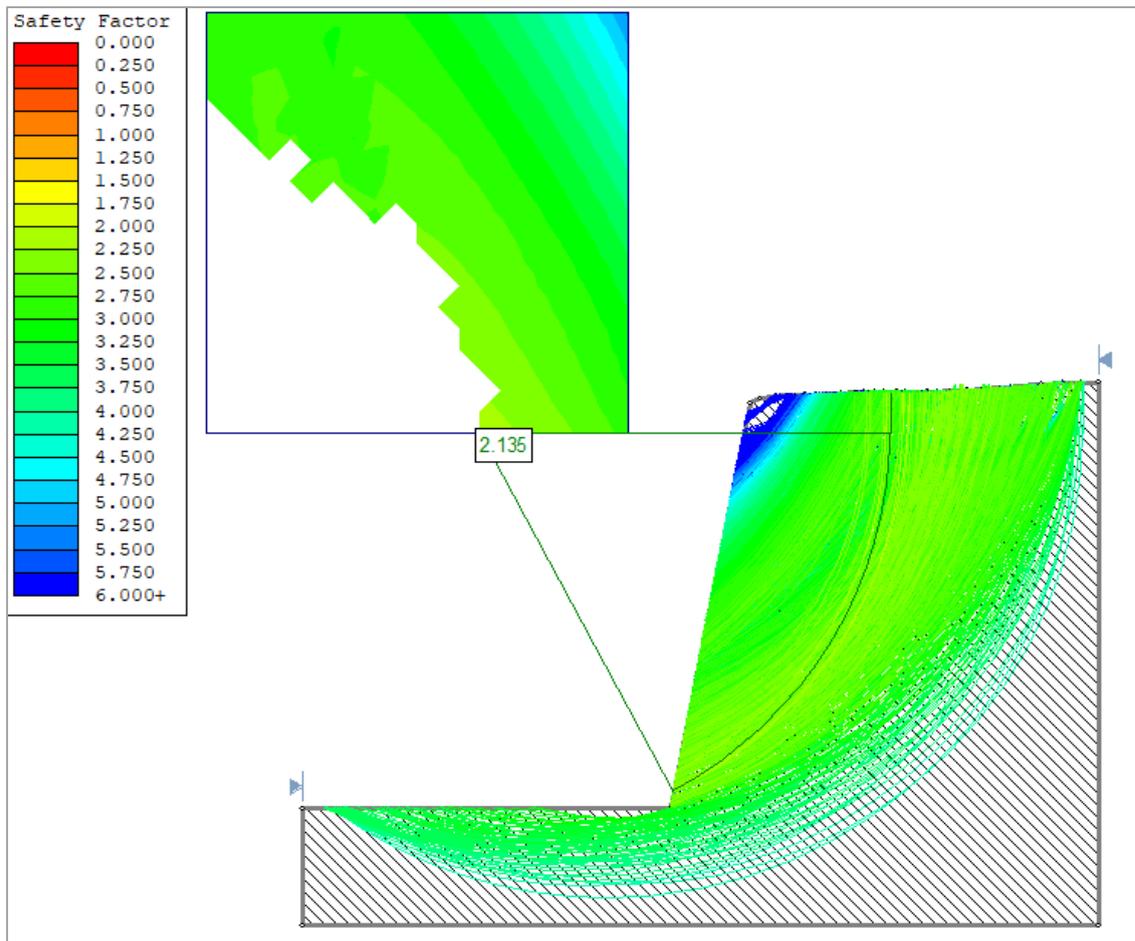


Figura 77. Factor de seguridad PC-06 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Totales.

## TENSIONES EFECTIVAS MÁS SISMICIDAD

### *Método de Equilibrio de Momentos (Bishop Simplificado)*

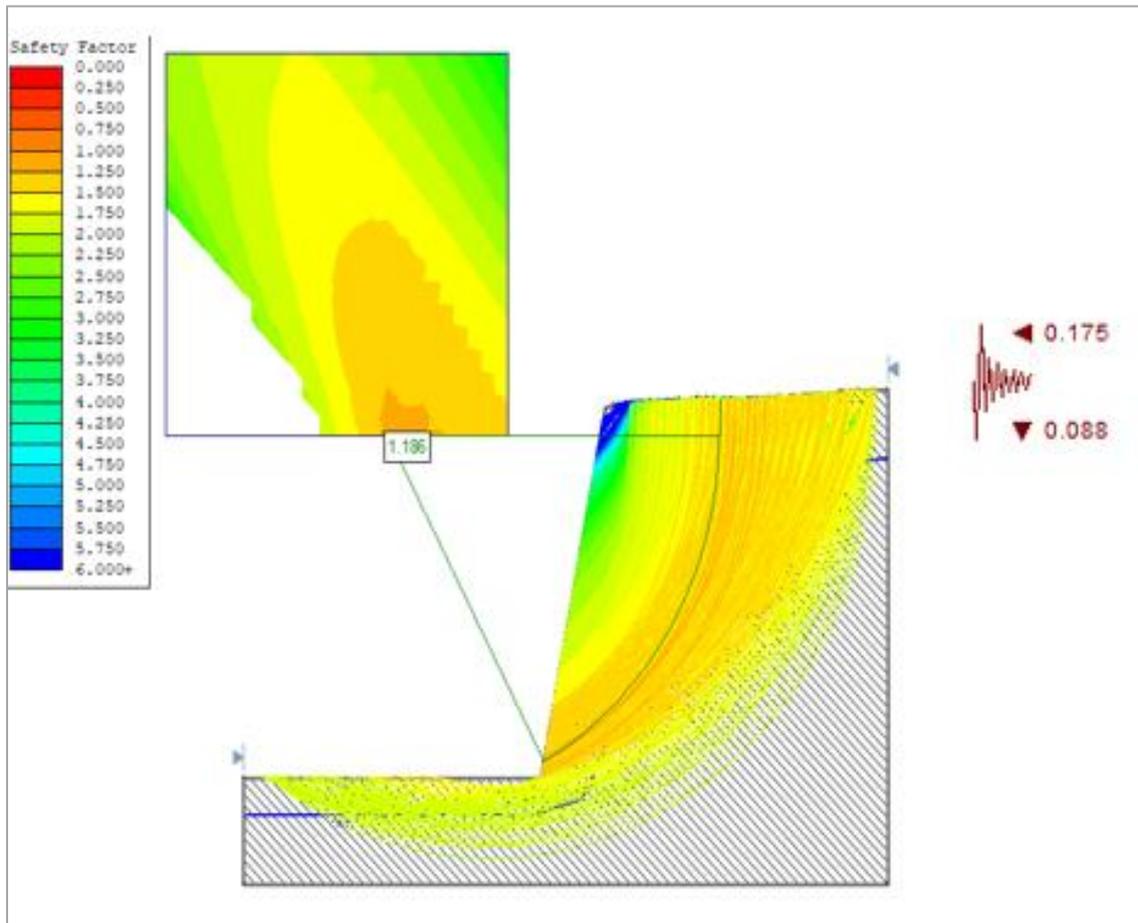


Figura 78. Factor de seguridad PC-06 por método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

*Método de Equilibrio de Fuerzas (Jambu Simplificado)*

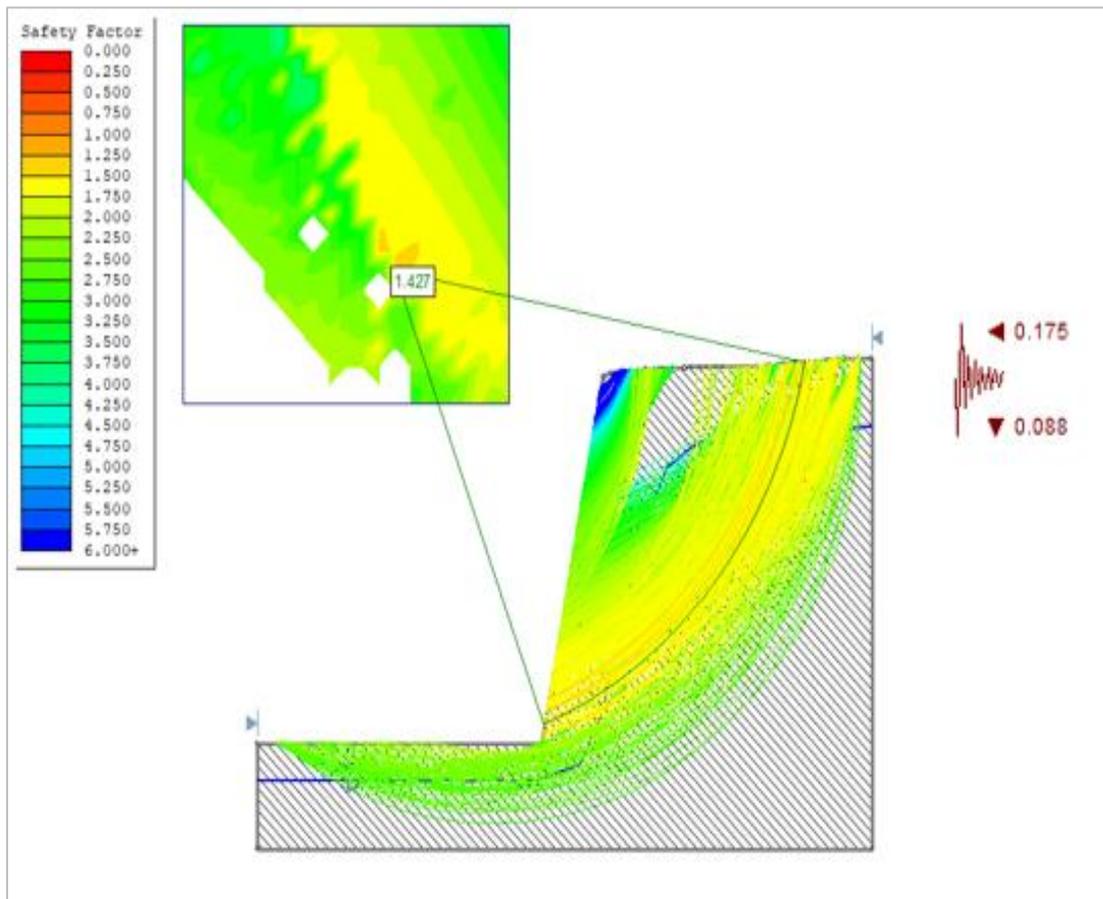


Figura 79. Factor de seguridad PC-06 por método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.

*Método de Equilibrio de Fuerzas y Momentos (Morgenstern y Price)*

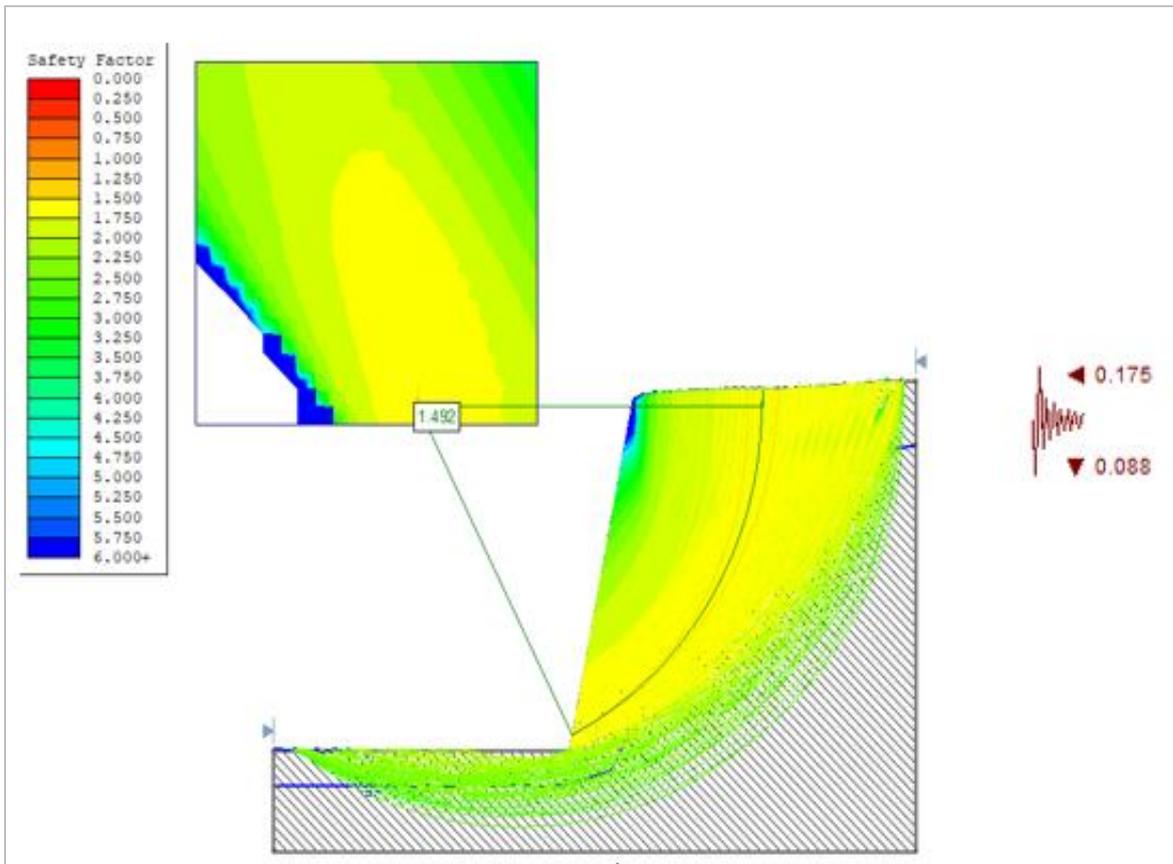


Figura 80. Factor de seguridad PC-06 por método de Gle/Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad

➤ **Determinación de Sismicidad**

Para la determinación de los parámetros de sismicidad, según la Norma Técnica E030 el área de investigación pertenece a la Zona sísmo resistente 3, insertada en el Software Loadcap es la Zona 4 de la Normativa italiana NTC 2008 para ello con una aceleración sísmica máxima de 0.35, con coeficiente de aceleración máxima horizontal de 0.236 y coeficiente máximo vertical de 0.118 para rocas y para suelos presenta la misma aceleración máxima, pero sus coeficientes de sismicidad difieren, por lo que el coeficiente de aceleración máxima horizontal es 0.219 y coeficiente máximo vertical es 0.11.

