



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Ciencias en Ingeniería Geotécnica

**CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LAS FORMACIONES GEOLÓGICAS EXISTENTES
EN RD AV-06 ENTRE LOS MUNICIPIOS DE SAN AGUSTÍN LANQUÍN Y SANTA MARÍA
CAHABÓN EN EL DEPARTAMENTO DE ALTA VERAPAZ**

Inga. Sonia Beatriz Matías Navichoque
Asesor por el MSc. Ing. Víctor Manuel López Juárez

Guatemala, agosto de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LAS FORMACIONES GEOLÓGICAS EXISTENTES
EN RD AV-06 ENTRE LOS MUNICIPIOS DE SAN AGUSTÍN LANQUÍN Y SANTA MARÍA
CAHABÓN EN EL DEPARTAMENTO DE ALTA VERAPAZ**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

INGA. SONIA BEATRIZ MATÍAS NAVICHOQUE
ASESORADO POR EL ING. VÍCTOR MANUEL LÓPEZ JUÁREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA GEOTÉCNICA

GUATEMALA, AGOSTO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Coti
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Sergio Antonio Castellanos López
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LAS FORMACIONES GEOLÓGICAS EXISTENTES
EN RD AV-06 ENTRE LOS MUNICIPIOS DE SAN AGUSTÍN LANQUÍN Y SANTA MARÍA
CAHABÓN EN EL DEPARTAMENTO DE ALTA VERAPAZ**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 5 de noviembre de 2020.



Inga. Sonia Beatriz Matías Navichoque

LNG.DECANATO.OI.566.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LAS FORMACIONES GEOLÓGICAS EXISTENTES EN RD AV-06 ENTRE LOS MUNICIPIOS DE SAN AGUSTÍN LANQUÍN Y SANTA MARÍA CAHABÓN EN EL DEPARTAMENTO DE ALTA VERAPAZ**, presentado por: **Sonia Beatriz Matías Navichoque**, que pertenece al programa de Maestría en ciencias en Ingeniería geotécnica después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, agosto de 2022

AACE/gaoc



Guatemala, agosto de 2022

LNG.EEP.OI.566.2022

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LAS FORMACIONES GEOLÓGICAS EXISTENTES EN RD AV-06 ENTRE LOS MUNICIPIOS DE SAN AGUSTÍN LANQUÍN Y SANTA MARÍA CAHABÓN EN EL DEPARTAMENTO DE ALTA VERAPAZ”

presentado por **Sonia Beatriz Matías Navichoque** correspondiente al programa de **Maestría en ciencias en Ingeniería geotécnica** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Colí
Director



Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Guatemala, 16 de octubre de 2021

MSc. Ing Edgar Álvarez Cotí
Director, Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Por este medio informo a usted, que se ha revisado y APROBADO la siguiente TESIS DE GRADUACIÓN titulada: "CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LAS FORMACIONES GEOLÓGICAS EXISTENTES EN RD AV-06 ENTRE LOS MUNICIPIOS DE SAN AGUSTÍN LANQUÍN Y SANTA MARÍA CAHABÓN EN EL DEPARTAMENTO DE ALTA VERAPAZ" de la estudiante Sonia Beatriz Matías Navichoque, quien se identifica con numero de carné 200011172, del programa de Maestría en Geotécnica.

Con base en la evaluación realizada, se hace constar que se ha evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014.

Por lo anterior, se entrega con la presente, la hoja de evaluación aprobada por el docente del curso y toda la documentación administrativa de respaldo, para su aprobación correspondiente por parte de la Escuela de Estudios de Postgrado.

Sin otro particular

Vo. Bo.
Msc. Ing. Armando Fuentes Roca
Coordinador Área Estructuras
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería

Guatemala, 16 de octubre de 2021

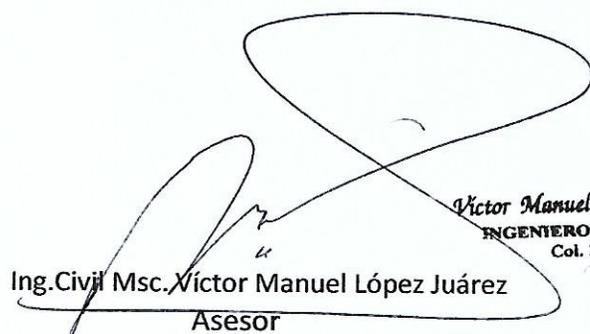
MSc. Ing Edgar Álvarez Cotí
Director, Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Por este medio informo a usted, que, como ASESOR, he revisado y aprobado la siguiente **TÉSIS DE GRADUACIÓN** de la alumna:

Carné: 200011172
Alumno: SONIA BEATRIZ MATÍAS NAVICHOQUE
Maestría: MAESTRÍA EN INGENIERÍA GEOTÉCNICA
Título de la: CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LAS FORMACIONES
Investigación: GEOLÓGICAS EXISTENTES EN RD AV-06 ENTRE LOS
MUNICIPIOS DE SAN AGUSTÍN LANQUÍN Y SANTA MARÍA
CAHABÓN EN EL DEPARTAMENTO DE ALTA VERAPÁZ

En este sentido, extendiendo el Visto Bueno correspondiente, para el cumplimiento de requisitos de la Escuela de Estudios de Postgrado, de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Sin otro particular


Ing. Civil Msc. Víctor Manuel López Juárez
Asesor
Victor Manuel López Juárez
INGENIERO CIVIL, M. S.
Col. 2,393

cc. archivo

ACTO QUE DEDICO A:

- Mis padres** Marcos Matías y María Navichoque. Por inculcarme siempre la disciplina y perseverancia en lo que emprendo.
- Mi esposo** William Ramírez. Sin su motivación, acompañamiento y apoyo no hubiera logrado alcanzar esta meta.
- Mi hermana** Karyn Matías. Dios te multiplique el tiempo y compense todo lo que descuidaste por ayudarme a alcanzar esta meta.
- Mi hermana** Glendy Matías. Gracias por apoyarme siempre.
- Mi hijo** Juanpablo Ramírez. Sé que algún día estarás orgulloso de mi y comprenderás el tiempo que no hemos estado juntos.
- Mi hijo** Juanjosé Ramírez. Sé que desde el cielo me acompañas y estás feliz al igual que yo este día.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por el don de la vida y por su Divina Providencia.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por poner a mi disposición las herramientas para alcanzar esta meta.
Ing. Víctor López	Por su valioso apoyo y orientación en la elaboración de mi Trabajo de Graduación.
SBI International Holdings AG	Por su apoyo en el proceso de mi crecimiento profesional.
Ing. Henri Assa	Por su valioso aporte en información que soporta este trabajo de graduación.
Sr. Danilo Solís	Por su valiosa colaboración en la coordinación de los ensayos de laboratorio realizados y el apoyo brindado siempre.
Personal de laboratorio proyecto JICA tramo 5	Por el trabajo realizado con esmero y responsabilidad, Dios los bendiga siempre.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XV
GLOSARIO	XVII
RESUMEN.....	XXI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XXIII
OBJETIVOS.....	XXV
HIPÓTESIS.....	XXVII
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO	XXIX
INTRODUCCIÓN	XXXI
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Geología.....	1
1.1.1. Tiempo geológico	2
1.1.2. Ciclo de las rocas	5
1.1.2.1. Rocas ígneas.....	7
1.1.2.2. Rocas sedimentarias	7
1.1.2.3. Rocas metamórficas	8
1.1.3. Grado de meteorización	8
1.1.4. Geología estructural	10
1.1.4.1. Estructura geológica	10
1.1.4.2. Dirección y buzamiento	11
1.1.4.3. Pliegues.....	11
1.1.4.4. Domas y cubetas	12
1.1.4.5. Fallas y fracturas	13
1.2. Clasificación de los suelos.....	13

1.2.1.	Métodos de clasificación de los suelos	14
1.2.1.1.	Clasificación en el sistema unificado....	14
1.2.1.2.	Clasificación AASHTO.....	19
1.2.2.	Ensayos de clasificación	21
1.2.2.1.	Granulometría	21
1.2.2.2.	Límite líquido	21
1.2.2.3.	Límite plástico	23
1.2.2.4.	Índice de plasticidad.....	23
1.2.3.	Ensayo de caracterización de los suelos	24
1.2.3.1.	Ensayo de densidad-humedad (Proctor).....	24
1.2.3.2.	Ensayo de equivalente de arena (EA).....	25
1.2.3.3.	Ensayo CBR.....	26
1.2.3.4.	Corte directo.....	27
1.3.	Toma de muestras	28
1.3.1.	Muestras alteradas.....	28
1.3.2.	Muestras inalteradas	28
2.	DESCRIPCIÓN ESPECÍFICA DEL PROYECTO	31
2.1.	Geografía	31
2.2.	Descripción y delimitación del área.....	32
2.3.	Geología encontrada en la bibliografía.....	33
2.3.1.	Geología estructural encontrada en la bibliografía.....	36
2.4.	Clasificación del suelo según su origen	37
2.5.	Usos del suelo.....	38
2.6.	Estudios de laboratorio previos	39
2.7.	Condiciones climáticas.....	44
2.8.	Historial sísmico	45

3.	TRABAJO DE CAMPO.....	49
3.1.	Geología determinada en campo	49
3.1.1.	Geología estructural determinada en campo	64
3.2.	Toma de muestras de suelos	80
3.3.	Toma de muestras de rocas	86
3.3.1.	Muestras para análisis petrográfico	86
3.3.2.	Muestras para compresión inconfiada	90
3.4.	Registro de lluvia	93
4.	ENSAYOS DE LABORATORIO	97
4.1.	Ensayos de suelos	97
4.1.1.	Granulometría.....	97
4.1.2.	Límite líquido	106
4.1.3.	Límite plástico.....	114
4.1.4.	Índice de plasticidad	119
4.1.5.	Ensayo de densidad-humedad (Proctor)	123
4.1.6.	Ensayo de equivalente de arena	134
4.1.7.	Ensayo CBR	139
4.1.8.	Ensayo de corte directo	161
4.2.	Ensayos de rocas	163
4.2.1.	Análisis petrográfico macroscópico	163
4.2.2.	Ensayos para determinar las características mecánicas y propiedades físicas de las rocas.....	164
4.2.2.1.	Determinación de la densidad	166
4.2.2.2.	Determinación del peso específico	167
4.2.2.3.	Determinación de la resistencia a la compresión inconfiada.....	169
5.	RESUMEN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	173

5.1.	Suelos	173
5.2.	Rocas	185
CONCLUSIONES		187
RECOMENDACIONES		189
REFERENCIAS		191
ANEXOS.....		195

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ciclo de las rocas.....	6
2.	Tipos de pliegues.....	12
3.	Domo y cubeta.....	12
4.	Carta de plasticidad de Casagrande.....	16
5.	Ubicación geográfica del área de estudio.....	31
6.	Ubicación municipal del área de estudio.....	32
7.	Geología del área de estudio.....	33
8.	Análisis estructural de las estaciones 0+000 y 1+600.....	36
9.	Análisis estructural de las estaciones 3+800 y 6+250.....	37
10.	Tipos de suelo según su origen.....	38
11.	Uso del suelo.....	39
12.	Secuencia ubicada en la estación 0+710 LI en el área de estudio.....	50
13.	Secuencia ubicada en la estación 1+810 LD en el área de estudio.....	51
14.	Distribución de las arenas medias en el área de estudio.....	53
15.	Secuencia ubicada en la estación 14+270 LI en el área de estudio.....	54
16.	Distribución de las gravas en el área de estudio.....	55
17.	Secuencia ubicada en la estación 13+250 LI en el área de estudio.....	56
18.	Distribución de los bloques en el área de estudio.....	57
19.	Lugares donde se visualizan los materiales estratificados de gran tamaño de la formación Sepur en el área de estudio.....	58
20.	Distribución de las grauvacas horizontales en el área de estudio.....	59
21.	Aluvión encontrado en la estación 3+420 LI en el área de estudio.....	60
22.	Distribución de los aluviones en el área de estudio.....	61