Tabla 51. Determinación de coeficientes sísmicos para suelos y rocas.

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

Fuente: Eurocódigo EN 1998-5, 8, Parte 1, 5, Anexo A (2004).

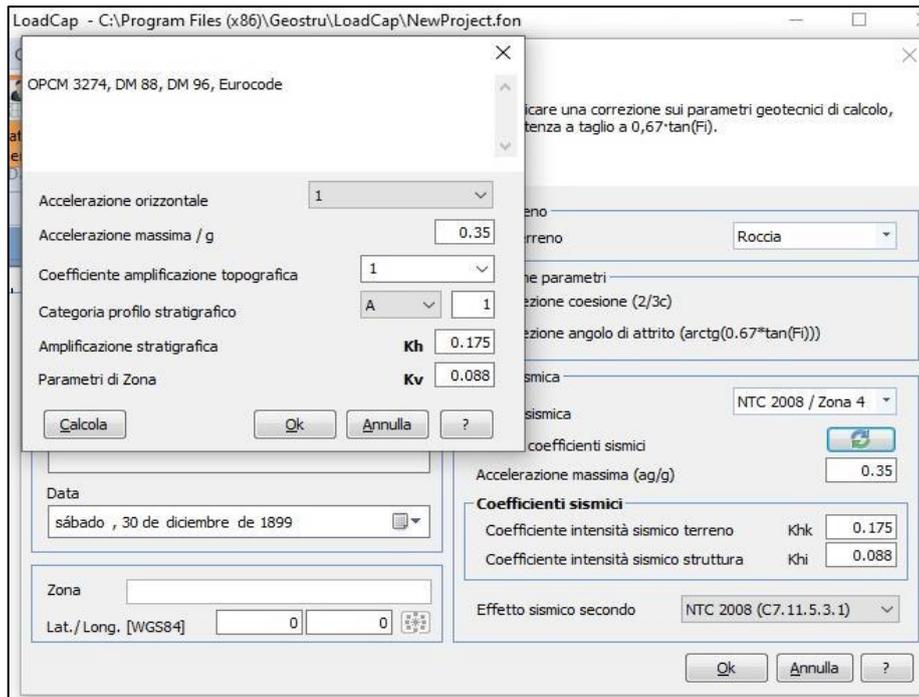


Figura 81. Determinación de Coeficientes de Sismicidad para rocas en el Loadcap.

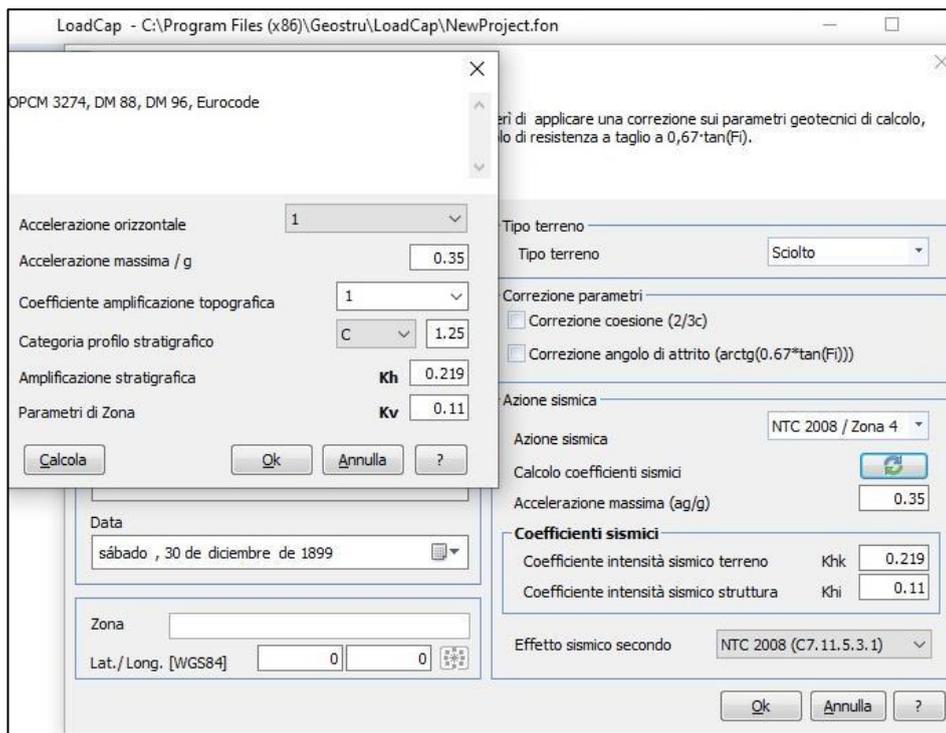


Figura 82. Determinación de Coeficiente de Sismicidad para suelos en el Loadcap.

## CAPITULO IV ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para el análisis del comportamiento geotécnico se realizó 6 puntos de control en el eje de carretera, en donde se determinó las características geomecánicas del suelo o roca, teniendo en cuenta la geometría del terreno, las muestras obtenidas en campo y los ensayos en laboratorio, se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 52. Resultados de la caracterización geotécnica en los puntos de control

Punto de Control	Este	Norte	Cota	Progresiva	Caracterización Geotécnica	Clasificación
PC-01	9206633	773149	3057	Km 2+000	Suelo	C1(M1): SM/A-2-4 (0) C1(M2):GM/A-2-7(0)
PC-02	9206220	772571	3071	Km 2+800	Talud	TIPO III (RMR 57)
PC-03	9206060	772090	3115	Km 3+550	Suelo	C2(M1): SW/A-1-b C2(M2): SW-SM)/A-2-4(0)
PC-04	9205914	772707	3119	Km 4+200	Talud	TIPO III (RMR 55)
PC-05	9205720	773105	3171	Km 4+920	Suelo	C3(M1) GP-GM/A-2-4 (0) C3(M2): SM A-2-6
PC-06	9205508	772963	3163	Km 5+000	Talud	TIPO II (RMR 64)

### 4.1 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

Para determinar los parámetros geotécnicos del volcánico Rumiorco, en cuanto a la caracterización geotécnica de suelos se empleó los ensayos de laboratorio para determinar las características del suelo tales como: Análisis granulométrico por tamizado, contenido de humedad, límites de atterberg, y la clasificación SUCS Y AASHTO, para los asentamientos debido a la sobrecarga e infiltración se utilizó el programa Geo 5, por otro lado, para rocas se utilizó el RMR, RQD y GSI, para su modelo numérico se empleó el Software RockData, los criterios de rotura fueron determinados por el Dips versión 7.00, con el uso del software Loadcap se determinó el coeficiente horizontal (kh) y (kv) y ambos coeficientes lo insertamos en el software slide versión 6.00 para determinar sismicidad, en el mismo programa se determinó las tensiones totales y efectivas, dónde se obtuvo los siguientes resultados.

Tabla 53. Parámetros Geotécnicos en la progresiva km 2+000 (PC-01)

PUNTO DE CONTROL 01 (PC-01) – PROGRESIVA Km 2+000 CALICATA 1 (PARÁMETROS GEOTÉCNICO EN SUELOS)							
SUCS	AASHTO	C'	$\phi'$	EXPANSIVIDAD	ASENTAMIE NTO	Kh	Kv
C1/M1: SM C1/M2: GM	M1: A-2-4 (0) M2: A-2-7(0)	0.02MPa 1Mpa	34 32	BAJA	TOLERABLE	0.219	0.11

Tabla 54. Parámetros Geotécnicos en la progresiva km 2+800 (PC-02)

PUNTO DE CONTROL 02 (PC-02) – PROGRESIVA Km2+800 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS EN ROCA							
$\sigma_{ci}$	GSI	C'	$\phi'$	FS	ROTURA	Kh	Kv
195Mpa	70	17.03Mpa	44.72	4.78	VUELCO/CUÑA	0.175	0.088

Tabla 55. Parámetros Geotécnicos en la progresiva km 3+550 (PC-03)

PUNTO DE CONTROL 03 (PC-03) – PROGRESIVA Km 3+550 CALICATA 2 (PARÁMETROS GEOTÉCNICO EN SUELOS)							
SUCS	AASHTO	C'	$\phi'$	EXPANSIVIDAD	ASENTAMIENTO	Kh	Kv
C2/M1: SW C2/M2: SW- SM	M1: A-1-b M2: A-2-4 (0)	0.35MPa 0.50Mpa	32 30	NO PRESENTA BAJA	TOLERABLE	0.219	0.11

Tabla 56. Parámetros Geotécnicos en la progresiva km 4+200 (PC-04)

PUNTO DE CONTROL 04 (PC-04) – PROGRESIVA Km 4+200 ANÁLISIS GEOTÉCNICO EN ROCA							
$\sigma_{ci}$	GSI	C'	$\phi'$	FS	ROTURA	Kh	Kv
178MP a	68	12MPa	39.27	2.29	VUELCO	0.175	0.088

Tabla 57. Parámetros Geotécnicos en la progresiva km 4+920 (PC-05)

PUNTO DE CONTROL 05 (PC-05) – PROGRESIVA Km 4+920 CALICATA 3 (PARÁMETROS GEOTÉCNICOS EN ROCA)							
SUCS	AASHTO	C'	$\phi'$	EXPANSIVIDAD	ASENTAMIENTO	Kh	Kv
C3/M1: GP-GM C3/M2:SM	M1: A-2-4 (0) M2: A-2-6	1MPa 1MPa	32 30	BAJA	TOLERABLE	0.219	0.11

Tabla 58. Parámetros Geotécnicos en la progresiva km 5+000 (PC-06)

PUNTO DE CONTROL 06 (PC-06) – PROGRESIVA Km 5+000 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS EN ROCA							
$\sigma_{ci}$	GSI	C'	$\phi'$	FS	ROTURA	Kh	Kv
215Mpa	74	20.55Mpa	45.90	1.37	VUELCO/CUÑA	0.175	0.088

#### 4.1.1 Parámetros Geotécnicos en Suelos

El análisis de las propiedades físico-químicas de los suelos se realizó a través ensayos de laboratorio, los cuales son: análisis granulométrico por tamizado, contenido de humedad, límite líquido, límite plástico, Sistema de clasificación SUCS y AASHTO.

Los resultados de las muestras en las tres calicatas ejecutadas, se muestran a continuación.

Tabla 59. Resultados de las muestras en la calicata 1

<b>RESULTADO DE LA MUESTRAS DE ENSAYO EN LA CALICATA 1 (C-1)</b>		
	<b>M1 (SM)</b>	<b>M2 (GM)</b>
Progresiva		km 2+000
Coordenadas	N: 9206633 E: 773149	
Porc. De Grava	37.0%	38.8%
Porc. De Arena	48.8%	34.9%
Porc. De Finos	14.1%	26.4%
Límite Líquido	38.1%	44.8%
Límite Plástico	31.4%	32.8%
Índice Plástico	6.7%	12.0%
Contenido de Humedad	11.6%	14,5%

Tabla 60. Resultados de las muestras en la calicata 2

<b>RESULTADOS DE LA MUESTRAS DE ENSAYO EN LA CALICATA 1 (C-2)</b>		
	<b>M1 (SW)</b>	<b>M2 (SW-GM)</b>
Progresiva		km 3+550
Coordenadas	N: 9206633 E: 772090	
Porc. De Grava	35.5%	25.0
Porc. De Arena	60.1%	65.2
Porc. De Finos	4.5%	9.9
Límite Líquido	NP	38.4
Límite Plástico	NP	30.2
Índice Plástico	NP	8.2
Contenido de Humedad	14,6%	15,2 %

Tabla 61.Resultados de las muestras en la calicata 3

<b>RESULTADOS DE MUESTRAS DE ENSAYO EN LA CALICATA 3 (C-3)</b>		
	<b>M1 (GP-GM)</b>	<b>M2 (SM)</b>
Progresiva		km 4+920
Coordenadas	N: 773105 E: 9205720	
Porc. De Grava	71.8%	42.3%
Porc. De Arena	20.6%	44.2%
Porc. De Finos	7.6%	13.5%
Límite Líquido	33.6%	38.0%
Límite Plástico	23.8%	27.5%
Índice Plástico	9.8%	10.5%
Contenido de Humedad	16.7%	18,5%

○ ***Parámetro de Expansión***

Considerando lo expuesto por Vásquez (2018), es decir, tomando como referencia la tabla N° 15 clasificación de suelos expansivos, para evaluar el potencial de expansividad de suelos en función al índice plástico y límite líquido y con los datos obtenidos en laboratorio de las seis muestras , se puede determinar que son suelos de potencial de expansión bajo ya que su índice de plasticidad es menor a 18 y su límite líquido es mayor a 15 incluso en la muestra N°3 no presenta ni límite líquido , ni índice de plasticidad, por lo que es un suelo no expansivo.

La muestra 1 (M1) de la Calicata N°1, posee un índice de plasticidad de 6,7% y 38,1% en cuanto a índice de plasticidad, por lo cual según el intervalo descrito líneas arriba es un suelo con potencial de expansión bajo.

La muestra 2 (M2) de Calicata N°1, posee un índice de plasticidad de 12% y 44,8% en cuanto a índice de plasticidad, considerando estos parámetros es un suelo con potencial de expansión bajo.

La muestra 1 (M1) de la Calicata N°2, no presenta un índice de plasticidad, ni límite líquido por lo que son considerados como suelos no expansivos.

La muestra 2 (M2) de Calicata N°2, posee un índice de plasticidad de 38.4% y 8,2% en cuanto a índice de plasticidad, según la clasificación es un suelo con potencial de expansión bajo.

La muestra 1(M1) de la Calicata N°3, posee un índice de plasticidad de 33,6% y 9,8% en cuanto a índice de plasticidad, considerando estos parámetros es un suelo con potencial de expansión bajo.

La muestra 2 (M2) de Calicata N°3, posee un índice de plasticidad de 38% y 10,5% en cuanto a índice de plasticidad, según clasificación es un suelo con potencial de expansión bajo.

Tabla 62. Potencial de expansión con las muestras obtenidas de los ensayos de laboratorios

Potencial de expansión	Muestra	Índice de plásticidad	Límite líquido
Bajo	C1(M1)	6,7%	38,1%
Bajo	C1(M2)	12%	32,8
No Presenta	C2(M1)	NP	NP
Bajo	C2(M2)	8,2%	38,4%
Bajo	C3(M1)	9,8%	33,6%
Bajo	C3(M2)	10,5%	38%

○ ***Parámetros de Asentamiento***

Según Henríquez et al., (2020), tomando en cuenta la tabla N°12, es decir los límites tolerables de Asentamiento máximo ( $\rho$ ), en arenas es de 32 mm y el asentamiento diferencial máximo ( $\delta$ ) es de 51mm, y analizando las 6 muestras de las tres calicatas en el software Geo5 en tres escenarios: en estado natural, con sobrecarga y con saturación total y sobrecarga.

Se obtuvieron como resultados del total de todas las muestras, intervalos de asentamientos que varían 2.30 mm a 9.1 mm según las diversas condiciones, por lo que se considera que las muestras presentan un asentamiento Tolerable.

Tabla 63. Parámetros de Asentamientos de las Muestras de las tres Calicatas

<b>Asentamiento en la Calicata N°1 (Progresiva km 2+000)</b>			
<b>Escenarios</b>	<b>Asentamiento máximo (mm)</b>	<b>Profundidad de la zona de influencia (m)</b>	<b>Límite de Asentamiento</b>
<b>En estado Natural</b>	No presenta (NP)	No presenta (NP)	No presenta (NP)
<b>Sobrecarga (60 kN/m<sup>2</sup>)</b>	3.6 mm	5.60 m	Tolerable
<b>Sobrecarga +Saturación (60 kN/m+ 0.25m)</b>	2.8mm	2.9 m	Tolerable
<b>Asentamiento en la Calicata N°2 (Progresiva km 3+550)</b>			
<b>Escenarios</b>	<b>Asentamiento máximo (mm)</b>	<b>Profundidad de la zona de influencia (m)</b>	<b>Límite de Asentamiento</b>
<b>En estado Natural</b>	No presenta (NP)	No presenta (NP)	No presenta (NP)
<b>Sobrecarga (60 kN/m<sup>2</sup>)</b>	9.1 mm	5.71 m	Tolerable
<b>Sobrecarga+Saturación (60 kN/m+ 0.25m)</b>	3.8mm	2.3 m	Tolerable
<b>Asentamiento en la Calicata N°3 (Progresiva km 4+920)</b>			
<b>Escenarios</b>	<b>Asentamiento máximo (mm)</b>	<b>Profundidad de la zona de influencia (m)</b>	<b>Límite de Asentamiento</b>
<b>En estado Natural</b>	No presenta (NP)	No presenta (NP)	No presenta (NP)
<b>Sobrecarga (60 kN/m<sup>2</sup>)</b>	8.7 mm	5.71 m	Tolerable
<b>Sobrecarga+Saturación (60 kN/m+ 0.25m)</b>	3.4 mm	2.30 m	Tolerable

○ **Parámetro de Sismicidad**

Para obtener los parámetros de sismicidad, es decir los coeficientes de sismicidad horizontal ( $kh$ ) y vertical ( $kv$ ); del área de investigación, se realizó a partir del procesamiento el software Loadcap versión 2014, dando como resultado una aceleración sísmica máxima (factor Z) de 0.35, con coeficiente de aceleración máxima horizontal de 0.219 y coeficiente máximo vertical de 0.11, tal como se muestra en la tabla N°64.

Tabla 64. Parámetro de Sismicidad para Rocas

<b>Progresivas</b>	<b>Zona</b>	<b>Factor de zona "Z" (am<sub>áx</sub>/g)</b>	<b>Coefficientes de Sismicidad horizontal (<math>kh</math>) y vertical (<math>kv</math>)</b>	
			<b>kh</b>	<b>kv</b>
<b>Santa Apolonia- Cumbe Mayo (km 2 + 000 - 5 + 000)</b>	3	0.35	0.219	0.11

#### 4.1.2 Parámetros Geotécnicos en Rocas

##### ○ *Análisis Estereográfico – Cinemático*

En cada una de las estaciones se realizó el análisis cinemático mediante proyecciones estereográficas haciendo uso del software Dips v6.0, para determinar las zonas de riesgo de falla de los taludes críticos considerando las discontinuidades y el ángulo de fricción interno de la roca en función del Dips y DD del talud. Se analizó puntualmente para los casos de rotura tipo cuña y rotura por vuelco, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla N°65, donde se demuestra la existencia de riesgo de falla tipo cuña, y por vuelco directo y oblicuo en los 6 puntos de control.

Tabla 65. Resultados del Análisis Estereográfico – Cinemático de los Taludes

TALUD CRÍTICO	TIPO DE ROTURA	PORCENTAJE (%)
<b>PC- 02</b> Progresiva km 2+800	CUÑA	4.55%
	VUELCO DIRECTO	3.03%
	VUELCO OBLICUO	19.07%
<b>PC – 04</b> Progresiva km 4+200	CUÑA	0.0%
	VUELCO DIRECTO	0.0%
	VUELCO OBLICUO	83.33%
<b>PC-06</b> Progresiva km 5+000	CUÑA	19.05%
	VUELCO DIRECTO	42,86%
	VUELCO OBLICUO	4,76%

##### ○ *Sismicidad*

Para obtener los parámetros de sismicidad, es decir los coeficientes de sismicidad horizontal (**kh**) y vertical (**kv**); del área de investigación, se realizó a partir del procesamiento el software Loadcap versión 2014, dando como resultado una aceleración sísmica máxima (factor Z) de 0.35, con coeficiente de aceleración máxima horizontal de 0.236 y coeficiente máximo vertical de 0.118.

Tabla 66. Coeficientes de Sismicidad horizontal y vertical según la zona sísmica.

Progresivas	Zona	Factor de zona "Z" (am <sub>ax</sub> /g)	Coeficientes de Sismicidad horizontal (kh) y vertical (kv)	
			kh	kv
Santa Apolonia- Cumbe Mayo (km 2 + 000 - 5 + 000)	3	0.35	0.236	0.118

○ **Factor de Seguridad - Software Slide V. 7.0**

El cálculo del Factor de Seguridad considerando la data obtenida de los taludes críticos se realizó mediante el software Slide v.6, cuyos métodos a considerar fueron los métodos de Bishop Simplificado, Janbu Simplificado y Gle/Morgenstern Price, determinando Factor de Seguridad para condiciones de tensiones totales o denominadas condiciones normales del terreno, y para condiciones de tensiones efectivas más la sismicidad.

En el área de investigación se presenta abundantes precipitaciones la mayor parte del año, tal como se ve en la Tabla N°22; obteniéndose promedios anuales en el periodo 2020-2024 de 95.7mm, 108.0mm, 116.1mm, 78.1mm y 82.0mm respectivamente , las cuales son las principales causas de inestabilidad geotécnica; por tal motivo se utilizó los cálculos del FS en condiciones de tensiones efectivas.

Para definir las condiciones sísmicas para rocas, se tomó como referencia la norma técnica E.030 Diseño Sismoterrestre – RNE 2016. Donde se muestra que el área de investigación corresponde la zona sísmica 3 con aceleración sísmica máxima de 0.35 y con coeficiente de aceleración máxima horizontal de 0.236 (Kh) y coeficiente de aceleración máximo vertical de 0.118 (Kv), obtenidos con el software LoadCap.

Para el análisis de resultados, se utiliza los rangos de Factores de Seguridad recomendados por Hoek (2007), mostrados en la Tabla N°67.

Tabla 67. Rangos de Factores de Seguridad, recomendados por Hoek, 2007.

<b>FACTOR DE SEGURIDAD</b>	
<b>Inestable</b>	<b>&lt;1.0</b>
<b>Estable relativo</b>	<b>1.0 – 1.3</b>
<b>Estable a corto plazo</b>	<b>1.3 – 1.5</b>
<b>Estable a largo plazo</b>	<b>&gt;1.5</b>

Fuente: Hoek, E. (2007).

Del análisis de los taludes críticos con probabilidad de deslizamiento en cuña y vuelco, fueron analizados por el método de equilibrio límite con el software Slide v6.0, teniendo los siguientes resultados, como se muestra en la tabla N°68.

Tabla 68. Resultados del Factor de seguridad según los Métodos de Equilibrio Límite en los Puntos de Control

PUNTOS DE CONTROL PROGRESIVAS	MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE	CONDICIONES	FS
Progresiva km 2+220 (PC-02)	Bishop simplificado	Tensiones Totales	6.560
		Tensiones Efectivas + Sismicidad	4.854
	Janbu Simplificado	Tensiones Totales	6.742
		Tensiones Efectivas + Sismicidad	4.642
	Gle/Morgenstern-Price	Condiciones de Tensiones Totales	7.069
		Tensiones Efectivas + Sismicidad	4.838
Progresiva km 4+00 (PC-04)	Bishop simplificado	Condiciones de Tensiones Totales	3.628
		Tensiones Efectivas + Sismicidad	2.422
	Janbu Simplificado	Condiciones de Tensiones Totales	3.740
		Tensiones Efectivas + Sismicidad	2.192
	Gle/Morgenstern-Price	Condiciones de Tensiones Totales	3.892
		Tensiones Efectivas + Sismicidad	2.248
Progresiva km 5+ 000 (PC-06)	Bishop simplificado	Condiciones de Tensiones Totales	2.074
		Tensiones Efectivas + Sismicidad	1.186
	Janbu Simplificado	Condiciones de Tensiones Totales	2.108
		Tensiones Efectivas + Sismicidad	1.427
	Gle/Morgenstern-Price	Condiciones de Tensiones Totales	2.136
		Tensiones Efectivas + Sismicidad	1.492

## **4.2 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS**

La hipótesis de investigación se contrasta según los resultados obtenidos, el comportamiento geotécnico de suelos y rocas en Volcánico Rumiorco en las progresivas Km 2+000 al Km 5+000; presentan una probable inestabilidad geotécnica, debido a las sobrecargas por el peso vehicular y la sismicidad, los cuales originan cambios en la resistencia del volcánico y la capacidad portante, además del asentamiento y expansión en los suelos, por otro lado, en las rocas, a pesar que presentan en su gran mayoría roca de calidad regular, los factores geométricos y los parámetros geomecánicos, están afectados por la precipitación e infiltración de aguas pluviales y la sismicidad de la zona; lo que genera en los taludes deslizamientos por vuelco y cuña, demostrándose de esa manera que los suelos y rocas pueden presentar inestabilidad geotécnica de mediano a largo plazo.