23.	Roca caliza encontrado en la estación 14+895 LI en el área de estudio	62
24.	Distribución de las rocas calizas en el área de estudio.....	63
25.	Ubicación de los puntos de análisis estructural	65
26.	Grabén local en el afloramiento ubicado en la estación 1+895 LD sobre la carretera.....	66
27.	Movimiento de los bloques en la falla puntual del afloramiento ubicado en la estación 1+895 LD sobre la carretera.....	67
28.	Estratigrafía del afloramiento ubicado en la estación 1+895 LD sobre la carretera.....	68
29.	Orientación de las familias de discontinuidades y fallas en relación al talud ubicado en la estación 1+895 LD sobre la carretera	70
30.	Afloramiento 2 ubicado en la estación 13+250 LI sobre la carretera	72
31.	Concreciones de caliza en el afloramiento 2 ubicado en la estación 13+250 LI sobre la carretera.....	72
32.	Estratigrafía del afloramiento ubicado en la estación 13+250 LI sobre la carretera.....	73
33.	Orientación de las familias de discontinuidades y estructura en relación al talud ubicado en la estación 13+250 LI sobre la carretera ..	75
34.	Afloramiento ubicado en la estación 14+270 LI sobre la carretera	76
35.	Intercalaciones de caliza, arenisca y lutita en el afloramiento ubicado en la estación 14+270 LI sobre la carretera.....	77
36.	Estratigrafía del afloramiento del afloramiento ubicado en la estación 14+270 LI sobre la carretera.....	77
37.	Orientación de las familias de discontinuidades en relación al talud ubicado en la estación 14+270 LI sobre la carretera	79
38.	Toma de muestra de suelo en la estación 22+920 LD.....	81
39.	Toma de muestra de suelo en la estación 24+700 LD.....	82

40.	Toma de muestra para análisis petrográfico en la estación 10+615 LI	87
41.	Muestras de roca para análisis petrográfico.....	87
42.	Ubicación de la toma de muestra de roca para ensayo para análisis petrográfico	89
43.	Toma de muestra de roca en la estación 23+260	90
44.	Transporte de las rocas para su ensayo	91
45.	Ubicación de la toma de muestra de roca para ensayo a compresión	92
46.	Ubicación del pluviómetro con relación a la carretera	94
47.	Lluvia acumulada mensual en mm.....	95
48.	Días de Lluvia mensual	96
49.	Ensayo de granulometría por tamizado.....	100
50.	Gráfica del análisis granulométrico	103
51.	Ensayo para determinar el Límite Líquido.....	108
52.	Gráfica para determinación del límite líquido de la muestra tomada en la estación 3+050 LD.	111
53.	Ensayo para determinar el límite plástico.....	115
54.	Ensayo densidad–humedad.....	125
55.	Gráfica para determinación de la densidad máxima y la humedad óptima de la muestra tomada en la estación 3+050 LD	131
56.	Ensayo de equivalente de arena.....	135
57.	Equipo para el ensayo CBR	141
58.	Gráfica de resistencia – penetración de la muestra tomada en la estación 3+050 LD	153
59.	Gráfica de resistencia – penetración de la muestra tomada en la estación 3+050 LD	159
60.	Muestras para ensayo de corte directo	162
61.	Rocas después de haber extraído los cilindros para ensayo	164

62.	Cilindro extraído de la roca para ensayo	165
63.	Cilindros listos para ensayos	165
64.	Ensayo a compresión de núcleos de roca	170

TABLAS

I.	Eónes desde la formación del planeta	3
II.	Descripción de la era Paleozoica.....	4
III.	Descripción de la era Mesozoica	4
IV.	Descripción de la era Cenozoica	5
V.	Escala de meteorización establecida por la ISRM	9
VI.	Simbología para la clasificación de suelos por el método SUCS.....	15
VII.	Clasificación AASHTO para suelos granulares.....	20
VIII.	Clasificación AASHTO para suelos finos	20
IX.	Información teórica de las formaciones existentes	35
X.	Granulometría de los materiales encontrada en la bibliografía de las estaciones 0+000 a la 28+000	40
XI.	Ensayos para clasificación de suelos en la bibliografía de las estaciones 0+000 a la 24+000	41
XII.	Ensayos para clasificación de suelos en la bibliografía de las estaciones 24+000 a la 28+000	42
XIII.	Granulometría de los materiales propuestos para bancos de material	43
XIV.	Ensayos de clasificación de los materiales propuestos para bancos de material	43
XV.	Otros ensayos realizados a los materiales propuestos para bancos	44
XVI.	Resumen climático del área en estudio	45
XVII.	Registro sísmico del Departamento de Alta Verapaz del 2011 al 2018	46

XVIII.	Registro sísmico del departamento de Alta Verapaz del 2019 a 2020	47
XIX.	Registro sísmico del departamento de Alta Verapaz de enero a marzo de 2021	48
XX.	Clasificación granulométrica de sedimentos, escala Udden-Wentworth	51
XXI.	Inicio y final de las arenas medias en el área de estudio	52
XXII.	Inicio y final de las gravas en el área de estudio	66
XXIII.	Inicio y final de los bloques en el área de estudio	57
XXIV.	Inicio y final de los suelos con grauvacas en el área de estudio	59
XXV.	Inicio y final de los aluviones en el área de estudio	60
XXVI.	Inicio y final de las rocas calizas en el área de estudio	63
XXVII.	Orientación de la familia 1 de discontinuidades en el afloramiento 1 ...	69
XXVIII.	Orientación de la familia 2 de discontinuidades en el afloramiento 1 ...	69
XXIX.	Orientación de las fallas presentes en el afloramiento 1	70
XXX.	Orientación de la familia 1 de discontinuidades en el afloramiento 2 ...	74
XXXI.	Orientación de la familia 2 de discontinuidades en el afloramiento 2 ...	74
XXXII.	Orientación de la familia 1 de discontinuidades en el afloramiento 3 ...	78
XXXIII.	Orientación de la familia 2 de discontinuidades en el afloramiento 3 ...	79
XXXIV.	Ubicación de los puntos de toma de muestra de arenas finas en el área de estudio	82
XXXV.	Ubicación de los puntos de toma de muestra de los bloques en el área de estudio	83
XXXVI.	Ubicación de los puntos de toma de muestra de gravas en el área de estudio.....	84
XXXVII.	Ubicación de los puntos de toma de muestra de suelos estratificados con presencia de grauvacas en el área de estudio	85
XXXVIII.	Ubicación de los puntos de toma de muestra de los aluviones en el área de estudio	85

XXXIX.	Ubicación de los puntos de toma de muestra de los suelos que se encuentran con las rocas calizas en el área de estudio.....	86
XL.	Ubicación de los puntos de toma de muestra de roca para análisis petrográfico en el área de estudio.....	88
XLI.	Ubicación de los puntos de toma de muestra de roca para ensayo de compresión en el área de estudio	91
XLII.	Lluvia acumulada mensual en mm.....	93
XLIII.	Días de lluvia mensual.....	95
XLIV.	Tamices utilizados para la determinación de la granulometría de los suelos en los ensayos.....	98
XLV.	Masa neta acumulada registrada en el ensayo de granulometría por tamizado	100
XLVI.	Tabla resumen de los cálculos de la granulometría del material ejemplo	102
XLVII.	Resumen de análisis granulométrico de los materiales entre las estaciones 0+000 a 8+000.....	104
XLVIII.	Resumen de análisis granulométrico de los materiales entre las estaciones 7+100 a 25+000.....	105
XLIX.	Factor de corrección para el cálculo del Límite Líquido	108
L.	Masas obtenidas en el ensayo	109
LI.	Resumen de resultados del ensayo de límite líquido de los materiales entre las estaciones 0+000 a 8+000	112
LII.	Resumen de resultados del ensayo de límite líquido de los materiales entre las estaciones 8+000 a 25+000	113
LIII.	Datos registrados de las masas del material para la determinación del límite plástico.	116
LIV.	Resumen de resultados del ensayo de límite plástico de los materiales entre las estaciones 0+000 a 4+300	117

LIV.	Resumen de resultados del ensayo de límite plástico de los materiales entre las estaciones 4+300 a 20+500.....	118
LVI.	Resumen de resultados del ensayo de límite plástico de los materiales entre las estaciones 20+500 a 25+000.....	119
LVII.	Datos para el cálculo del índice de plasticidad.....	120
LVIII.	Resumen de resultados de la determinación del índice de plasticidad de los materiales entre las estaciones 0+000 a 4+500	120
LIX.	Resumen de resultados de la determinación del índice de plasticidad de los materiales entre las estaciones 4+500 a 25+000	121
LX.	Resumen de resultados de la determinación del índice de plasticidad de los materiales entre las estaciones 4+500 a 21+000	123
LXI.	Masas obtenidas en el ensayo.....	126
LXII.	Resumen de resultados de densidad–humedad	130
LXIII.	Resumen de resultados del ensayo de densidad–humedad de los materiales entre las estaciones 0+000 a 13+500.....	132
LXIV.	Resumen de resultados del ensayo de densidad–humedad de los materiales entre las estaciones 13+500 a 25+000.....	133
LXV.	Masas obtenidas en el ensayo.....	135
LXVI.	Resumen de resultados de densidad–humedad	136
LXVII.	Resumen de resultados del ensayo equivalente de arena de los materiales entre las estaciones 0+000 a 6+500	137
LXVIII.	Resumen de resultados del ensayo de equivalente de arena de los materiales entre las estaciones 6+500 a 22+600.....	137
LXIX.	Resumen de resultados del ensayo de equivalente de arena de los materiales entre las estaciones 22+600 a 25+000.....	139
LXX.	Masas obtenidas en el ensayo.....	142
LXXI.	Masas obtenidas en el ensayo.....	143
LXXII.	Masas obtenidas en el ensayo.....	144

LXXIII.	Lecturas realizadas durante la inmersión de las muestras en pulgadas	146
LXXIV.	Lecturas tomadas en la corrida del ensayo CBR en la prensa	147
LXXV.	Lecturas tomadas en la corrida del ensayo CBR en la prensa	152
LXXVI.	Lecturas tomadas en la corrida del ensayo CBR en la prensa	154
LXXVII.	Lecturas tomadas en la corrida del ensayo CBR en la prensa	156
LXXVIII.	Lecturas tomadas en la corrida del ensayo CBR en la prensa	157
LXXIX.	Lecturas tomadas en la corrida del ensayo CBR en la prensa	158
LXXX.	Resumen de resultados del ensayo CBR de los materiales entre las estaciones 0+000 a 16+500.....	160
LXXXI.	Resumen de resultados del ensayo CBR de los materiales entre las estaciones 16+500 a 25+000.....	161
LXXXII.	Valores de cohesión y ángulo de fricción interna obtenidos en el ensayo de corte directo.....	162
LXXXIII.	Resumen del análisis macroscópico realizado a las rocas en el área de estudio	163
LXXXIV.	Dimensiones y masa de los cilindros de roca	166
LXXXV.	Resumen de las densidades de las rocas en el área de estudio	167
LXXXVI.	Resumen del peso específico de las rocas en el área de estudio	168
LXXXVII.	Factor de corrección por relación altura diámetro.....	169
LXXXVIII.	Carga máxima soportada por los cilindros de roca	170
LXXXIX.	Resistencia a la compresión de los cilindros de roca.....	171
XC.	Resumen de resultados necesario para la clasificación por los métodos AASHTO y SUCS del material ejemplo.....	173
XCI.	Clasificación por los métodos AASHTO y SUCS del material ejemplo	175
XCII.	Clasificación por los métodos AASHTO y SUCS de los materiales clasificados originalmente como arenas medias y los resultados de los otros ensayos realizados.....	176

XCIII.	Clasificación por los métodos AASHTO y SUCS de los materiales clasificados originalmente como gravas y los resultados de los otros ensayos realizados.....	178
XCIV.	Clasificación por los métodos AASHTO y SUCS de los materiales clasificados originalmente como bloques y los resultados de los otros ensayos realizados.....	179
XCV.	Clasificación por los métodos AASHTO y SUCS de los materiales clasificados originalmente como suelos con grauvacas y los resultados de los otros ensayos realizados.....	180
XCVI.	Clasificación por los métodos AASHTO y SUCS de los materiales clasificados originalmente como aluviones y los resultados de los otros ensayos realizados.....	181
XCVII.	Clasificación por los métodos AASHTO y SUCS de los materiales clasificados originalmente como suelos con rocas calizas y los resultados de los otros ensayos realizados.....	182
XCVIII.	Resumen de resultados de los ensayos realizados a las rocas encontradas en el área de estudio	185