## **CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1 CONCLUSIONES**

Se determinó que el comportamiento geotécnico del Volcánico Rumiorco del Km 2+000 al Km 5+000 de la carretera Santa Apolonia - Cumbe Mayo, Cajamarca, está ligado a las características y propiedades geomecánicas de las rocas y suelos, los cuales presentan estabilidad y asentamientos tolerables.

Se realizó el cartografiado geológico y geotécnico, en base a ello, se ejecutó el muestreo geotécnico del terreno de fundación de la carretera en puntos de control con características geotécnicas más desfavorables.

Se realizó la caracterización geomecánica de las rocas existentes, presentando una calidad de roca: Tipo II y Tipo III (calidad buena y regular respectivamente) que varían en el rango de 55 – 64, según RMR 89.

Se obtuvo seis muestras de tres calicatas, teniendo como resultado, según la clasificación SUCS y AASHTO, en la calicata uno, C1(M1): SM/A-2-4(0) y C1(M2): GM/A-2-7(0); en la calicata dos, C2(M1): SW/A-1-b y C2(M2): SW-SM /A-2-4(0) y en la calicata tres, C3(M1): GP-GM/A-2-4(0) y C3(M2): SM A-2-6 respectivamente.

Se analizó las propiedades mecánicas de suelos, a través de los ensayos de laboratorio, obteniendo suelos granulares con moderada cohesión.

Se determinaron los parámetros geotécnicos del volcánico Rumiorco, mediante la caracterización geomecánica de rocas y suelos, análisis de laboratorio y el uso de diversos softwares, obteniéndose taludes estables, suelos de baja expansividad y asentamientos tolerables.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

A las autoridades distritales, provinciales y regionales de Cajamarca, realizar ensayos triaxiales para obtener mayor precisión en las propiedades geomecánicas de los macizos rocosos, ya que, las pruebas de resistencia cuantitativas realizadas en campo generan inevitablemente margen de error.

Al Ministerio de Transporte y Comunicaciones, implementar un estudio de suelos a mayor detalle, como carga puntual, corte directo y capacidad portante en la carretera en estudio, para complementar la información adquirida.

A la Municipalidad Provincial de Cajamarca, realizar ensayos de SPT, para evaluar la densidad relativa de los suelos granulares y ensayos Lefranc, para determinar la permeabilidad, para que de esta manera se diseñe sistema de drenajes y se pueda prevenir fallas por saturación de terreno.

A futuras investigaciones, incorporar ensayos geofísicos, como sísmica de refracción, para mejorar los modelos de predicción del comportamiento geotécnica sin la necesidad de excavaciones.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, J., y Apaza, J. (2022). Capacidad portante del suelo para la zonificación y análisis de cimentaciones superficiales en Cochas Grande – Sector Lagunillas. Huancayo.Perú.
- Aguilera, M., y Herrera, J. (2007). Sensoramiento Remoto Satelital. Cartagena de Indias. Colombia.
- Beltrán, R. (2009). Diseño geotécnico y estructural de una cimentación en arcilla expansiva. México.
- Betancur, M., Granda, A., y Ramirez, J. (2015). Relación de la precipitación y la escorrentía en dos taludes compuestos por suelos derivados de cenizas volcánicas, y su influencia en deslizamientos superficiales. Pereira, Colombia.
- Bosch, M. (2017). Análisis de variabilidad de algunos parámetros geotécnicos de suelos. Madrid, España.
- Bowles, J. (1997). Foundation Analysis and Design. 5th Edition McGraw-Hill International.
- Braja.M.Das. (2013). Fundamentos de ingeniería geotécnica. México: CENGAGE LEARNING.
- Calderón, Y. (2022). Estudio del comportamiento esfuerzo-deformación de los suelos arcillosos en zonas tropicales en relación con su génesis en tres zonas Piloto Colombia.
- Campeche. (2015). Diseño eólico y sísmico.
- Carrillo, P., Ruíz, V., y Zapata, R. (2009). Asentamientos en suelos arcillosos en casos en que los criterios 1-D y consolidación primaria no son suficientes. Universidad de Chile. Chile. Chile.
- Chereque, W. (2003). Hidrología para estudiantes de Ingeniería Civil.Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú: CONCYTEC.
- Cobos, M., Ortegón, C., y Peralta, J. (2019). Caracterización del comportamiento geotécnico de suelos de origen volcánico estabilizados con cenizas provenientes de cáscara de coco y cisco de café. Ibagué,Colombia.
- Colmenares, J., Jaramillo, M., Rave, D., y Rubio, G. (2020). Estudio sobre los parámetros de sensibilidad y compresibilidad de suelos. Colombia.
- Conde, M. (2013). Caracterización Geotécnica de materiales volcánicos de baja densidad. Madrid, España.

- Contreras, J. (2015). Análisis comparativo de cuatro modelos de evapotranspiración de referencia en la Microcuenca Del Río Quinuas. Cuenca, Ecuador.
- Cuestas, I., y Mejía, C. (2019). Análisis de la infiltración, escorrentía sub superficial y tendencia direccional del movimiento del agua entre estratos de suelos del AMSS. San Salvador.
- Díaz, J. (2018). Envoltante de ruptura al corte de suelos no saturados a partir de ensayos simples. Medellín.Colombia.
- Duque, G., y Escobar, C. (2016). Origen, Formación y Constitución del Suelo, Físicoquímica de las arcillas.
- Gómez, C. (2018). Comportamiento geotécnico de suelos arcillosos compactados,respuestas a cargas estáticas y dinámicas. Madrid,España.
- González, C. (2012). Propiedades geomecánicas de dos suelos de origen volcánico. Santiago de Chile.
- González, L. (2022). Comportamiento geotécnico de suelos y rocas para cimentación de las torres T-246 A T-260 ,Línea de Transmisión Paquillusi – Onoccora Provincia de Sicuani – Departamento Cusco.
- González de Vallejo, L. (2004). Ingeniería Geológica. Madrid, España: PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
- Guedes, R., Quispe, R., Ancajima, A., Mogollón, S., y Campos, K. (2021). Análisis y aplicabilidad en el mercado peruano de los métodos más usados y las nuevas metodologías en el cálculo de asentamientos de zapatas en arcillas. Lima.Perú.
- Henríque, A ; Pedrals, A; Valdés, P. (2020). Casos de Asenytamientos Inadmisibles en Suelos Finos. Chile.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista Lucio, P. (2014). Metodología la Investigación. México D.F: Mcgraw-Hill / Interamericana Editores, S.A.
- Herrera, M. (2006). Suelos derivados de Cenizas Volcánicas en Colombia: Estudio Fundamental e implicación en Ingeniería. Bogotá, Colombia.
- Hoek, E., y Brown, E. (2018). The HoekBrown failure criterion and GSI e 2018 edition. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.
- INGEMMET. (2020). Evaluación de peligros geológicos en la quebrada Calispuquio. Lima,Perú: Dirección de Geología Ambiental y Riesgo.
- Jiménez, A., y Paz, N. (2020). Determinación de la capacidad de portante admisible del suelo para cimentacipnes superficiales en la habilitación urbana la Colina,del distrito de Tarapoto,San Martín.

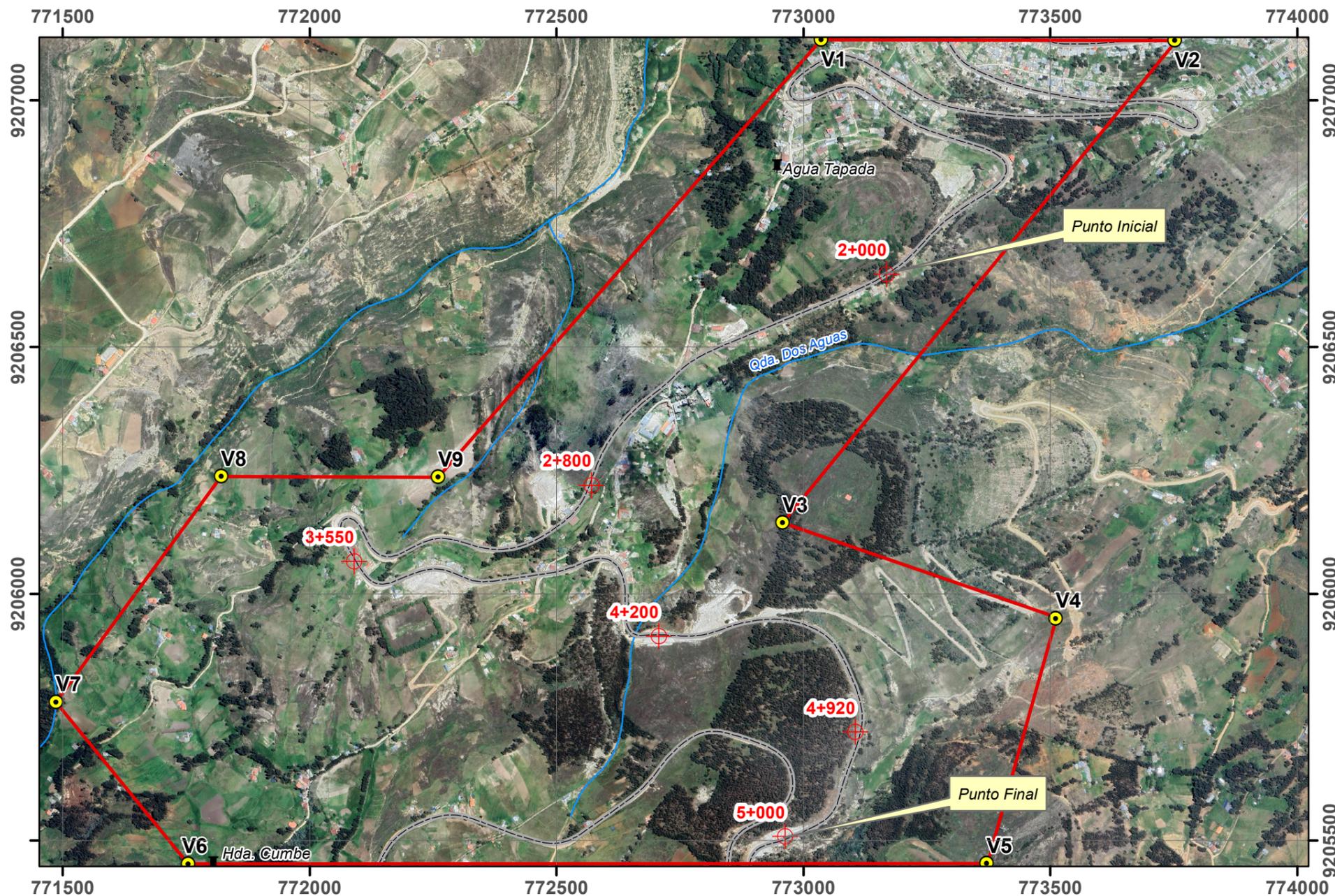
- Lambe, W., y Whitman, R. (1984). *Mecánica de Suelos*. México: Limusa.
- Medina, D. (2022). Inestabilidad geotécnica de los depósitos cuaternarios entre las progresivas km 12+000 al km 15+000, en la cimentación de la carretera Pe-3n. Bambamarca – Amazonas. Cajamarca, Perú.
- Miranda, S., y Herrera, L. (2022). Mejoramiento de suelos arcillosos, utilizando cal en la sub rasante de pavimentos, pasaje El Porvenir, sector el Parral, Jaén, Cajamarca.
- Moya, G. (2015). Estudio y análisis del comportamiento estructural de cimentaciones superficiales por efectos de consolidación del suelo de fundación, según la metodología propuesta por la norma ecuatoriana de la construcción. Ambato. Ecuador.
- MTC. (2003). Reglamento Nacional de Vehículos – Decreto Supremo N° 058 – 2003. Lima, Perú.
- MTC. (2012). Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje.
- MTC. (2014). Actualización con Resolución Directoral N° 10-2014-MTC/14. Suelos y Pavimentos del Manual de Carreteras-Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. Lima Peru.
- MVCS. (2018). Norma técnica E.050 de Suelos y Cimentaciones.
- Navarro, P., Monge, R., y Flores, A. (2008). Centro Volcánicos Oligo- Miocénicos (Grupo Calipuy) en la Zona Sur de Cajamarca. Lima, Perú.
- OSINERMIN. (2017). Guía de Criterios Geomecánicos para Diseño, Construcción, Supervisión y Cierre de Labores Subterráneas. Lima, Perú.
- Peralta, S. (2021). Caracterización de arcillas expansivas y mitigación de riesgos. Lima, Perú.
- Polinario, D. (2021). Mejoramiento del suelo con clasificación SUCS GC-GM mediante la adición de ceniza volcánica en la ciudad de Arequipa. Arequipa, Perú.
- Quillatupa, Y., y Cárdenas, E. (2016). Relación precipitación, infiltración y escorrentía para la época de lluvia en la microcuenca Yanango-Chanchamayo. Huancayo.
- Ramírez, P., y Alejano, L. (2004). *Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*.
- Rodríguez, JM. y Serrad, J. (1982). *Curso alpicado a la cimentación*. Madrid, España.
- Rodríguez, S. (2016). . Método de investigación geológico-geotécnico para el análisis de inestabilidad de laderas por deslizamientos Zona Ronquillo– Corisorgona. Lima Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Sánchez, G., y Sumba, A. (2019). Caracterización de suelos inestables frente a

- deslizamiento en dos laderas situadas en los alrededores de la ciudad de Cuenca .  
Ecuador.
- Sanhueza, C., Palma, J., Valenzuela, P., Araneda, O., y Calderón, K. (2011). Evaluación del comportamiento geotécnico de suelos volcánicos de suelos volcánicos material de fi ltro en la depuración de aguas residuales domésticas. Chile.
- Suárez, J. (2009). Deslizamientos. Análisis Geotécnico. Colombia: Publicaciones UIS.
- Sulca, E. (2020). Método In-situ de obtención de parámetros de resistencua al corte en arcillas. Lima Perú.
- Supo, J. (2015). Como Empezar una Tesis. Arequipa - Perú.: Bioestadístico EIRL.
- Vásquez, R. L.; Tafur, C. W., y Bartra, P. O. (2018). Mejoramiento de la transitabilidad vehicular de la carretera C.P. Otuzco – C.P. Combayo, Provincia de Cajamarca – Cajamarca.
- Zapata, R. (2018). Tipos de Suelos: Caracterización de suelos arcillos y limosos.