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm³	Centímetro cúbico
cm	Centímetros
°	Grados
°C	Grados centígrados
g	Gramos
h	Horas
Kg	Kilogramo
Km	Kilómetro
lb	Libra
lbf	Libra fuerza
Psi	Libras por pulgada cuadrada
LL	Límite líquido
LP	Límite plástico
±	Más – menos (indica intervalo)
>	Mayor que
<	Menor que
m³	Metro cúbico
m	Metros
µm	Micrómetros
mm	Milímetros
min	Minutos
#	Número
W	Oeste

p³	Pie cúbico
%	Porcentaje
PP	Porcentaje que pasa
”	Pulgada
s	Segundos

GLOSARIO

Aluvión	Sedimentos clásticos heterogéneos en cuanto a tamaño, forma y composición depositados por ríos o glaciares.
Azimut	Dirección que sigue la línea de intersección formada entre el plano horizontal y el plano del estrato o de la estructura geológica, medida con respecto al norte magnético de la tierra.
Brújula	Instrumento de orientación que utiliza una aguja imantada, la cual siempre señala el Norte magnético de la tierra y sirve para medir ángulos.
Caliza	Roca sedimentaria formada por la precipitación del carbonato de calcio, en las regiones batiales y abisales de los fondos marinos.
Coordenadas geodésicas	Ubicación de un lugar de la tierra referido a la latitud (con respecto al Ecuador) y a la longitud con respecto al Meridiano de Greenwich.
Deleznable	Mineral, roca o material que se rompe, disgrega o deshace con cierta facilidad. Poco resistente.

Esquisto	Roca producida por el metamorfismo de las rocas volcánicas de textura afanítica o de las rocas sedimentarias de grano fino.
Estratificación	Superficies de separación de las capas de rocas sedimentarias, presencia secuencias de intercalación de sedimentos de diferente granulometría o naturaleza mineralógica.
Estratigrafía	Es la ciencia que estudia la secuencia o sucesión de las capas o estratos que se han formado a través del tiempo geológico.
Estrato	Capa formada por la sedimentación de fragmentos o partículas provenientes de la desintegración de las rocas preexistentes o de soluciones químicas.
Facies	Conjunto de caracteres y condiciones físicas, químicas ambientales y paleontológicas, mediante las cuales se produjeron las deposiciones litológicas.
Falla	Desplazamiento de un bloque con respecto a otro colindante a éste, a través de un plano.
Foliación	Propiedad de los suelos y rocas de presentarse dando la apariencia de hojas o láminas.
Granulometría	Medición de las dimensiones y las formas de los fragmentos de materiales detríticos.

Grauvaca o grauwaca	Denominación dada a las areniscas constituidas por partículas de cuarzo, feldespatos, micas y a veces fragmentos de esquistos argilosos el cemento que las une puede ser silíceo o carbonatos de calcio.
Grupo	Denominación usada en estratigrafía para designar una secuencia de rocas sedimentarias con características litológicas y facies muy peculiares, de extensión regional y que generalmente incluyen varias formaciones geológicas.
Plano de estratificación	Superficie que separa dos estratos consecutivos de una secuencia sedimentaria.
<i>Rift</i>	Zonas de hundimiento de la corteza terrestre entre dos fallas paralelas.
Rumbo	Es la orientación que sigue la línea de intersección formada por el plano horizontal y el plano del estrato, dique, falla o cualquier estructura que tenga el plano definido.
Secuencia	sucesión de acontecimientos realizados en el tiempo y en el espacio, los cuales se manifiestan por los rasgos dejados en el paisaje.
Unidad geológica	Materiales que tienen una estructura similar y pertenecen a la misma formación geológica.

RESUMEN

El presente documento describe el procedimiento realizado para la caracterización geotécnica de la formación geológica que se encuentra en la ruta departamental AV-06, y comunica los municipios de Lanquín (Km 272+600) y Santa María Cahabón (Km 300+957), en el departamento de Alta Verapaz.

Se dio inicio con la recopilación de toda la información existente del área en estudio, estableciendo las características determinadas a la fecha: mapas geológicos, ensayos de laboratorio, cantidad de lluvias, historial sísmico, entre otros.

Por medio de un levantamiento topográfico de la carretera se determinó las estaciones que sirven para referenciar la información recopilada, iniciando con la caracterización geológica de los suelos a lo largo de la carretera estableciendo el inicio y final de cada tipo de suelo encontrado.

Al determinar los tipos de suelos se procedió a realizar la toma de muestras tanto de los suelos como de las rocas presentes en el área de estudio, para realizar los correspondientes ensayos.

Con los resultados de los ensayos de laboratorio se realizó una comparación en los diferentes puntos de muestreo de la formación a lo largo de la carretera, con lo que se pudo determinar toda la carretera se observa el mismo tipo de suelos y rocas en diversos puntos del área de estudio.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Guatemala no existen registros de caracterizaciones geotécnicas de las formaciones geológicas existentes, que sean accesibles y que contenga la información de los ensayos realizados a los suelos.

Este problema hace imperativo conocer las características de los materiales que se pueden encontrar al realizar la construcción de obras de infraestructura, lo cual facilitaría realizar una propuesta inicial para las obras de protección que pueden ejecutarse para la estabilización de los taludes, ubicación de bancos de material para relleno, entre otros.

Debido a la ausencia de esta información, se desperdician recursos económicos y tiempo, para realizar los ensayos de cada material para poder plantear un estudio previo de factibilidad, situación que podría facilitarse si se conocen las características a lo largo de las formaciones geológicas.

Para poder conocer estudios previos de los suelos, de forma general es necesario buscar los estudios realizados por las empresas privadas o públicas que han ejecutado proyectos en el área de estudio, los cuales se utilizan de referencia; sin embargo, éstas se realizan en el punto en específico donde se ejecuta la obra. Además, contienen únicamente ensayos de suelos, no características geotécnicas de formaciones geológicas, las cuales pueden ser encontradas en un área extensa del país.

La construcción de carreteras es el tipo de obra que puede proporcionar una abundante fuente de información, debido a que se pueden encontrar más de una formación geológica en el trazo de la misma.

Se ha seleccionado para el presente estudio el tramo vial RD AV-06 entre los municipios de San Agustín Lanquín y Santa María Cahabón, en el departamento de Alta Verapaz, debido a que se está realizando el mejoramiento de la carretera y en los cortes de los taludes quedan al descubierto las formaciones geológicas, lo cual favorece el estudio.

Por lo anterior, se planteó como pregunta principal ¿Cuáles son las características mecánicas de los materiales de las formaciones geológicas existentes en el tramo a estudiar?

Además, se tendrá clara las respuestas a las preguntas secundarias:

- ¿Cuáles son las formaciones existentes?
- ¿Cuál es el comportamiento ante la presencia de agua?
- ¿Cuál es el comportamiento frente a los agentes erosivos?

OBJETIVOS

General

Realizar la caracterización geotécnica de las formaciones geológicas existentes en la ruta vial RD AV-06 entre los municipios de San Agustín Lanquín y Santa María Cahabón, en el departamento de Alta Verapaz.

Específicos

- Identificar las distintas formaciones geológicas en el tramo vial RD AV 06.
- Determinar las características mecánicas de los materiales de las formaciones geológicas existentes.
- Evaluar el comportamiento de los materiales de las formaciones ante la acción de los agentes erosivos
- Analizar el comportamiento de los materiales de las formaciones ante la presencia de agua.

HIPÓTESIS

Los resultados de los ensayos de laboratorio de los materiales de la formación geológica analizada permitirán realizar la caracterización de la misma y sus características geotécnicas a lo largo de la carretera, en todos los puntos de muestreo.

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

Inicialmente se procedió a la recopilación bibliográfica correspondiente a las características del área de estudio, entre las cuales se puede mencionar, mapas geológicos, ensayos de laboratorio, estratigrafía del área de estudio, mapas hidrográficos, cantidad de lluvia, historial sísmico, entre otros; con lo cual se realizó una caracterización inicial del área en estudio.

Se realizó una recopilación del monitoreo de lluvia en la zona desde noviembre de 2018 hasta julio de 2021, con lo cual se realizó una comparativa con la información teórica recopilada y los datos obtenidos en campo.

Se realizó un levantamiento topográfico de la carretera, con lo cual se determinaron las estaciones bajo las cuales se realizará la referencia de la ubicación de las formaciones geológicas del área específica de estudio.

En el campo se realizó la caracterización geológica, con lo cual se determinó el número de formaciones existentes y las longitudes que éstas presentan a lo largo de la carretera; de esta forma se pudieron definir los puntos de muestreo de los materiales para su análisis, para realizar el estudio de mecánica de suelos y/o mecánica de rocas correspondiente.

A las muestras tomadas en campo se les determinaron las características mecánicas del material, por medio de los ensayos realizados a las muestras del material.

Por medio de los resultados de laboratorio obtenidos se definieron las múltiples variables que caracterizan a cada formación geológica, a lo largo de los 27 kilómetros que se analizaron.

Con los resultados de los ensayos de laboratorio se procedió a realizar una comparación de los resultados de los ensayos de la misma formación en los diferentes puntos de muestreo de la formación a lo largo de la carretera.

De tal forma que se pudo determinar si los resultados de los ensayos de laboratorio son los mismos para la formación en los diferentes puntos de muestreo, pudiendo así establecer si es posible generalizar los resultados de los ensayos para toda la formación.

Para ejecutar dicho análisis se siguieron los pasos descritos a continuación.

- Inicialmente se realizó la identificación de la longitud a lo largo de la carretera, lo cual permitió identificar las estaciones de inicio y final de las formaciones encontradas.
- Al encontrarse definidas las formaciones se procedió a determinar los puntos de muestreo de los materiales, tomando muestras inalteradas para la determinación de la humedad natural tanto de los suelos como de las rocas y muestras para ensayos de caracterización.
- Al finalizar los ensayos los resultados se organizaron por cada formación, de forma que se pudieron comparar los datos obtenidos en diferentes puntos de la misma formación para determinar si existe relación entre sí.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación realizó la caracterización geotécnica de la formación geológica Sepur ubicada en la ruta departamental AV-06, que comunica los municipios de Lanquín (Km 272+600) y Santa María Cahabón (Km 300+957), en el departamento de Alta Verapaz. Para realizarla se determinaron las propiedades físicas de los suelos que presentan dicha formación en el área descrita.

Para llevar a cabo dicha actividad, se inició con un recorrido en el cual se colocó la información de estacionamientos por medio de un levantamiento topográfico; posteriormente se realizó un recorrido en el cual se definió las principales diferencias entre los materiales presentes en el área de estudio y su ubicación de inicio y final. Al realizar este levantamiento de información se observó que los materiales presentes se encuentran formadas por muchas capas, las cuales varían de espesor a lo largo de la carretera.

Como siguiente actividad se procedió a realizar la toma de muestras tanto de suelo como de rocas para su correspondiente análisis; en dicha actividad se procedió a realizar perforaciones para toma de muestras inalteradas; sin embargo, las muestras no se obtenían intactas. Por tal motivo, se descartó la posibilidad de obtener información de sus propiedades mecánicas.

Las muestras de suelo se trasladaron al laboratorio para realizar los correspondientes ensayos, determinar sus características físicas y realizar su clasificación. Se tomó dos tipos de muestras de roca, unas se enviaron directamente al Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas para su

análisis petrográfico macroscópico y las segundas se llevaron al laboratorio para determinar su resistencia a la compresión inconfiada.

A continuación, se describen las actividades principales descritas en cada capítulo del presente trabajo de investigación.

Se realizó la recopilación bibliográfica de toda la información relacionada con las ciencias vinculadas con la caracterización geotécnica, entre las cuales se puede mencionar: geología, geografía, geología estructural, mecánica de suelos, entre otros.