# **ANEXOS 01**

## **Planos**

- Plano 01. Imagen Satelital
- Plano 02. Plano de Ubicación
- Plano 03. Modelo Digital de Elevaciones (MDE)
- Plano 04. Plano Geológico
- Plano 05. Unidades Morfogenéticas
- Plano 06. Plano Geotécnico



### SIMBOLOGÍA

- Área de Investigación
- Progresivas
- Centro Poblado
- Via Afirmada
- Hidrologia

Metros  
0 250 500

Sistema de Coordenadas: UTM  
Datum: WGS 84  
Zona: 17S

Estaciones Geotécnicas					
Estación	Norte (m)	Este (m)	Cota (msnm)	Progresiva	Tipo
PG-01	9206648	773169	3057	2+000	SUELO
PG-02	9206220	772571	3071	2+800	TALUD
PG-03	9206060	772090	3115	3+550	SUELO
PG-04	9205914	772707	3119	4+200	TALUD
PG-05	9205720	773105	3171	4+920	SUELO
PG-06	9205508	772963	3163	5+000	TALUD

Limitación del área de investigación		
Vértice	Este (m)	Norte (m)
V1	773035	9207122
V2	773752	9207121
V3	772957	9206143
V4	773510	9205949
V5	773371	9205453
V6	771753	9205452
V7	771486	9205780
V8	771820	9206237
V9	772260	9206236

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

COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL VOLCÁNICO RUMIORCO DEL KM 2+000 AL KM 5+000 DE LA CARRETERA SANTA APOLONIA - CUMBE MAYO, CAJAMARCA

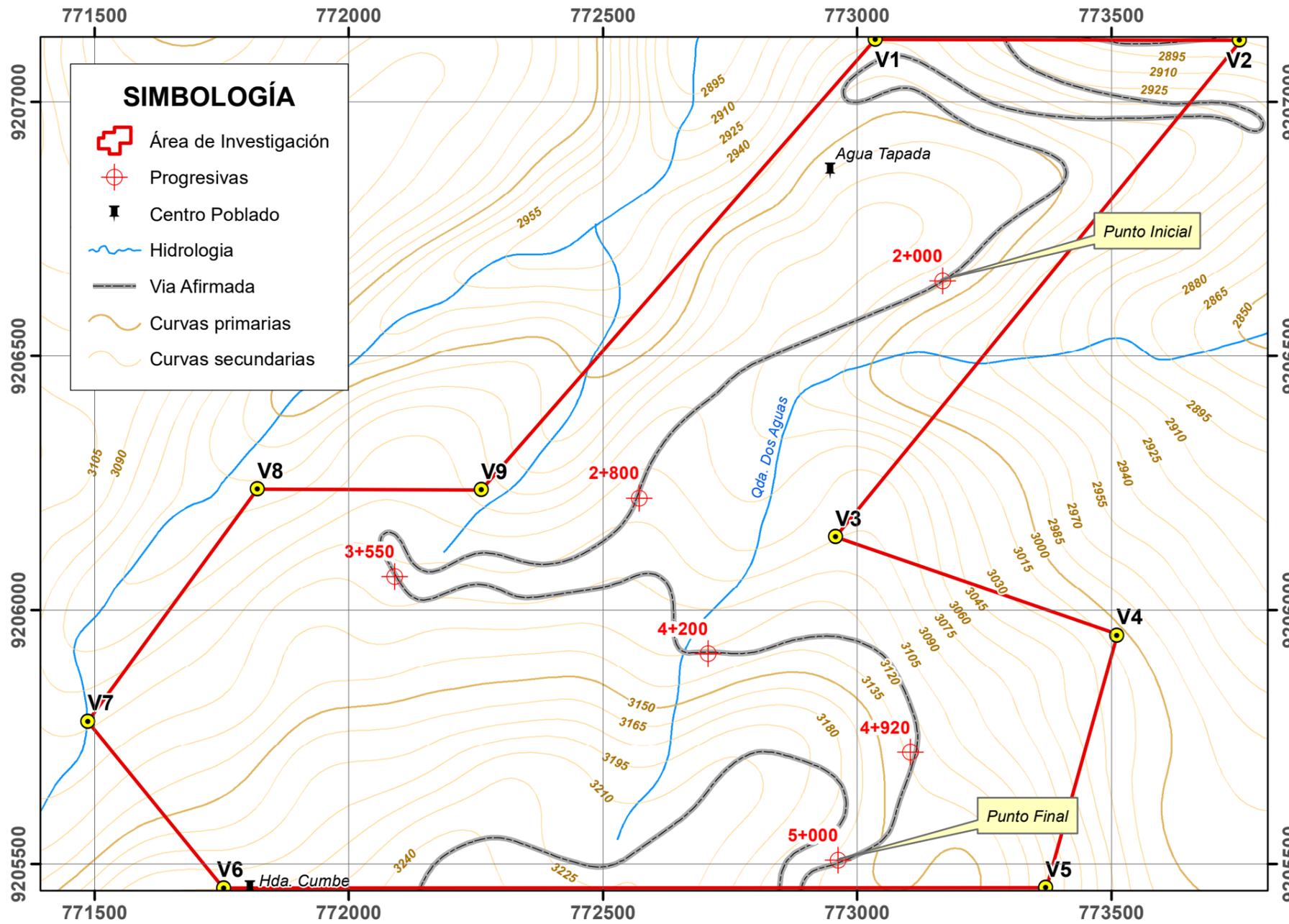
PLANO : SATELITAL

TESISTA : Bach. Mercy Fiorela Vásquez Carrión

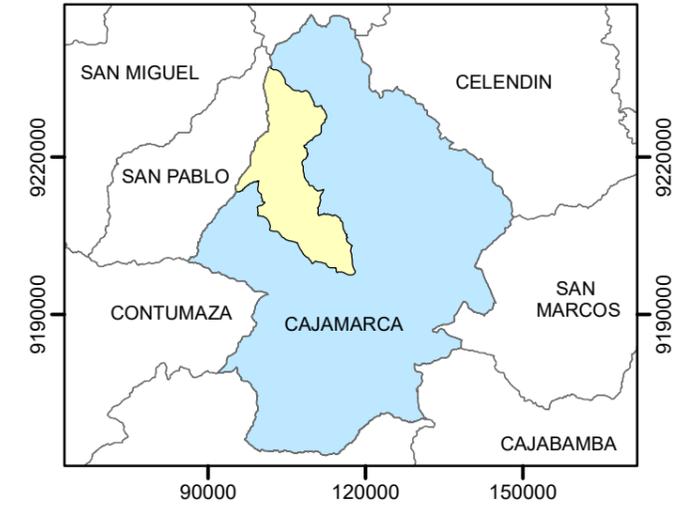
ASESOR : Dr. Reinaldo Rodríguez Cruzado

ESCALA : 1: 10 000    FECHA : 01-07-2025

# P-01



**UBICACIÓN PROVINCIAL**

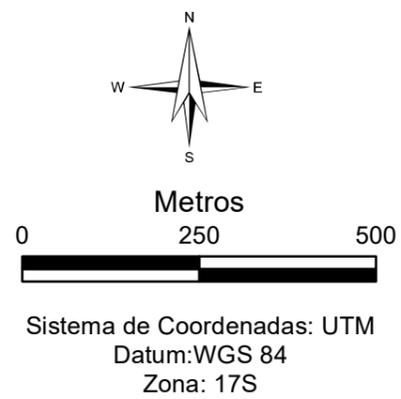


**UBICACIÓN DISTRITAL**



**SIMBOLOGÍA**

- Área de Investigación
- Progresivas
- Centro Poblado
- Hidrologia
- Via Afirmada
- Curvas primarias
- Curvas secundarias



Límites del área de investigación		
Vértice	Este (m)	Norte (m)
V1	773036	9207123
V2	773752	9207121
V3	772958	9206144
V4	773511	9205949
V5	773371	9205454
V6	771754	9205453
V7	771486	9205780
V8	771820	9206238
V9	772260	9206236

Estaciones Geotécnicas					
Estación	Norte (m)	Este (m)	Cota (msnm)	Progresiva	Tipo
PG-01	9206648	773169	3057	2+000	SUELO
PG-02	9206220	772571	3071	2+800	TALUD
PG-03	9206060	772090	3115	3+550	SUELO
PG-04	9205914	772707	3119	4+200	TALUD
PG-05	9205720	773105	3171	4+920	SUELO
PG-06	9205508	772963	3163	5+000	TALUD

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

COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL VOLCÁNICO RUMIORCO DEL KM 2+000 AL KM 5+000 DE LA CARRETERA SANTA APOLONIA - CUMBE MAYO, CAJAMARCA

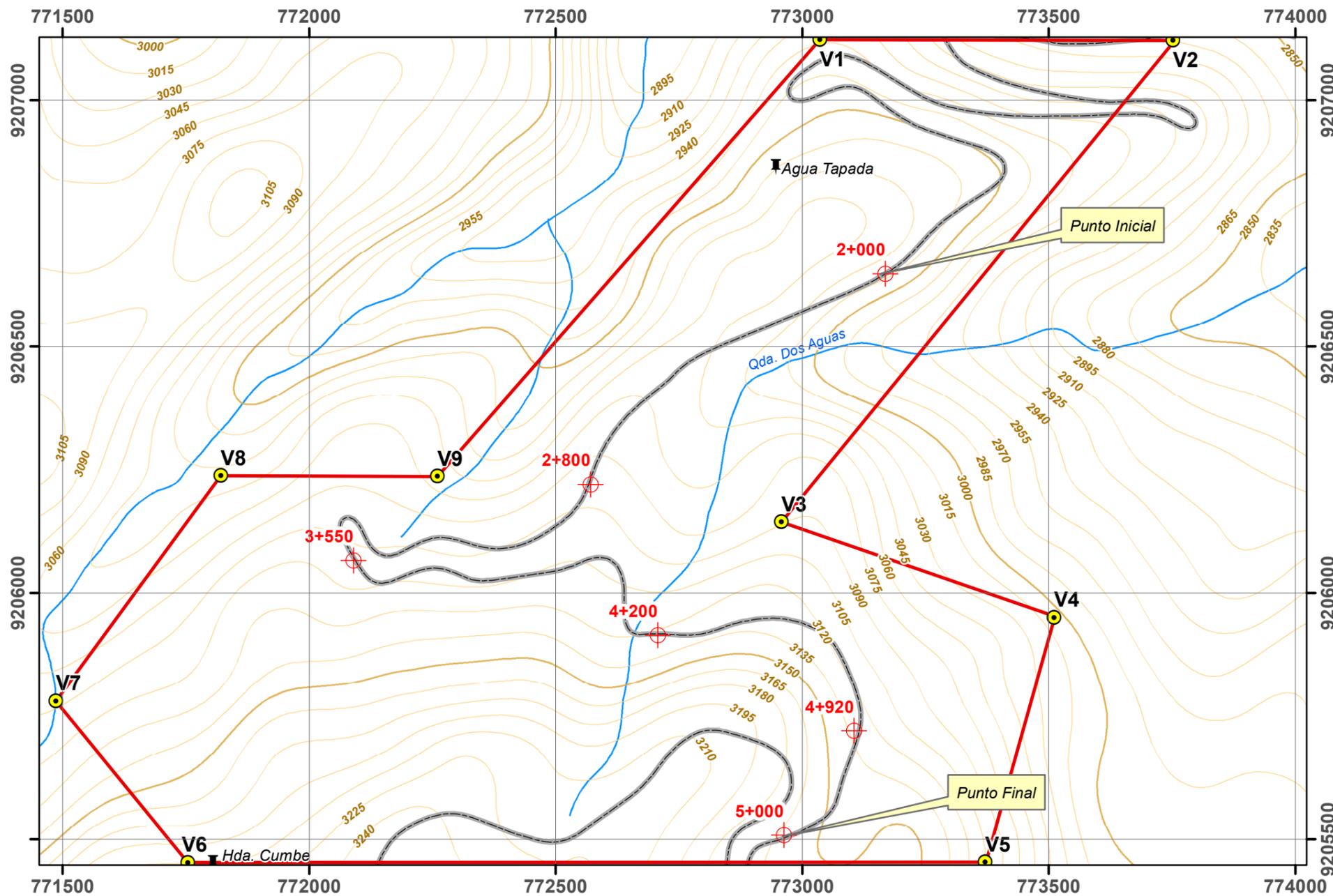
**PLANO :** UBICACIÓN

**TESISTA :** Bach. Mercy Fiorela Vásquez Carrión

**ASESOR :** Dr. Reinaldo Rodríguez Cruzado

**ESCALA :** 1: 10 000 **FECHA :** 01-07-2025

P-02



### SIMBOLOGÍA

- Área de Investigación
- Progresivas
- Centro Poblado
- Hidrologia
- Via Afirmada
- Curvas primarias
- Curvas secundarias