Se reúne la información específica de las características específicas del área de estudio; por medio de la información recopilada se pudo determinar la geología general, así como los resultados de los ensayos de mecánicas de suelos realizados en el estudio previo del proyecto.

Se concentra la información recolectada del trabajo realizado en campo del área de estudio, la recopilación de la información geológica local y de la toma de muestras para ensayos de suelos y de rocas.

Posterior a la toma de muestras se procedió a realizar los correspondientes ensayos de mecánica de suelos necesarios para la clasificación de los suelos, así como un análisis petrográfico y compresión inconfiada de las rocas.

Finalmente, se realiza el análisis de los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio realizando la clasificación de suelos, así como la identificación y resistencia a la compresión de las rocas encontradas en el área.

1. MARCO TEÓRICO

Para realizar la caracterización de las formaciones geológicas existentes en el área de estudio, es necesario definir cuáles son las formaciones existentes, su origen y el tiempo en el que se formaron; lo cual define su composición química, su estructura y tamaño de granos.

Además, es necesario conocer las fuerzas que han estado involucradas en su formación, lo cual define la orientación de sus foliaciones y fallas existentes. Se debe conocer además su ubicación para entender su comportamiento de acuerdo al comportamiento asociado a los factores que lo afectan directamente que se encuentran en su entorno.

Por lo que a continuación se realiza una compilación de la teoría relacionada con el tema en estudio.

1.1. Geología

Sobre la definición de geología se encuentran varias versiones debido a que la misma ha evolucionado con el pasar del tiempo; a continuación, se enlistan dos de ellas.

“Ciencia que trata del origen, historia y estructura de la tierra tal como aparecen registradas en las rocas y de las fuerzas y proceso que actúan modificando éstas” (Krynine y Judd, 1961, p. 15).

Ciencia que estudia la composición, estructura, morfología y edad de los materiales que componen la tierra, en especial, a partir de la observación en las partes accesibles (Granada, 2021).

De tal forma que se puede concluir que la geología es la ciencia que estudia todo lo relacionado con la tierra, desde su formación (composición) y evolución (movimientos internos) hasta nuestro tiempo.

Al inicio del estudio de la geología se realizó una división de la misma en dos ramas importantes las cuales son la histórica y la física. La geología histórica se basa en “comprender el origen de la Tierra y su evolución a lo largo del tiempo” (Tarbuck y Lutgens, 2005, p. 2). Y la geología física: “estudia los materiales que componen la tierra y busca comprender los diferentes procesos que actúan debajo y encima de la superficie terrestre” (Tarbuck y Lutgens, 2005, p. 2).

Si se consideran éstas las ramas de la geología, ambas ramas influyen en las características de los materiales debido a que el origen y los procesos que intervienen con los mismos son los que definen su comportamiento de los materiales.

1.1.1. Tiempo geológico

Uno de los aspectos más importantes en la geología que están directamente relacionados con las características de los suelos es el tiempo, el cual en geología tiene un significado totalmente diferente al tiempo convencional, mientras para una persona normal 90 años es mucho tiempo, en la geología se considera reciente un evento de 10 millones de años.

La mayor división en la escala del tiempo se realiza en eones, los cuales han transcurrido 4 a lo largo de la historia del planeta. En la tabla I se muestran los eones desde la formación del planeta, tiempo en que se inician, desarrollo de las plantas y animales en cada una (Tarbuck y Lutgens, 2005).

Tabla I. **Eones desde la formación del planeta**

Eón	Tiempo en que inicia (millones de años)	Desarrollo de plantas y animales
Fanerozoico	540	Desarrollo de plantas, animales y seres humanos
Proterozoico	2500	Primeros organismos pluricelulares
Arcaico	3800	Primeros organismos unicelulares
Hádico	4500	Origen de la tierra

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Tarbuck y Lutgens (2005). *Ciencias de la tierra, una introducción a la geología física.*

Los eones Hádico, Arcaico y Proterozoico en conjunto de forma general se denominan la era Precámbrico, además contienen el 88 % del total del tiempo geológico (Tarbuck y Lutgens, 2005).

El eón Fanerozoico, se divide en tres eras: Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico. La era Paleozoico inicia hace 540 millones de años aproximadamente, ésta se describe en la tabla II (Tarbuck y Lutgens, 2005).

Tabla II. **Descripción de la era Paleozoica**

Tiempo en que inicia (millones de años)	Período	Época	Desarrollo de plantas y animales
290	Pérmico	Edad de los anfibios	Extinción de los trilobites y muchos otros animales marinos
323	Pensilvaniense		Primeros reptiles
354	Misisipiense		Grandes pantanos carboníferos Anfibios abundantes
417	Devónico	Edad de los peces	Primeros insectos fósiles
443	Silúrico		Peces dominantes Primeras plantas terrestres
490	Ordovícico	Edad de los invertebrados	Primeros peces
540	Cámbrico		Trilobites dominantes Primeros organismos con concha

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Tarbuck y Lutgens (2005). *Ciencias de la tierra, una introducción a la geología física.*

A los períodos Pensilvaniense y Misisipiense se les conoce como el período Carbonífero. A continuación, en la tabla III se describe la era Mesozoica la cual inició hace 248 millones de años (Tarbuck y Lutgens, 2005).

Tabla III. **Descripción de la era Mesozoica**

Tiempo en que inicia (millones de años)	Período	Época	Desarrollo de plantas y animales
248	Cretácico	Edad de los reptiles	Extinción de los dinosaurios y otras muchas especies
206	Jurásico		Primeras plantas con flores
144	Triásico		Primeras aves Dinosaurios dominantes

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Tarbuck y Lutgens (2005). *Ciencias de la tierra, una introducción a la geología física.*

Por último, la era más reciente la Cenozoica se describe en la tabla IV, la cual inicia aproximadamente hace 65 millones de años (Tarbuck & Lutgens, 2005).

Tabla IV. **Descripción de la era Cenozoica**

Tiempo en que inicia (millones de años)	Período	Época	Desarrollo de plantas y animales	
0.01	Cuaternario	Holoceno		
1.8		Pleistoceno		
5.3	Terciario	Plioceno	Edad de	Desarrollo de los seres
23.8		Mioceno	los	humanos
33.7		Oligoceno	mamíferos	Extinción de los dinosaurios
54.8		Eoceno		
65		Paleoceno		

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Tarbuck y Lutgens (2005). *Ciencias de la tierra, una introducción a la geología física*.

El tiempo de inicio de cada época descrita se determinó con técnicas de datación relativa (Tarbuck y Lutgens, 2005).

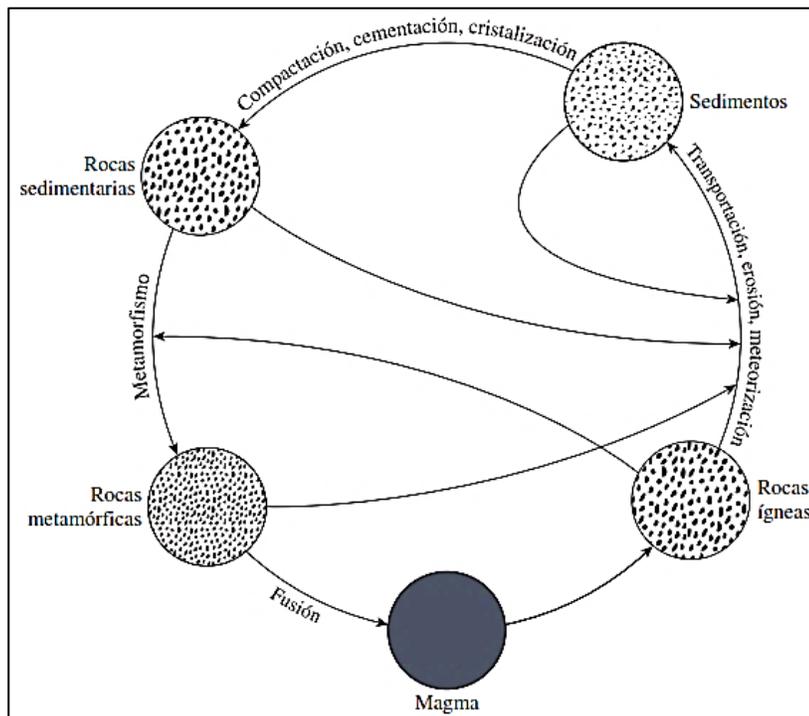
De la misma forma que han evolucionado los estudios con relación al origen y formación del planeta, a lo largo de la historia han existido muchas teorías con relación a su evolución y composición.

1.1.2. **Ciclo de las rocas**

Además de conocer el tiempo que tienen de antigüedad las rocas y los suelos, es importante conocer el proceso de su formación para identificar sus principales componentes y características, los suelos de forma general se forman

de la descomposición de las rocas, por lo que conservan sus características físicas y químicas, por tal motivo es importante conocer el origen. En la figura 1 se muestra el ciclo de las rocas.

Figura 1. **Ciclo de las rocas**



Fuente: Das (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*.

El ciclo de las rocas permite observar a detalle el movimiento constante que tienen la corteza terrestre y cómo de este movimiento se forman las rocas. La descripción del ciclo de las rocas de forma general los autores lo inician desde la roca fundida, el cual tiene el nombre de magma; éste sube desde el interior y se solidifica formando así las rocas de origen ígneo.

Las rocas se pueden clasificar de varias formas: por su origen, por su estructura, por la composición minera y por su tamaño del grano. A continuación, se describe la clasificación por su origen, las cuales pueden ser: ígneas, sedimentarias y metamórficas.

1.1.2.1. Rocas ígneas

Como se mencionó anteriormente las rocas de origen ígneo se forman cuando el magma se enfría y se solidifica el cual es conocido como el proceso de cristalización (Tarbuck y Lutgens, 2005). Cuando el magma pasa por el proceso de cristalización en el interior de la corteza terrestre, a las rocas que se forman se les denomina intrusivas y si el magma es expulsado fuera de la corteza por medio de una fisura en la superficie o por una erupción volcánica, las rocas que se forman se denominan extrusivas.

Todas las rocas que se encuentran en la superficie de la corteza experimentan la meteorización, incluidas las rocas ígneas; la cual es provocada por el agua, viento, nieve, entre otros. y llegan a degradarse hasta convertirse en sedimentos.

Debido al movimiento de las placas las rocas ígneas intrusivas pueden subir a la superficie de la corteza y sufrir la meteorización o pueden ser sometidas a grandes esfuerzos por lo que podrían transformarse en rocas metamórficas.

1.1.2.2. Rocas sedimentarias

Las meteorizaciones de las rocas forman sedimentos, los cuales pueden ser transportados y depositados en las partes más bajas de la superficie de la corteza, posteriormente pueden continuar en el proceso de erosión o pueden

volver a cristalizarse, cementarse y compactarse hasta convertirse en rocas sedimentarias.

Las rocas sedimentarias pueden volver a sufrir meteorización si se encuentran en la superficie y convertirse nuevamente en sedimentos o pueden ser sometidas a grandes esfuerzos y convertirse en rocas metamórficas.

1.1.2.3. Rocas metamórficas

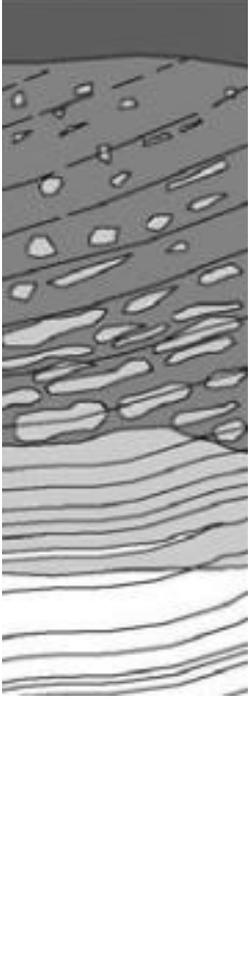
Las rocas metamórficas se forman debido a la presión y altas temperaturas a las que son sometidas las rocas sedimentarias o ígneas.

Las rocas metamórficas que suben a la superficie sufren meteorización y pueden convertirse en sedimentos continuando así en el ciclo o pueden fundirse en la corteza y convertirse nuevamente en magma para continuar con el ciclo.

1.1.3. Grado de meteorización

Para determinar el grado de meteorización de los macizos rocosos, los cuales pueden degradarse hasta convertirse en suelos residuales, existen diferentes métodos; para este trabajo de investigación se utilizará como referencia la escala establecida por la *International Society of Rock Mechanics* (ISRM), la cual se describe en la tabla V.

Tabla V. **Escala de meteorización establecida por la ISRM**

Grado de Meteorización	Ilustración	Descripción del Material
VI – Suelo residual		<p>Todo el macizo rocoso se ha transformado en suelo residual. Se ha destruido la estructura original del macizo y la fábrica del material.</p>
V – Completamente meteorizada		<p>Todo el macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo, Se conserva la estructura original del macizo rocoso.</p>
IV – Altamente meteorizada		<p>Más de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados.</p>
III – Moderadamente meteorizada		<p>Menos de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados.</p>
II – Ligeramente meteorizada		<p>La decoloración indica alteración del material rocoso y de las superficies de discontinuidad. Todo el conjunto rocoso está decolorado por meteorización.</p>
I – Roca fresca		<p>No aparecen signos de meteorización. Sólo se observa una decoloración ligera en las principales superficies de discontinuidad.</p>

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Micheo (2022). *La meteorización de los granitoides de Les Guilleries y su tratamiento en el mapa geológico de los procesos activos y recientes y de la actividad antrópica de Cataluña a escala 1:25000 (Mapa Geoantrópico).*

1.1.4. Geología estructural

Es la parte de la geología que se dedica al estudio de la corteza terrestre, su estructura y la relación con las rocas que contiene estudia también las deformaciones que se presentan en las estructuras y fallas.

1.1.4.1. Estructura geológica

Una estructura geológica es una masa de roca o suelo que se ubica en la corteza terrestre y ocupa un volumen determinado. Las estructuras geológicas principales se forman de diversas estructuras pequeñas (Harvey, 1993).

Los esfuerzos a los que son sometidas las estructuras geológicas dan lugar a los pliegues y fallas de las mismas. De acuerdo a la orientación de los esfuerzos y de las características del material serán el tipo de modificaciones que sufrirá la estructura.

Las estructuras geológicas pueden estar sometidas a esfuerzos de compresión, los cuales están asociadas con el choque de las placas tectónicas (bordes convergentes). Cuando esto sucede en las estructuras se forman pliegues de diferentes dimensiones, en los lugares donde se encuentran planos de debilidad se presentan fallas y en algunas partes los estratos aumentan de tamaño.

La corteza puede ser sometida a esfuerzos de tensión, los cuales están asociados con los bordes divergentes de las placas tectónicas. Cuando las estructuras se encuentran sometidas a este tipo de esfuerzos los estratos tienden a disminuir su tamaño.

También puede someterse a esfuerzos de cizalla, los cuales están asociados a los bordes transformantes. Cuando las placas han sido sometidas a este tipo de esfuerzos se puede observar desplazamientos a lo largo de la línea de unión de las mismas.

1.1.4.2. Dirección y buzamiento

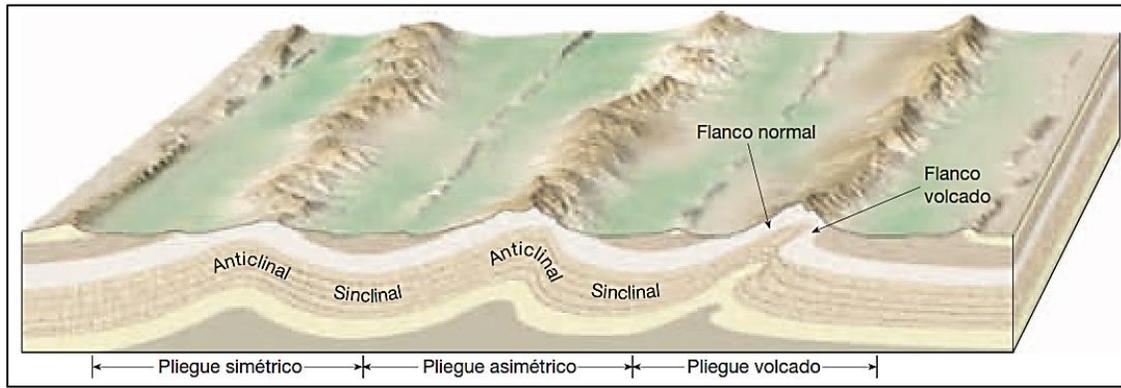
Se utilizan ángulos para poder orientar las formaciones geológicas, los cuales describen la dirección y la inclinación de la formación en estudio.

La dirección de una formación se define por medio del rumbo, el cual es el ángulo contenido entre la línea que tiene el norte magnético y la línea que se obtiene de la intersección del estrato o falla con un plano imaginario horizontal. La inclinación del plano se define por el buzamiento, que es el ángulo medido desde un plano horizontal hasta el plano medido.

1.1.4.3. Pliegues

Debido a las fuerzas de compresión se pueden formar dos tipos de pliegues. Un pliegue anticlinal tiene la forma convexa y un pliegue sinclinal es cóncavo, además pueden clasificarse como simétricos (cuando ambos lados son iguales), asimétricos (cuando ambos lados no son iguales) y volcado (cuando uno de los lados está inclinado respecto a la vertical). Los tipos de pliegues se muestran en la figura 2.

Figura 2. Tipos de pliegues

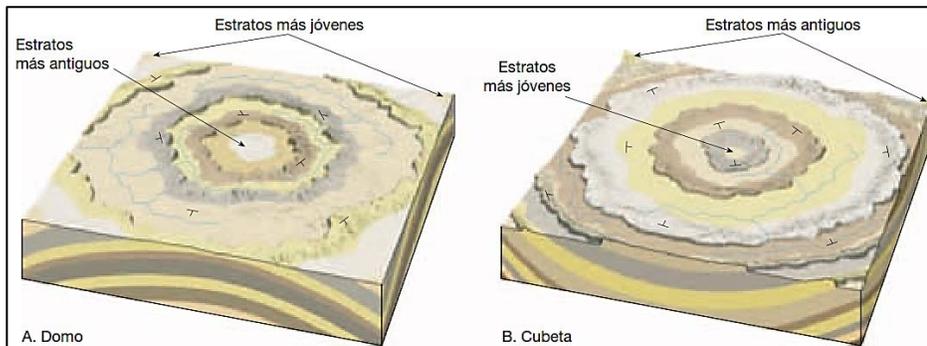


Fuente: Tarbuck y Lutgens (2005). *Ciencias de la tierra, una introducción a la geología física*.

1.1.4.4. Domos y cubetas

Otras estructuras que se forman por el levantamiento de rocas profundas que deforman la cubierta a estas estructuras se les denomina domos, las estructuras que tienen forma similar, pero son descendentes se les denomina cubetas. En la figura 3 se muestra un domo y una cubeta.

Figura 3. Domo y cubeta



Fuente: Tarbuck y Lutgens (2005). *Ciencias de la tierra, una introducción a la geología física*.

1.1.4.5. Fallas y fracturas

Se denominan fallas a las fracturas que se presentan en la corteza en donde se observa un desplazamiento considerable, las fallas pueden presentarse en un área en específico o pueden presentarse en grandes áreas. De forma general las fallas se consideran activas cuando se presentan movimientos repentinos y se presentan sismos, las fallas que no tienen movimientos se llaman inactivas.

Existen fallas que presentan un desplazamiento vertical, éstas fallas se pueden clasificar en normales e inversas.

1.2. Clasificación de los suelos

Todas las formaciones existentes en la corteza están formadas por suelos y rocas por lo que es importante realizar la clasificación de ambos. Para su uso en ingeniería los suelos se clasifican de acuerdo al tamaño de sus granos, siendo estos: gravas, arenas, limos y arcillas.

Las gravas son los materiales que contienen granos con un tamaño que varía entre 8 cm y 10 cm, tienen grandes vacíos entre sus partículas y no retienen agua; las arenas tienen partículas entre 2 mm y 0.06 mm. Los limos se forman de partículas entre los 0.06 mm y 0.02 mm retienen una pequeña capacidad de retener agua, sin embargo, la expulsan con facilidad; y por último las arcillas están formadas por partículas menores a 0.02mm retienen agua en su interior y son suelos con plasticidad debido al agua que pueden contener (Tarbuck y Lutgens, 2005).

De forma general las gravas y arenas se pueden clasificar a simple vista, sin embargo, en la naturaleza es difícil encontrar depósitos de uno solo de los

materiales a excepción de las arenas las cuales es muy común encontrarlas en las orillas de los cuerpos de agua.

1.2.1. Métodos de clasificación de los suelos

Para poder realizar la clasificación de los suelos que de forma general se encuentren en Guatemala se utiliza el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) o el método AASHTO.

1.2.1.1. Clasificación en el sistema unificado

Para realizar la clasificación por medio del sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), se analiza la cantidad de granos que pasan las mallas No. 200 (75 μm) y No. 4 (4.75 mm), además de los límites de Atterberg, para éste sistema de clasificación se pueden clasificar los suelos como: grava, arena, limo, arcilla y orgánico; y por supuesto todas las combinaciones posibles entre estas clasificaciones, ya que, en estado natural, es muy difícil encontrar individualmente cada tipo de suelo. Además, indica si los suelos son plásticos o altamente plásticos (ASTM, 1993).

Para realizar la clasificación por medio del método establecido en el método SUCS, se utiliza la normativa descrita en ASTM D2487 práctica estándar clasificación estándar de suelos para fines de ingeniería (sistema unificado de clasificación de suelos) (ASTM, 1993).

Para poder realizar la clasificación en este sistema es necesario conocer la simbología utilizada para clasificar a los suelos, los cuales se describen en la tabla VI.

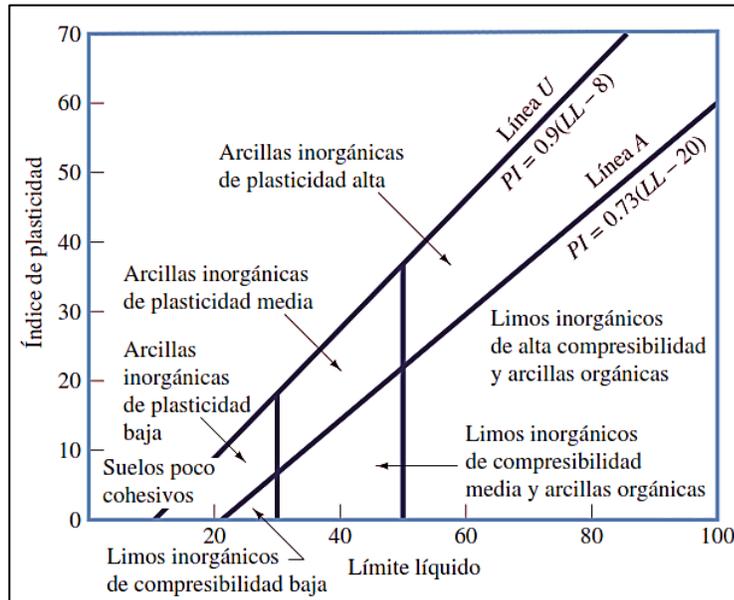
Tabla VI. **Simbología para la clasificación de suelos por el método SUCS**

Descripción	Símbolo
Grava	G
Arena	S
Limo	M
Arcilla	C
Orgánico	O
Bien graduado	W
Pobrementemente graduado	P
Limoso	M
Arcilloso	C
Alta	L
Baja plasticidad	H

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La clasificación se realiza determinando el tipo de suelo y el subgrupo al cual pertenece, por lo que se necesita determinar el porcentaje de material que pasa por el tamiz #200, si éste es $> 50 \%$ se considera un suelo fino, si el porcentaje es $< 50 \%$ se considera un suelo grueso.

Figura 4. Carta de plasticidad de Casagrande



Fuente: Das (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*.