Metros

0      250      500

Sistema de Coordenadas: UTM  
Datum: WGS 84  
Zona: 17S

Estaciones Geotécnicas					
Estación	Norte (m)	Este (m)	Cota (msnm)	Progresiva	Tipo
PG-01	9206648	773169	3057	2+000	SUELO
PG-02	9206220	772571	3071	2+800	TALUD
PG-03	9206060	772090	3115	3+550	SUELO
PG-04	9205914	772707	3119	4+200	TALUD
PG-05	9205720	773105	3171	4+920	SUELO
PG-06	9205508	772963	3163	5+000	TALUD

Limitación del área de investigación		
Vértice	Este (m)	Norte (m)
V1	773035	9207122
V2	773752	9207121
V3	772957	9206143
V4	773510	9205949
V5	773371	9205453
V6	771753	9205452
V7	771486	9205780
V8	771820	9206237
V9	772260	9206236

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

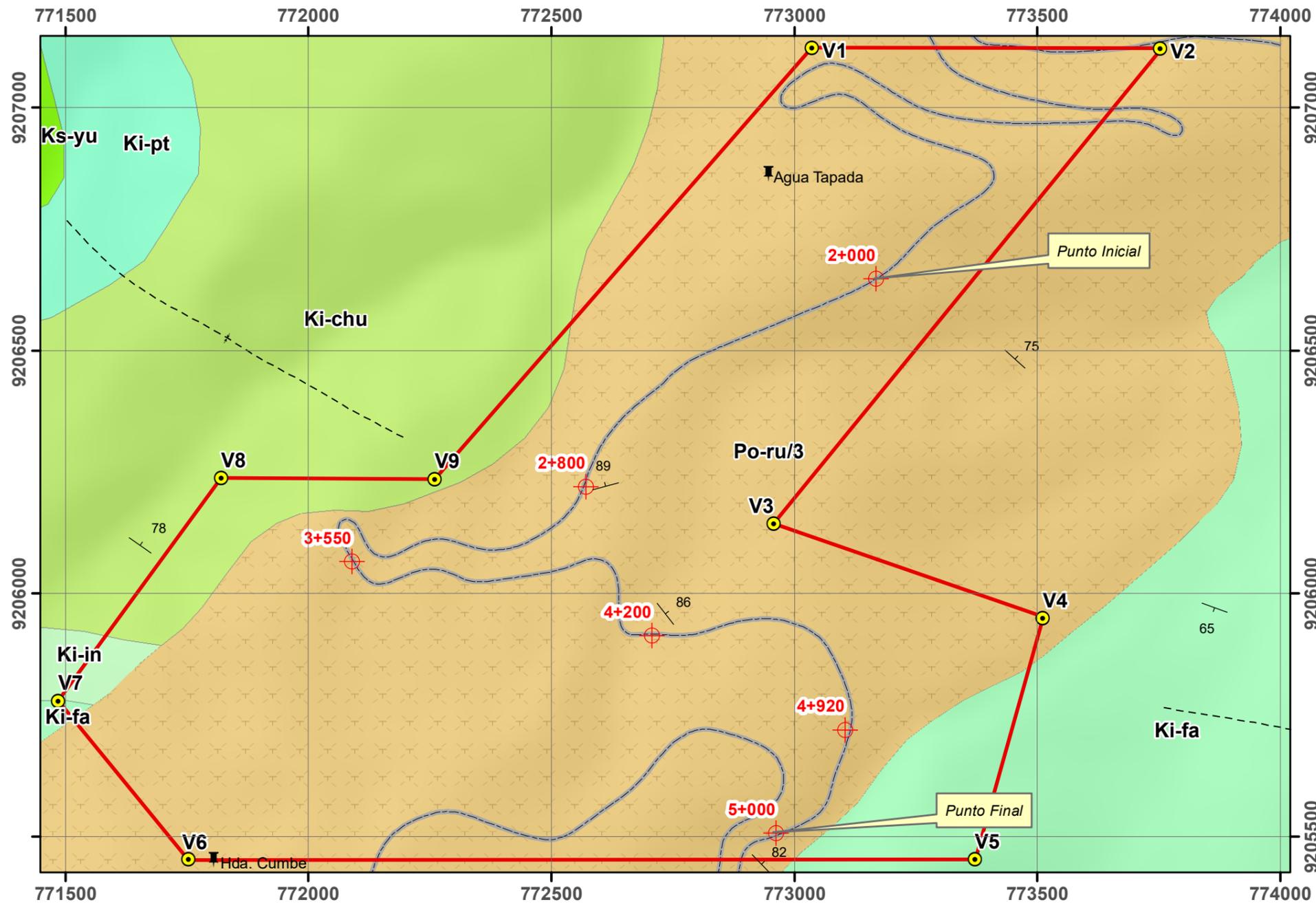
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL VOLCÁNICO RUMIORCO DEL KM 2+000 AL KM 5+000 DE LA CARRETERA SANTA APOLONIA - CUMBE MAYO, CAJAMARCA

**PLANO :** Modelo Digital de Elevaciones (MDE)

<b>TESISTA :</b> Bach. Mercy Fiorela Vásquez Carrión	<b>P-03</b>
<b>ASESOR :</b> Dr. Reinaldo Rodríguez Cruzado	
<b>ESCALA :</b> 1: 10 000 <b>FECHA :</b> 01-07-2025	



**Leyenda**

- Po-ru/3: Centro Volcánico Rumiorco
- Ki-chu: Formación Chúlec
- Ki-in: Formación Inca
- Ki-fa: Formación Farrat

Sistema de Coordenadas: UTM  
Datum: WGS 84  
Zona: 17S

**SIMBOLOGÍA**

- Progresivas
- Centro Poblado
- Área de Investigación
- Sinclinal inferido
- Via Afirmada
- Rumbo y buzamiento

Estaciones Geotécnicas					
Estación	Norte (m)	Este (m)	Cota (msnm)	Progresiva	Tipo
PG-01	9206648	773169	3057	2+000	SUELO
PG-02	9206220	772571	3071	2+800	TALUD
PG-03	9206060	772090	3115	3+550	SUELO
PG-04	9205914	772707	3119	4+200	TALUD
PG-05	9205720	773105	3171	4+920	SUELO
PG-06	9205508	772963	3163	5+000	TALUD

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

COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL VOLCÁNICO RUMIORCO DEL KM 2+000 AL KM 5+000 DE LA CARRETERA SANTA APOLONIA - CUMBE MAYO, CAJAMARCA

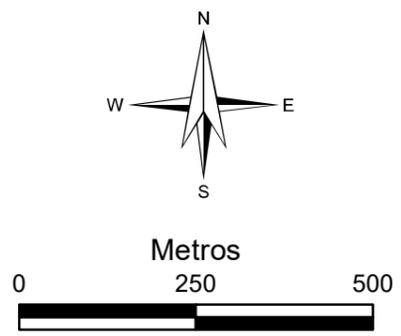
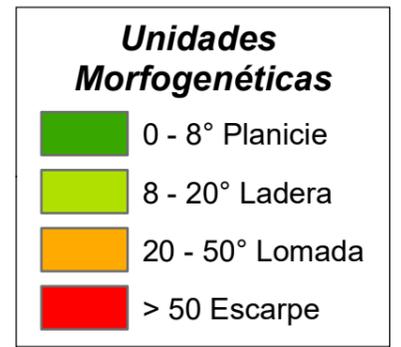
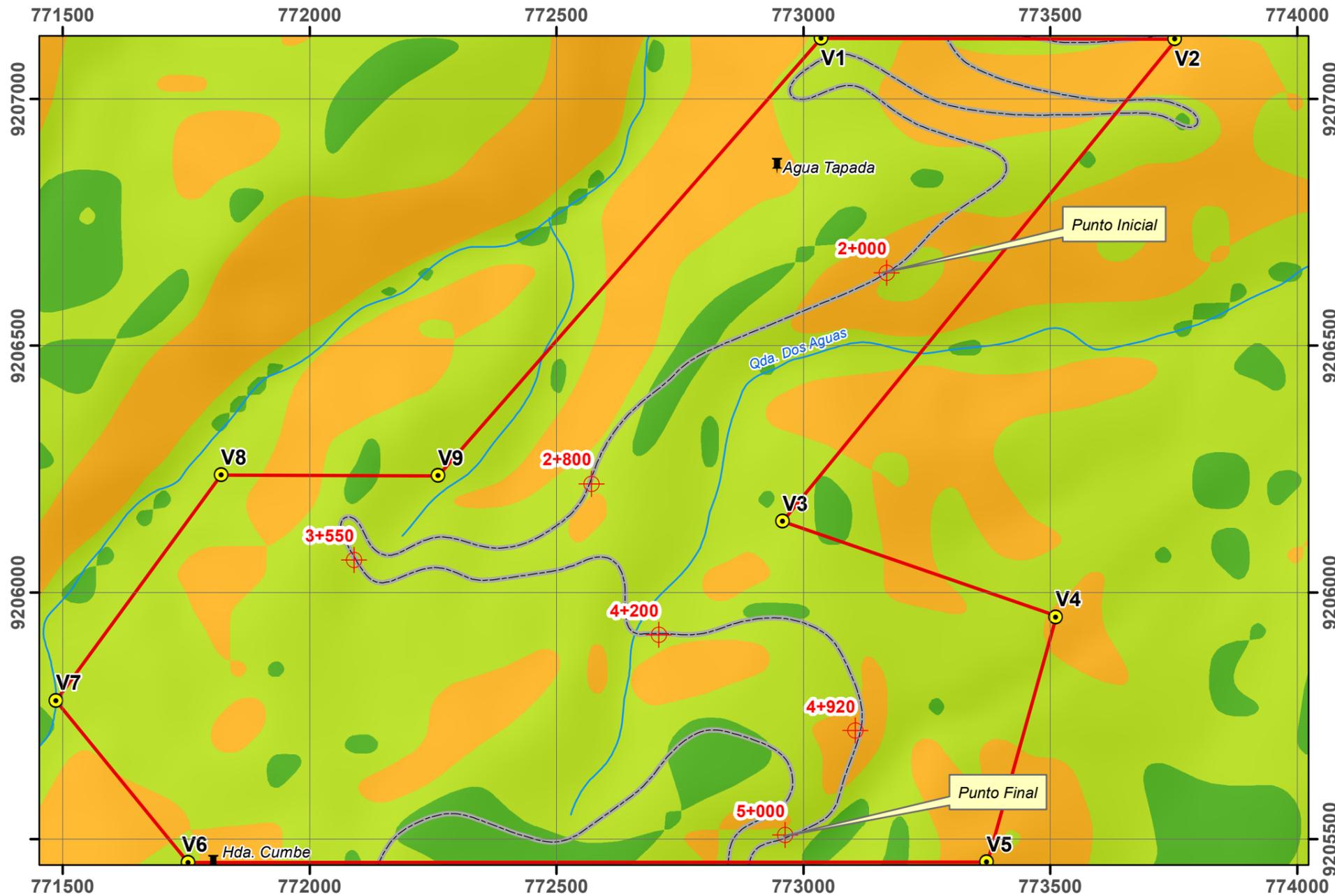
PLANO : GEOLÓGICO