Cuando se determina que los suelos son finos (el material que pasa el tamiz #200 > 50 %), se proceda a realizar una revisión de la plasticidad del mismo, resultado que permitirá concluir la clasificación del suelo en análisis. Determinar la plasticidad permite clasificar el tipo de arcillas que se analizan, para esto se debe utilizar la carta de plasticidad, la cual se muestra en la figura 4 mostrada con anterioridad.

Para el caso de los suelos gruesos (el material que pasa el tamiz #200 < 50 %) se proceda a realizar otra clasificación, de acuerdo con el porcentaje que pasa el tamiz No. 4. Si el porcentaje que pasa el tamiz No. 4 es > 50 % se tendrán principalmente arenas, si el porcentaje que pasa el tamiz No. 4 es < 50 % se tendrán gravas.

Posterior a la determinación si el material es arena o grava se proceda a realizar un análisis del porcentaje de suelo que pasa el tamiz # 200 (porcentaje de finos), para continuar con la clasificación, en cuyo caso se pueden obtener los siguientes resultados:

- Pasa #200 < 5 % esto indica que el material contiene grava la cual puede ser pobremente graduada o bien graduada, lo que se define dependiendo del resultado del resto de ensayos.
- 5 % < pasa #200 < 12 % significa que el material puede ser una arena o una grava, que contiene partículas de limo o de arcilla y pueden estar pobremente o bien graduada.
- Pasa #200 > 12 % en ese caso el material puede ser arena o grava, limosa o arcillosa.

Para definir el grupo en el que se ubica el suelo se analizarán los siguientes criterios:

- Granulometría: en el caso que el material se clasifique como una arena o una grava, se puede determinar si ésta es bien graduada de acuerdo al resultado del coeficiente de uniformidad, el cual permite evaluar la uniformidad del tamaño de los granos por medio de la curva granulométrica. El coeficiente de uniformidad es la relación entre el tamaño por el cual pasa el 60 % del material en peso y el tamaño por el cual pasa el 10 % del material en peso; si el coeficiente de uniformidad es > 6 y el coeficiente de curvatura se encuentra entre 1 y 3; si en caso el material se clasifica como grava se pueden determinar si ésta es bien

graduada si el coeficiente de uniformidad es > 4 y el coeficiente de curvatura se encuentra entre 1 y 3.

- Plasticidad: se debe analizar la parte del suelo que corresponde a los finos de acuerdo a la carta de plasticidad de Casagrande para determinar el tipo de partículas que tiene el suelo.

De tal manera, que no importa el sistema de clasificación que se utilice siempre debe realizarse como mínimo los siguientes ensayos para poder clasificar los suelos:

- AASHTO T-27 Método de prueba estándar para el análisis por tamizado de agregados finos y gruesos.
- AASHTO T-89 Método estándar de prueba para determinar el límite líquido de suelos.
- AASHTO T-90 Método estándar de prueba para determinar el límite de plástico y el índice de plasticidad de los suelos.

Sin embargo, para realizar un análisis geotécnico de los suelos, se necesita realizar, un ensayo que proporcione sus características mecánicas como el indicado a continuación:

- AASHTO T-236 Método estándar de prueba para pruebas de corte directo de suelos en condiciones drenantes consolidadas.

De tal manera, que los 4 ensayos son los mínimos a realizar en cada muestra de material tomada de cada estrato donde se trabaje, para poder determinar sus principales características mecánicas y físicas.

1.2.1.2. Clasificación AASHTO

Para llevar a cabo una clasificación de suelos por medio del método establecido por la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) se utiliza la normativa descrita en AASHTO M-145 Práctica estándar para la clasificación de suelos y mezclas de suelos agregados para la construcción de carreteras, se verifica en la granulometría, los granos que pasan las mallas No. 10 (2 mm), No. 40 (0.425 mm) y No. 200 (75 μ m); además, se analizan los resultados de los ensayos de límites de Atterberg. Este sistema clasifica los suelos en granulares o finos, en los cuales los finos pueden ser limos o arcillas (AASHTO, 2008a).

Se debe analizar el resultado obtenido de pasa en el tamiz No. 200 en la granulometría y si el resultado es $> 35\%$ el material se clasificará como un suelo fino, o si es $\leq 35\%$ será un suelo clasificado como granular, posteriormente se realizan los ensayos de plasticidad. Si el material es granular tiene un 35 % o menos de su masa total pasa el tamiz No. 200 se clasifica de acuerdo a lo que se muestra en la tabla VI. De forma general los materiales contenidos en esta clasificación, se puede decir que su valoración es de excelente a bueno.

Los materiales A-1 contienen fragmentos de roca, grava y arena, los A-3 generalmente son arenas finas y los del grupo A-2 son limos o gravas arcillosas y arena. A continuación, en la tabla VII, se muestra la clasificación AASHTO para suelos granulares.

Tabla VII. **Clasificación AASHTO para suelos granulares**

Resultado de ensayos de laboratorio	Grupo de clasificación						
	A-1		A-3	A-2			
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
No. 10 (porcentaje que pasa)	50 máx.						
No. 40 (porcentaje que pasa)	30 máx.	50 máx.	51 máx.				
No. 200 (porcentaje que pasa)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Límite líquido (material pasa No. 40)				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de plasticidad (material pasa No. 40)	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.

Fuente: Das (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*.

Si el material es fino es decir tiene un 35 % o más de su masa total pasa el tamiz No. 200 se clasifica de acuerdo a lo indicado en la tabla VIII.

Tabla VIII. **Clasificación AASHTO para suelos finos**

Resultado de ensayos de laboratorio	Grupo de Clasificación			
	A-4	A-5	A-6	A-7
				A-7-5 (a) A-7-6 (b)
No. 10 (porcentaje que pasa)				
No. 40 (porcentaje que pasa)				
No. 200 (porcentaje que pasa)	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Límite líquido (material pasa No. 40)	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de plasticidad (material pasa No. 40)	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.

Fuente: Das (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*.

De forma general se puede decir que los suelos finos van de regulares a malos.

Los suelos A-4 y A-5 son limosos, mientras que los A-6 y A-7 son arcillosos. Para que un suelo sea A-7-5 (a) se debe cumplir con: $IP \leq LL - 30$ y para que un suelo sea A-7-6 (b) se debe cumplir con: $IP > LL - 30$.

1.2.2. Ensayos de clasificación

Para clasificar el tipo de suelos se deben realizar los ensayos descritos a continuación.

1.2.2.1. Granulometría

Para determinar la distribución cuantitativa de los tamaños de los granos en un suelo se utiliza la normativa establecida en AASHTO T-89 el cual indica el procedimiento a ejecutar para realizar la clasificación de una masa de suelo de acuerdo a la distribución de sus granos el cual se expresa como un porcentaje de la masa total de suelo. Para realizar la separación de los diferentes tamaños de partículas se utilizan tamices que sirven para clasificar los diferentes tamaños y por medio del uso de una balanza se determina el peso que queda retenido en cada uno de los tamices (AASHTO, 2008e).

En el ensayo se determina la masa total de la muestra y la masa retenida en cada tamiz, con lo cual se determina el porcentaje que pasa el tamiz indicado y el porcentaje retenido por el mismo.

1.2.2.2. Límite líquido

El ensayo descrito en la normativa AASHTO T-89 Método estándar de prueba para determinar el límite líquido de suelos, se utiliza para determinar el contenido de humedad (en porcentaje) de un suelo donde el mismo se

encuentran entre los estados líquido y plástico, lo cual se denomina límite líquido (AASHTO, 2008e).

La norma describe el procedimiento a utilizar el cual consiste en tener una mezcla uniforme de suelo y agua que permita formar una pasta, la cual es colocada en un recipiente utilizando una espátula para distribuir la masa de suelo en el fondo, de tal manera que se forme un círculo en el fondo con la masa de suelo cuyo espesor en su punto máximo sea de 10 mm en teniendo el cuidado de que no existan burbujas de aire.

Con un ranurador se realiza una ranura a lo largo del diámetro del círculo de la superficie dividiendo la pasta de suelo en dos.

Posteriormente se procede a golpear el recipiente a velocidad constante hasta lograr que en el fondo ambas partes se unan a lo largo de aproximadamente 13 mm y se registra el número de golpes con lo que se logra dicha unión, si el número de golpes es muy pequeño se debe agregar material seco para endurecer la masa, si el número de golpes es muy grande se añada agua hasta lograr un número con el cual se pueda determinar el factor correspondiente de los indicados en las tablas de la normativa el cual se utilizará para determinar el límite líquido.

Al lograr dicho objetivo se determina el porcentaje de humedad con el cual se logra realizar la unión de las dos partes y se procede al cálculo utilizando el factor determinado por el número de golpes determinado.

1.2.2.3. Límite plástico

El ensayo descrito en la normativa AASHTO T-90 Método estándar de prueba para la determinación del límite plástico y el índice de plasticidad de los suelos, se realiza para determinar en porcentaje el contenido de humedad más bajo de un suelo, donde el mismo se encuentran en el estado plástico, lo cual se denomina límite plástico (AASHTO, 2008f).

De forma general este ensayo se ejecuta de forma manual y consiste en elaborar rollos como la normativa indicada, el procedimiento consiste en hacer rodar una pequeña cantidad de la masa de suelo entre la palma de la mano y/o los dedos, sobre una superficie la cual debe estar en una posición horizontal, debe ser lisa y puede estar formada de papel o vidrio esmerilado aplicando una fuerza adecuada para formar un rollo con el suelo, el cual vaya disminuyendo su diámetro hasta alcanzar los 3 mm; dicho procedimiento debe realizarse en no más de dos minutos.

La cantidad de agua necesaria que permite realizar dichos rollos de material es la que permite al material conservar el estado plástico, los rollos del material se colocan en recipientes cerrados previamente pesados para que no pierdan la humedad y se colocan en por lo menos dos recipientes realizando los rollos necesarios para obtener un aproximado de 8 gramos o más de material para colocarlo en el horno y secar el material a peso constante, para obtener la humedad en porcentaje que determina el límite plástico.

1.2.2.4. Índice de plasticidad

El ensayo descrito en la normativa AASHTO T-90 Método estándar de prueba para la determinación del límite plástico y el índice de plasticidad de los

suelos, se utiliza para determinar el índice de plasticidad de los suelos; el cual es el rango o intervalo de humedad necesario en el que el suelo mantiene su estado plástico. El índice de plasticidad se determina al determinar la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico.

1.2.3. Ensayo de caracterización de los suelos

Además de los ensayos de clasificación de los suelos, es necesario realizar un ensayo que permita determinar las características mecánicas de los mismos, el cual sirve para estimar las respuestas que el suelo pueda presentar al estar sometido a esfuerzos. A continuación, se describe el ensayo que se realizará a los suelos, según el caso de estudio.

1.2.3.1. Ensayo de densidad-humedad (Proctor)

Para determinar la humedad óptima de un suelo, en la cual puede alcanzar su máxima densidad se utiliza el ensayo conocido como Proctor, el cual está descrito en la normativa AASHTO T180 Método estándar de prueba para las relaciones humedad-densidad de los suelos utilizando un martillo de 4.54 kg (10 lb) con altura de 457 mm (18 pulgadas).

El ensayo consiste en compactar una muestra de suelo con una determinada cantidad de agua, el molde se llena en cinco capas de material con 25 golpes cada una con el martillo indicado. Posteriormente se determina el peso unitario seco resultante.

Este procedimiento se repite variando la cantidad de agua en el material, determinando así una curva que relaciona el peso seco con la humedad del

material. Los valores de peso unitario seco máximo y humedad óptima se determinan de la gráfica de relación densidad-humedad.

1.2.3.2. Ensayo de equivalente de arena (EA)

Para determinar el equivalente de arena de un suelo, se sigue el procedimiento descrito en la normativa AASHTO T176 Método estándar de prueba para finos plásticos en agregados clasificados y suelos mediante el uso de la prueba de arena equivalente.

El ensayo consiste en preparar una muestra de suelo la cual debe pasarse por el tamiz de 4.75 mm (No. 4), todos los finos que puedan quedar adheridos al tamiz deben agregarse a la muestra de suelo.