TESISTA : Bach. Mercy Fiorela Vásquez Carrión

ASESOR : Dr. Reinaldo Rodríguez Cruzado

ESCALA : 1: 10 000    FECHA : 01-07-2025

P-04



Sistema de Coordenadas: UTM  
Datum: WGS 84  
Zona: 17S

Estaciones Geotécnicas					
Estación	Norte (m)	Este (m)	Cota (msnm)	Progresiva	Tipo
PG-01	9206648	773169	3057	2+000	SUELO
PG-02	9206220	772571	3071	2+800	TALUD
PG-03	9206060	772090	3115	3+550	SUELO
PG-04	9205914	772707	3119	4+200	TALUD
PG-05	9205720	773105	3171	4+920	SUELO
PG-06	9205508	772963	3163	5+000	TALUD

Límites del área de investigación		
Vértice	Este (m)	Norte (m)
V1	773035	9207122
V2	773752	9207121
V3	772957	9206143
V4	773510	9205949
V5	773371	9205453
V6	771753	9205452
V7	771486	9205780
V8	771820	9206237
V9	772260	9206236

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL VOLCÁNICO RUMIORCO DEL KM 2+000 AL KM 5+000 DE LA CARRETERA SANTA APOLONIA - CUMBE MAYO, CAJAMARCA

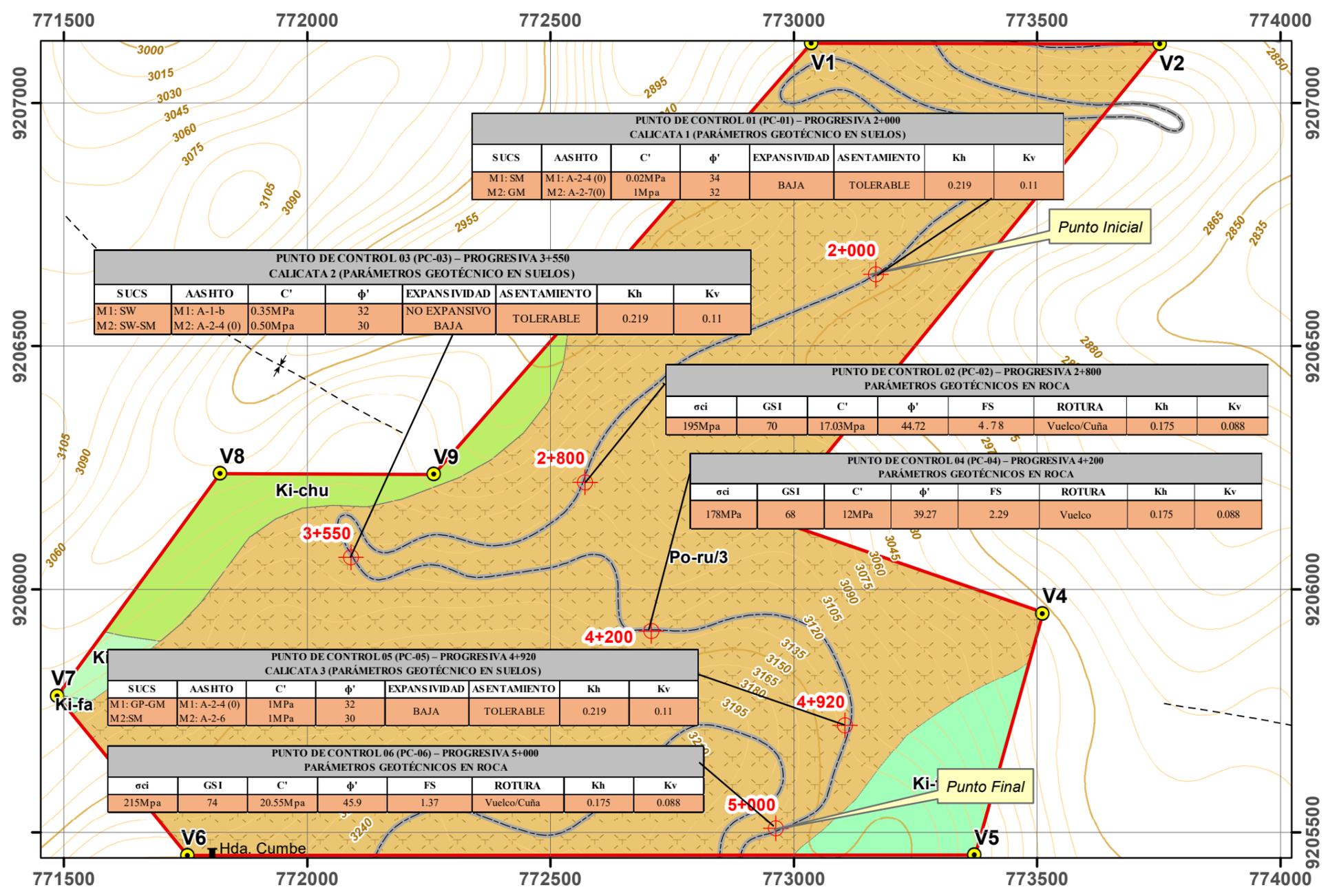
**PLANO :** UNIDADES MORFOGENÉTICAS

**TESISTA :** Bach. Mercy Fiorela Vásquez Carrión

**ASESOR :** Dr. Reinaldo Rodríguez Cruzado

**ESCALA :** 1: 10 000    **FECHA :** 01- 07-2025

P-05



### Leyenda

- Po-ru/3: Centro Volcánico Rumiorco
- Ki-chu: Formación Chúlec
- Ki-in: Formación Inca
- Ki-fa: Formación Farrat

Metros

Sistema de Coordenadas: UTM  
Datum: WGS 84  
Zona: 17S

### SIMBOLOGÍA

- Progresivas
- Área de Investigación
- Sinclinal inferido
- Via Afirmada
- Curvas primarias
- Curvas secundarias

Estación	Norte (m)	Este (m)	ESTACIONES GEOTÉCNICAS		Tipo	Caracterización Geotécnica
			Cota (msnm)	Progresiva		
PG-01	9206648	773169	3057	2+000	SUELO	Suelo con Baja expansibilidad y con asentamiento Tolerable
PG-02	9206220	772571	3071	2+800	TALUD	RQD = 74.98% RMR= 57 (Roca Tipo III) GSI= 52
PG-03	9206060	772090	3115	3+550	SUELO	Suelo con Baja expansibilidad y con asentamiento Tolerable
PG-04	9205914	772707	3119	4+200	TALUD	RQD = 73.58% RMR= 55 (Roca Tipo III) GSI= 50
PG-05	9205720	773105	3171	4+920	SUELO	Suelo con Baja expansibilidad y con asentamiento Tolerable
PG-06	9205508	772963	3163	5+000	TALUD	RQD = 88.37% RMR= 64 (Roca Tipo II) GSI= 59

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL VOLCÁNICO RUMIORCO DEL KM 2+000 AL KM 5+000 DE LA CARRETERA SANTA APOLONIA - CUMBE MAYO, CAJAMARCA

**PLANO :** GEOLÓGICO - GEOTÉCNICO

**TESISTA :** Bach. Mercy Fiorela Vásquez Carrión

**ASESOR :** Dr. Reinaldo Rodríguez Cruzado

**ESCALA :** 1: 10 000    **FECHA :** 01-07-2025

P-06

# **ANEXOS 02**

## **Panel Fotográfico**

## ENSAYOS DE LABORATORIO

### Normas (NTP 339.128, ASTM D 422, MTC E 107)

#### Análisis Granulométrico por Tamizado

Determina el tamaño de las partículas presentes en un suelo y permite calcular el porcentaje de suelo que pasa a través de cada uno de los tamices hasta llegar al tamiz No.200.

#### Contenido de humedad

Se emplea para calcular la cantidad de agua en el suelo y el peso de las partículas sólidas presentes en él.

#### Límite Líquido

Se define como el contenido de humedad que separa el comportamiento líquido de un suelo.

#### Límite Plástico

Corresponde a la humedad que presenta un suelo antes de pasar del estado plástico al estado semisólido.

#### Sistema de clasificación de suelos AASHTO

Se define como el contenido de humedad que separa el comportamiento líquido de un suelo.

#### Clasificación de suelos SUCS

Divide a los suelos en dos grupos, el primero correspondiente a los suelos gruesos y el segundo a suelos finos, de acuerdo al porcentaje retenido en el tamiz, ya sea mayor o menor al 50% del tamiz N° 200.

## PANEL FOTOGRÁFICO



Preparación de las muestras para determinar el contenido de humedad.



Secado de muestras al horno a una temperatura de 110° C, para determinar contenido de humedad y límites de consistencia.



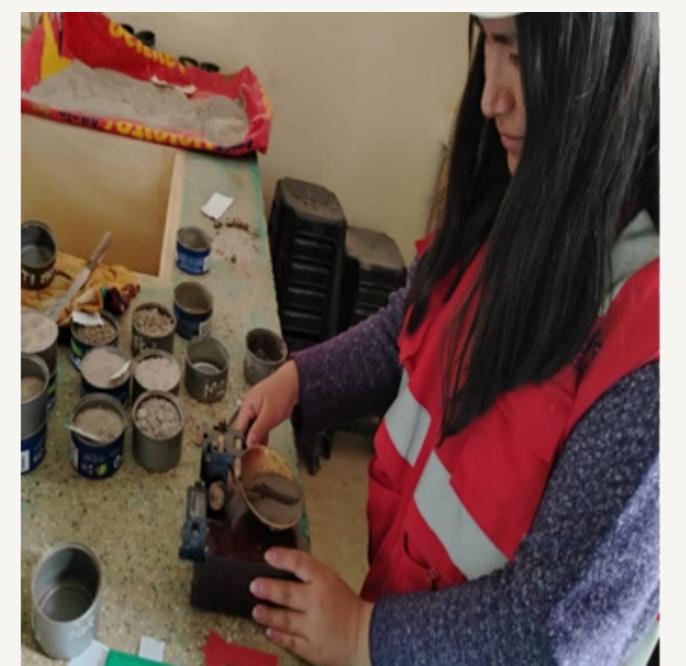
Ensayo granulométrico de suelos a través del tamiz N°4, para la separación de grava y arena.



Ensayo granulométrico de finos concerniente al Tamiz N°4 por el método del lavado.



Del material pasante del tamiz N°4, se vuelve a Tamizar por el tamiz N°40, para establecer los límites de consistencia.



Por el método de casagrande, se establece el límite líquido de las muestras.

**ANEXOS 03**  
**Formatos de Clasificación de Rocas**  
**Volcánicas**

### 3.1 FORMATO DE CLASIFICACIÓN DE ROCAS VOLCÁNICAS

COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL VOLCÁNICO RUMIORCO DEL  
KM 2+000 AL KM 5+000 DE LA CARRETERA SANTA APOLONIA - CUMBE MAYO,  
CAJAMARCA

Fecha: Julio, 2025

Coordenadas

N: 920600

N° Muestra: M1-R

E: 772500

N° Carta: 15f -1

DATUM: WGS-84

País. Perú

Distrito y región: Cajamarca - Cajamarca

Localidad: Agua Tapada (Cumbe Mayo)

#### I.- ASPECTOS GENERALES

Color de sup. Intemp: *Pardo Amarillenta*

Color sup. Fresca: *Gris*

Brillo: *Mate*

Dureza (Mohs): *4.0*

Fractura: *Irregular*

Reacción con HCL: *No reacciona*

#### II.- TEXTURA

Afanítica

#### III. ELEMENTOS TEXTURALES

Grado de Cristalización Hipocristalina

Grado de Visibilidad: Subhedral

Tamaño de abs. de Cristales: 1.6mm - 2mm

Tamaño de relación de Cristales: 1.6 mm

Geometría de los Cristales: Equigranular

#### IV. COMPOSICIÓN

##### MINERALÓGICA

	Cuarzo:35%
MINERALES	Plagioclasa: 30%
ESCENCIALES	Feldespato Alcalino:25%
	TOTAL: 90%

##### PORCENTAJE CORREGIDO

Cuarzo:38.8%

Plagioclasa: 33.3%

Feldespato Alcalino:27.9%

TOTAL: 100%

##### MINERALES ACCESORIOS

Biotita:5%

#### V. COMPONENTES PIROCLÁSTICOS

##### Schmid, (1981)

- Vidrios: 15%

- Cristales 25%

- Fragmentos Líticos:60%

##### Pettijon (1987)

- Ceniza (<2mm): 65%

- Lapilli (2mm-64mm): 15%

- Bloques y bombas (>64mm): 20%

#### VI. CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS VOLCÁNICAS Y SUBVOLCÁNICAS

Según el contenido de Sílice: Intermedia

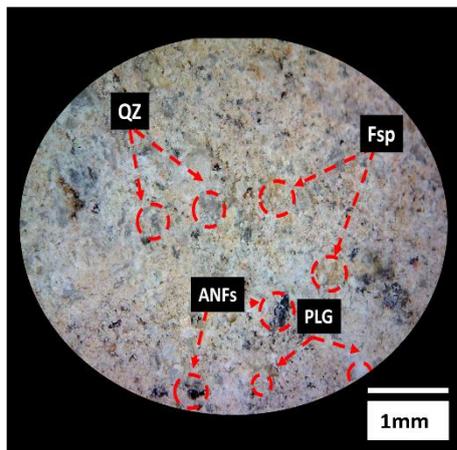
Según índice de máficos (M): Leucocrática

Según su Modo de ocurrencia: Flujos piroclásticos de cenizas.