El suelo a ensayar se medirá en un recipiente metálico de capacidad de 85 ml, el cual se debe colocar en el cilindro graduado con la ayuda de un embudo posteriormente a que el mismo se llene con la solución hasta una altura de 101.6 ± 2.54 mm. Se golpea con la palma de las manos la base del cilindro para que se liberen las burbujas de aire y se pueda poner en remojo el suelo.

Se debe dejar en reposo la muestra por 10 minutos, después de haber transcurrido ese tiempo se afloja el material del fondo y se procede a tapar el cilindro y a agitar la muestra 90 ciclos en aproximadamente 30 segundos. Inmediatamente después se coloca el cilindro sobre una superficie plana y se retira el tapón.

Inmediatamente se procede a irrigar la muestra introduciendo el tubo en el cilindro y lavando el material que se encuentra en las paredes y llenando el

cilindro hasta una altura de 381 mm. Posteriormente se reposa la muestra por 20 min \pm 15 s.

Al finalizar el tiempo del reposo, se lee y anota el nivel de las arcillas la cual se determina por el nivel superior donde se encuentran los suelos en suspensión. Finalmente se introduce el sobrepeso que permite realizar la lectura de las arenas, la cual se tomará donde el disco toque el cilindro graduado restando 254 mm del nivel marcado en el borde superior lo cual registra la lectura de arenas.

1.2.3.3. Ensayo CBR

El ensayo de relación de soporte de California (*California Bearing Ratio*, CBR) es el ensayo por medio del cual se determina un índice de resistencia al corte en muestras de suelos, las cuales se realizan con una humedad y compactación específicas. En la mayoría de los casos se utiliza para evaluar los materiales de las subrasantes, subbases y bases de los proyectos carreteros, pero puede utilizarse también para materiales que se pretenden utilizar en rellenos y terraplenes. Para realizar este ensayo se sigue el procedimiento indicado en la normativa AASHTO T-193 Método estándar de prueba para la relación de carga de California.

El procedimiento consiste en elaborar tres especímenes de tal forma que su densidad varía entre el 95 % y el 100 % de su densidad máxima (determinado en el ensayo Proctor), se debe llenar el molde en cinco capas, posteriormente se determina masa del molde y del material.

A continuación, se procede a colocar los sobrepesos al molde, se coloca el trípode para determinar la lectura inicial, y se sumerge en agua. Se registran las lecturas cada 24 horas, al finalizar el proceso de remojo se realiza el cálculo del

hinchamiento del material y se escurren los moldes, se retiran las sobrecargas y se pesa nuevamente el peso del molde.

Finalmente se colocan nuevamente las sobrecargas y se procede a realizar el ensayo en la prensa de compresión, y con los resultados se procede a calcular la relación de soporte de California.

1.2.3.4. Corte directo

El ensayo de corte directo es un ensayo que proporciona como resultado el ángulo de fricción interna y la cohesión del suelo, éste se realiza siguiendo la normativa indicada en AASHTO T-236 Método estándar de prueba, para pruebas de corte directo de suelos en condiciones drenantes y consolidadas.

El ensayo se lleva a cabo colocando una muestra de suelo, la cual puede ser remoldada, inalterada o compactada en un dispositivo, a esta se le coloca una carga vertical conocida, posteriormente se colocan los medios de drenaje y se humedece la muestra la cual se consolida por medio de la aplicación de una carga normal.

La muestra se libera del marco que la sostiene y se procede a la aplicación de las fuerzas que provocan la falla por corte en la muestra ensayada.

De forma general se ensayan más de tres muestras, las cuales se someten a diferentes cargas normales, para determinar los diferentes comportamientos con la variación de las fuerzas actuantes.

1.3. Toma de muestras

Una de las actividades más importantes a realizar en el sitio de estudio es la recolección de muestras para ensayos en laboratorio, debido a que se debe tener un cuidado extremo con las mismas, debido a que este puede ser un factor determinante para garantizar la veracidad de los resultados de los ensayos.

Se debe considerar la realización de calicatas o pozos de exploración (manuales) donde el material permita la excavación sin maquinaria, además en los lugares donde no puede acceder la maquinaria para realizar pozos mecánicos puede considerarse también la posibilidad de realizar perforaciones manuales, para garantizar el análisis de todos los materiales en estudio; sin embargo, no debe ponerse en riesgo la integridad del personal que realiza la toma de muestras.

1.3.1. Muestras alteradas

La obtención de las muestras alteradas se debe realizar para recolectar una cantidad de material significativo y representativo de cada uno de los materiales existentes, es necesario tener una identificación adecuada, así como el cuidado que las muestras no se contaminen, se denominan muestras alteradas porque el material recolectado ya no conserva la humedad del sitio donde fue tomada ni la orientación; sin embargo, conserva todas las características mecánicas.

1.3.2. Muestras inalteradas

La toma de muestras inalteradas no es posible al 100 % debido a que los materiales que sufren una intervención ya se consideran alterados; sin embargo,

existen procedimientos y métodos por medio de los cuales se puede minimizar la alteración de las muestras de suelo.

De forma general la toma de muestras consideradas inalteradas permite la determinación de varios parámetros que permiten conocer el estado natural de los suelos, los cuales se describirán más adelante.

2. DESCRIPCIÓN ESPECÍFICA DEL PROYECTO

2.1. Geografía

El área en estudio está localizada en el oriente del departamento de Alta Verapaz, geográficamente se ubican entre los municipios de Lanquín y Cahabón, los cuales se muestran en la figura 5.

Figura 5. Ubicación geográfica del área de estudio



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Instituto Geográfico Nacional. (2001).
Información geológica de Guatemala.

2.2. Descripción y delimitación del área

El análisis de las formaciones geológicas se realizará a lo largo de la carretera que inicia en la cabecera municipal de Lanquín, y finaliza en la población de Cahabón, A. V. El tramo carretero tiene una longitud aproximada de 28.357 km sobre el camino existente RD AV-06, de la longitud total aproximadamente 9.00 Km se encuentran en el municipio de Lanquín y el resto sobre el Municipio de Cahabón dicha longitud de la carretera se muestra en la figura 6.

Figura 6. **Ubicación municipal del área de estudio**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Instituto Geográfico Nacional. (2001).

Información geológica de Guatemala.

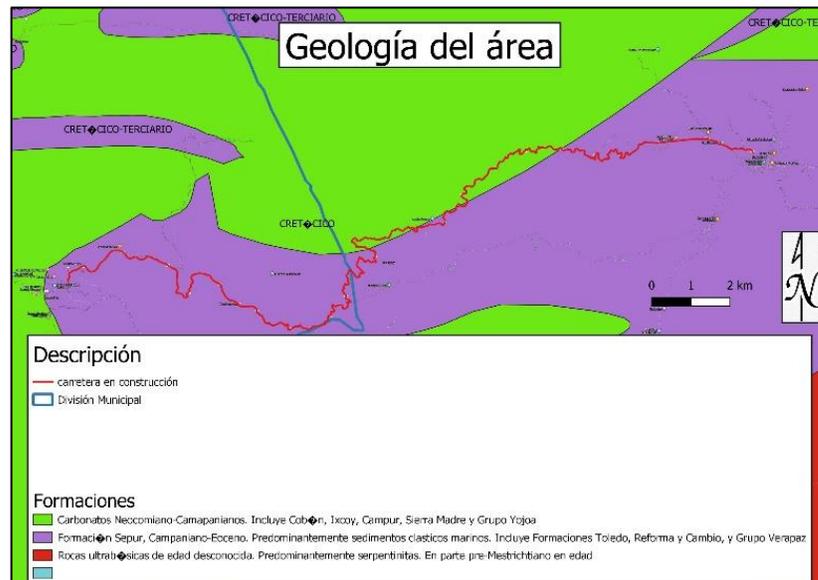
El análisis de las características mecánicas de los suelos, de las formaciones geológicas que se encuentran a lo largo de la carretera, se realizará en los cortes de los taludes que quedan al descubierto debido a los trabajos de

mejoramiento de la carretera que se están realizando, lo cual facilitó la identificación de las diferentes formaciones.

2.3. Geología encontrada en la bibliografía

De la base de datos del año 2001 del Instituto Geográfico Nacional (IGN) se obtuvo la información preliminar de las formaciones geológicas del área en análisis; de acuerdo a lo indicado en los mapas, los suelos de los Municipios de Lanquín y Cahabón se formaron entre los períodos Cretácico (248 millones de años) y Terciario (5.3 millones de años) con la distribución mostrada en la figura 7. Además, se muestra la ubicación de la carretera en un área donde los materiales pueden ser: Carbonatos del período Neocomiano-camapanianos y materiales cuya formación se dio en el período Campaniano-eoceno.

Figura 7. Geología del área de estudio



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Instituto Geográfico Nacional. (2001).

Información geológica de Guatemala.

Los suelos que se definen como Carbonatos del período Neocomiano-camapanianos incluyen las formaciones: Cobán, Ixcoy, Campur, Sierra Madre y Grupo Yojoa. Y los suelos que se formaron en el período Campaniano-eoceno incluyen la formación Sepur, Toledo, Reforma y Cambio y Grupo Verapaz.

La formación Cobán es una caliza dolomítica masiva altamente recristalizada, la cual se formó en el período Cretácico. La formación Campur es una caliza de grano fino con debris de rudistas localmente abundantes, pueden contener también conglomerados, limolita, brecha de caliza, lutita y dolomita (Donnelly, Horne, Finch y López Ramos, 2021).

El grupo Ixcoy se forma o define en donde no se puede diferenciar entre las formaciones Cobán y Campur y la Sierra Madre es correlación de las capas Cobán más Campur en México (Donnelly, Horne, Finch y López Ramos, 2021). El grupo Yojoa se encuentra compuesto de cuatro formaciones: Cantarranas, Atima, Guare del Cenomaniano y la Ilima, las cuales se encuentran ubicadas al oeste de Honduras.

Las formaciones: Sepur, Toledo, y Cambio se componen de grauvacas las cuales son rocas sedimentarias cuyos granos se encuentran formados por cuarzo y feldespato. La formación Reforma son lutitas arcillosas y el Grupo Verapaz está formado por las formaciones Chemal, Sepur y Lacandon.

De acuerdo a la descripción geográfica de las formaciones mencionadas en el mapa elaborado con la información del Instituto Geográfico Nacional se puede deducir que las formaciones que pueden encontrarse en el área en análisis son las formaciones Cobán, Campur, Grupo Ixcoy y Sepur.

Por medio de la Unidad de Acceso a la Información de la Dirección General de Caminos, se tuvo acceso al Informe de Ingeniería que sirvió de base para el diseño del proyecto: Mejoramiento carretera RDAV 06 Tramo: Lanquín – Cahabón. En dicho informe, la empresa Central Consultant Inc., realizó la determinación de las formaciones existentes en el lugar de estudio.

Tabla IX. **Información teórica de las formaciones existentes**

De	A	Formación
0+000	6+600	Campur
6+614	6+650	Sepur
7+430	7+460	Sepur
7+590	7+640	Sepur
7+940	7+950	Sepur
8+620	8+660	Sepur
9+180	9+420	Sepur
9+500	15+000	Sepur
15+060	16+230	Campur
16+230	16+270	Depósitos Cuaternarios
16+270	27+620	Sepur

Fuente: Dirección General de Caminos (2016). *Informe final estudio de ingeniería mejoramiento de carretera RD AV-06 Tramo: Lanquín - Cahabón.*

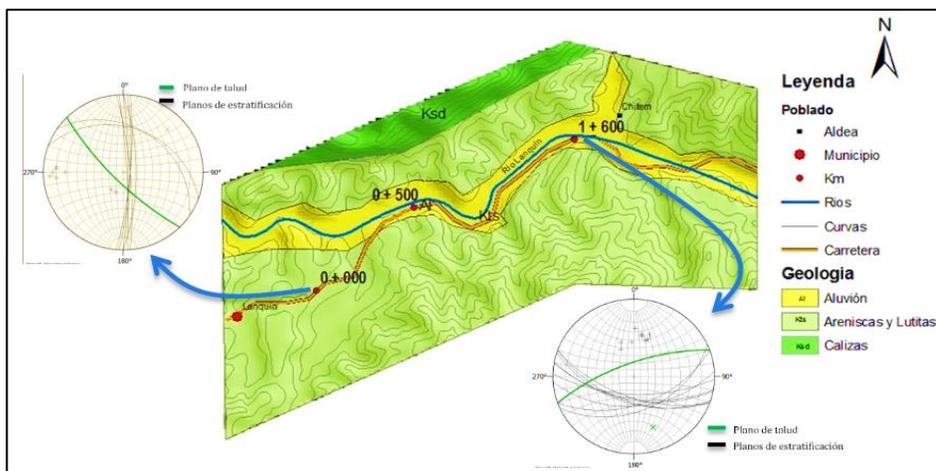
En la tabla IX se muestra el resumen de la información encontrada, la cual fue tomada del Informe se encuentra el Estudio Geológico, en el cual se refleja la información geológica descrita con anterioridad que fue tomada de la Base de Datos del IGN, donde se realiza un resumen de las estaciones donde las formaciones: Sepur, Campur y Depósitos cuaternarios se ubican a lo largo de la carretera.