STRECKEISEN (1979): Riólita

SCHMID (1981): Toba lítica

PETTIJON (1987):Toba de ceniza



Aumento: 60.8x

### 3.2 FORMATO DE CLASIFICACIÓN DE ROCAS VOLCÁNICAS

COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL VOLCÁNICO RUMIORCO DEL  
KM 2+000 AL KM 5+000 DE LA CARRETERA SANTA APOLONIA - CUMBE MAYO,  
CAJAMARCA

Fecha: Julio, 2025	Coordenadas	N: 9206220
N° Muestra: M2-D1		E: 772571
N° Carta: 15f -1	DATUM: WGS-84	Progresiva Km 2+ 800
País. Perú		
Distrito y región: Cajamarca - Cajamarca		
Localidad: Agua Tapada (Cumbe Mayo)		

#### I.- ASPECTOS GENERALES

Color de sup. Intemp: *Pardo Amarillenta*

Color sup. Fresca: *Gris parduzca*

Brillo: *Mate*

Dureza (Mohs): *4.0*

Fractura: *Irregular*

Reacción con HCL: *No reacciona*

#### II.- TEXTURA

Afanítica

#### III. ELEMENTOS TEXTURALES

Grado de Cristalización Hiporistalina

Grado de Visibilidad: Subhedral

Tamaño de abs. de Cristales: 1.6mm - 2mm

Tamaño de relación de Cristales: 1.6 mm

Geometría de los Cristales: Equigranular

#### IV. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

	Cuarzo:35%
MINERALES	Plagioclasa: 40%
ESCENCIALES	Feldespato Alcalino:10%
	TOTAL: 85%

#### PORCENTAJE CORREGIDO

Cuarzo:41.17%

Plagioclasa: 47.05%

Feldespato Alcalino:11.78%

TOTAL: 100%

#### MINERALES ACCESORIOS

Biotita:5%

#### V. COMPONENTES PIROCLÁSTICOS

##### Schmid, (1981)

- Vidrios: 25%

- Cristales 23%

- Fragmentos Líticos:52%

##### Pettijon (1987)

- Ceniza (<2mm): 30%

- Lapilli (2mm-64mm): 55%

- Bloques y bombas (>64mm): 15 %

#### VI. CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS VOLCÁNICAS Y SUBVOLCÁNICAS

Según el contenido de Sílice: Intermedia

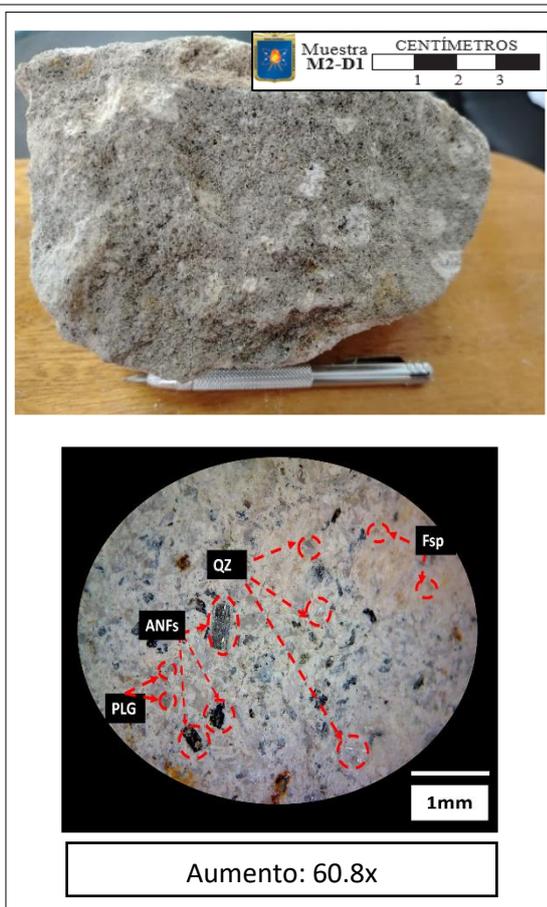
Según índice de máficos (M): Leucocrática

Según su Modo de ocurrencia: Flujos piroclásticos de lapilli y cenizas.

STRECKEISEN (1979): Dacita

SCHMID (1981): Toba lítica

PETTIJON (1987): Toba de Lapilli



Fuente: Formato Adaptado de M.Cs Arapa, (2020).

### 3.3 FORMATO DE CLASIFICACIÓN DE ROCAS VOLCÁNICAS

COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL VOLCÁNICO RUMIORCO DEL  
KM 2+000 AL KM 5+000 DE LA CARRETERA SANTA APOLONIA - CUMBE MAYO,  
CAJAMARCA

Fecha: Julio, 2025	Coordenadas	N: 9205914
N° Muestra: M3-D2		E: 772707
N° Carta: 15f -1	DATUM: WGS-84	Progresiva Km 4+ 200
País. Perú		

Distrito y región: Cajamarca - Cajamarca  
Localidad: Agua Tapada (Cumbe Mayo)

#### I.- ASPECTOS GENERALES

Color de sup. Intemp: *Pardo Amarillenta*

Color sup. Fresca: *Gris Blanquecino*

Brillo: *Mate*

Dureza (Mohs): *4.0*

Fractura: *Irregular*

Reacción con HCL: *No reacciona*

#### II.- TEXTURA

Afanítica

#### III. ELEMENTOS TEXTURALES

Grado de Cristalización Hiporistalina

Grado de Visibilidad: Subhedral

Tamaño de abs. de Cristales: 1.6mm - 2mm

Tamaño de relación de Cristales: 1.6 mm

Geometría de los Cristales: Equigranular

#### IV. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

	Cuarzo:35%
MINERALES	Plagioclasa: 40%
ESCENCIALES	Feldespato Alcalino:15%
	TOTAL: 90%

#### PORCENTAJE CORREGIDO

Cuarzo:38.8%

Plagioclasa: 44.4%

Feldespato Alcalino:16.8%

TOTAL: 100%

#### MINERALES ACCESORIOS

Biotita:8%

#### V. COMPONENTES PIROCLÁSTICOS

##### Schmid, (1981)

- Vidrios: 30%

- Cristales 45%

- Fragmentos Líticos:25%

##### Pettijon (1987)

- Ceniza (<2mm): 60%

- Lapilli (2mm-64mm): 20 %

- Bloques y bombas (>64mm): 20%

#### VI. CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS VOLCÁNICAS Y SUBVOLCÁNICAS

Según el contenido de Sílice: Intermedia

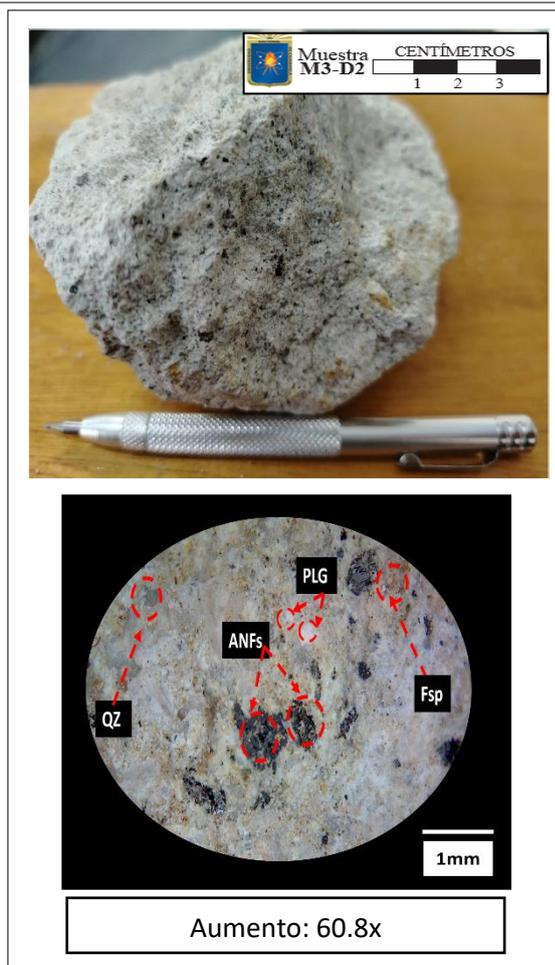
Según índice de máficos (M): Leucocrática

Según su Modo de ocurrencia: Flujos piroclásticos de cenizas.

STRECKEISEN (1979): Dacita

SCHMID (1981): Toba Cristalina

PETTIJON (1987):Toba de ceniza



Fuente: Formato Adaptado de M.Cs Arapa, (2020).

### 3.4 FORMATO DE CLASIFICACIÓN DE ROCAS VOLCÁNICAS

COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DEL VOLCÁNICO RUMIORCO DEL  
KM 2+000 AL KM 5+000 DE LA CARRETERA SANTA APOLONIA - CUMBE MAYO,  
CAJAMARCA

Fecha: Julio, 2025	Coordenadas	N: 9205508
N° Muestra: M4-D3		E: 772963
N° Carta: 15f -1	DATUM: WGS-84	Progresiva Km 5+ 000
País. Perú		

Distrito y región: Cajamarca - Cajamarca  
Localidad: Agua Tapada (Cumbe Mayo)

#### I.- ASPECTOS GENERALES

Color de sup. Intemp: *Pardo Amarillenta*

Color sup. Fresca: *Gris*

Brillo: *Mate*

Dureza (Mohs): *4.0*

Fractura: *Irregular*

Reacción con HCL: *No reacciona*

#### II.- TEXTURA

Afanítica

#### III. ELEMENTOS TEXTURALES

Grado de Cristalización Hiporistalina

Grado de Visibilidad: Subhedral

Tamaño de abs. de Cristales: 1.6mm - 2mm

Tamaño de relación de Cristales: 1.6 mm

Geometría de los Cristales: Equigranular

#### IV. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

	Cuarzo:30%
MINERALES	Plagioclasa: 40%
ESCENCIALES	Feldespato Alcalino:10%
	TOTAL: 80%

#### PORCENTAJE CORREGIDO

Cuarzo:37.5%

Plagioclasa: 50%

Feldespato Alcalino:12.5%

TOTAL: 100%

#### MINERALES ACCESORIOS

Ninguno

#### V. COMPONENTES PIROCLÁSTICOS

##### Schmid, (1981)

- Vidrios: 15%

- Cristales 20%

- Fragmentos Líticos:65%

##### Pettijon (1987)

- Ceniza (<2mm): 25%

- Lapilli (2mm-64mm): 40%

- Bloques y bombas (>64mm): 35%

#### VI. CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS VOLCÁNICAS Y SUBVOLCÁNICAS

Según el contenido de Sílice: Intermedia

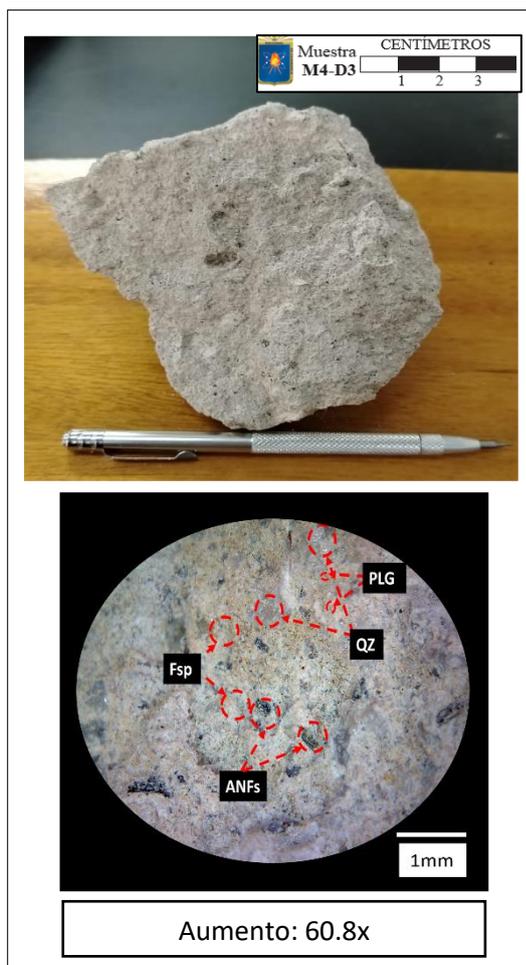
Según índice de máficos (M): Leucocrática

Según su Modo de ocurrencia: Flujos piroclásticos de Lapilli y cenizas.

STRECKEISEN (1979): Dacita

SCHMID (1981): Toba lítica

PETTIJON (1987): Toba de Lapilli



Fuente: Formato Adaptado de M.Cs Arapa, (2020).