2.3.1. Geología estructural encontrada en la bibliografía

Dentro del Informe de Ingeniería que sirvió de base para el diseño del proyecto: mejoramiento carretera RD AV 06 tramo: Lanquín – Cahabón, se encuentra un análisis estructural de las formaciones en 4 puntos diferentes, cuyas estaciones son: 0+000, 1+600, 3+800 y 6+250.

Los resultados del análisis y la ubicación de las estaciones 0+000 y 1+600 se muestran en la figura 8, donde se puede observar que en ambos casos se muestra una relación favorable para la estabilidad de los taludes en esos puntos con relación a los planos de la estratificación, en la figura se indica la geología general, sin embargo, no indica la formación geológica a la cual pertenece.

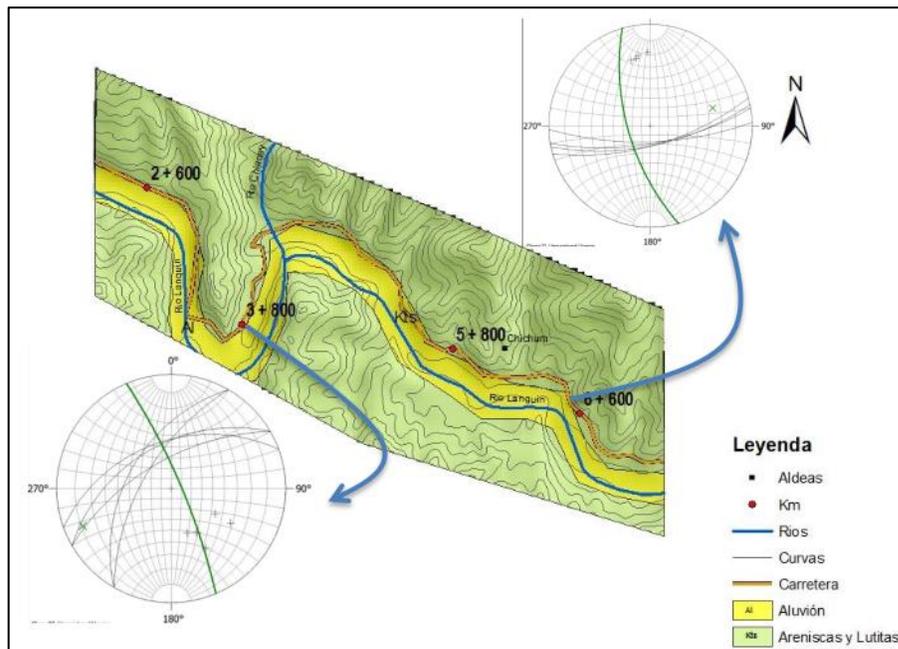
Figura 8. **Análisis estructural de las estaciones 0+000 y 1+600**



Fuente: Dirección General de Caminos (2016). *Informe final estudio de ingeniería mejoramiento de carretera RD AV-06 Tramo: Lanquín - Cahabón.*

Los resultados del análisis y la ubicación de las estaciones 3+800 y 6+250 se muestran en la figura 9, donde se indica la geología general, sin embargo, no indica la formación geológica a la cual pertenece.

Figura 9. **Análisis estructural de las estaciones 3+800 y 6+250**



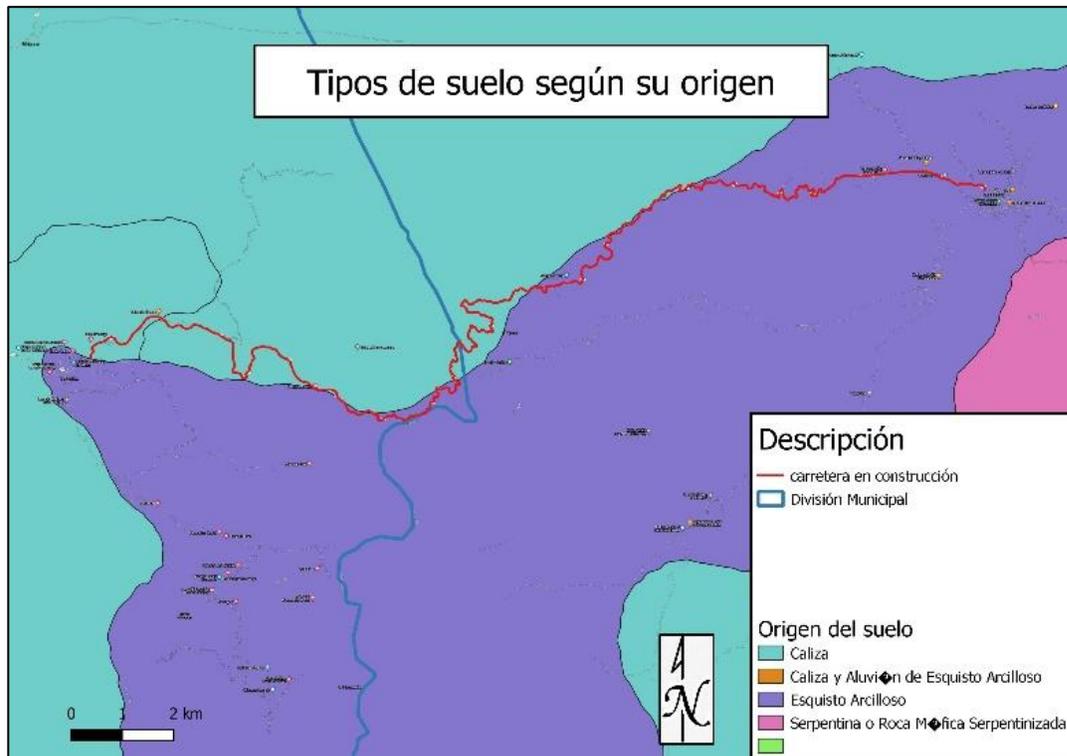
Fuente: Dirección General de Caminos (2016). *Informe final estudio de ingeniería mejoramiento de carretera RD AV-06 Tramo: Lanquín - Cahabón.*

2.4. Clasificación del suelo según su origen

Tomando como base la información del IGN se puede decir que la carretera atraviesa una formación sedimentaria en el caso de las calizas y una formación metamórfica en el caso de los esquistos arcillosos.

Como se puede observar en la figura 10 la carretera se ubica sobre dos tipos de materiales: calizas y esquistos arcillosos.

Figura 10. Tipos de suelo según su origen



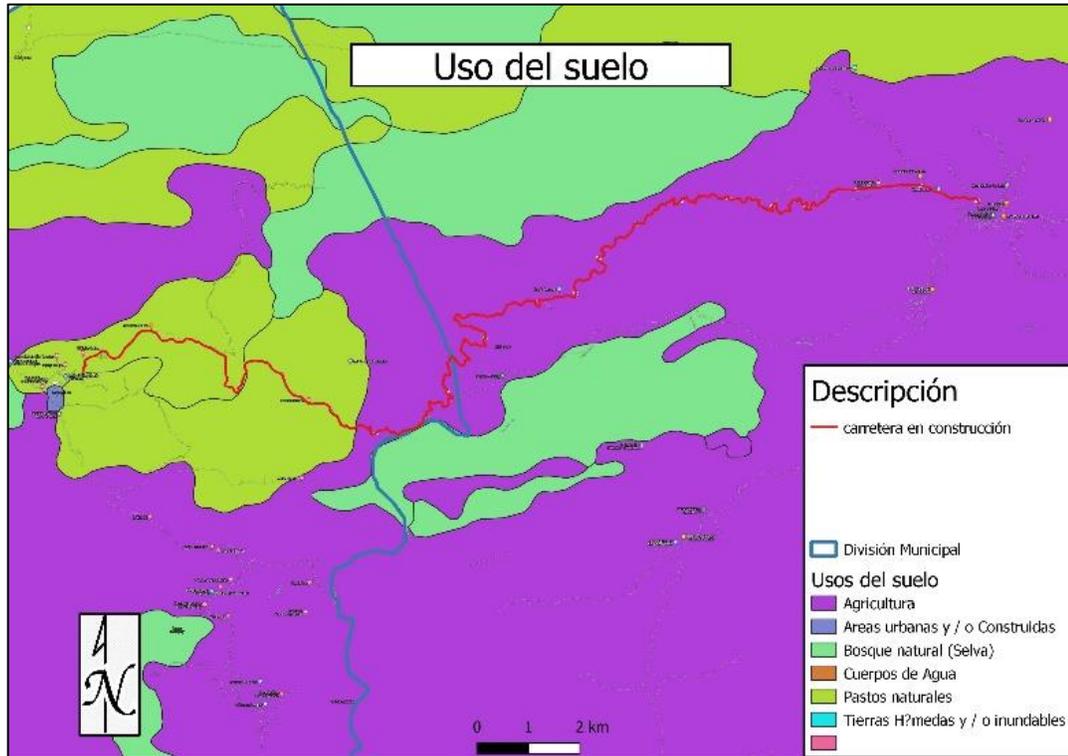
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Instituto Geográfico Nacional. (2001).

Información geológica de Guatemala.

2.5. Usos del suelo

La distribución del uso de los suelos se puede observar en la figura 11, de acuerdo a la información bibliográfica encontrada sobre el uso de los suelos en el área de estudios una parte se encuentra sobre terrenos de pastos naturales, en su mayoría cercano al área protegida de las grutas de Lanquín; el resto de los suelos cercanos a la carretera son de cultivos.

Figura 11. **Uso del suelo**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Instituto Geográfico Nacional. (2001).
Información geológica de Guatemala.

2.6. Estudios de laboratorio previos

En el estudio de ingeniería realizado previo a la construcción del proyecto, se encuentra la tabla 1, que contiene los ensayos realizados a materiales ubicados a lo largo de la carretera, en la tabla X se registran las granulometrías de los materiales de las estaciones 0+000 a la 28+000.

Tabla X. **Granulometría de los materiales encontrada en la bibliografía de las estaciones 0+000 a la 28+000**

Estación	% Pasa 1"	% Pasa 3/4"	% Pasa 3/8"	% Pasa No. 4	% Pasa No. 40	% Pasa No. 200
0+000	100.0	100.0	100.0	99.5	87.1	64.2
1+000	100.0	100.0	99.3	91.1	53.8	38.0
2+500	100.0	96.2	83.7	76.8	41.2	25.3
4+000	99.2	93.5	67.0	62.4	32.2	18.8
5+000	100.0	100.0	100.0	97.6	64.4	21.4
6+000	100.0	100.0	99.3	91.1	53.8	38.0
7+000	100.0	100.0	100.0	95.7	72.8	43.6
8+000	100.0	100.0	100.0	96.9	65.2	21.9
10+000	100.0	100.0	100.0	98.6	72.2	42.1
10+500	83.0	72.0	53.5	40.8	24.5	21.3
11+000	81.6	75.8	61.9	57.5	34.4	22.4
11+500	100.0	100.0	100.0	99.8	86.8	63.8
12+500	100.0	100.0	100.0	98.0	82.8	60.8
13+500	87.2	78.4	69.2	49.6	19.6	13.1
14+000	100.0	100.0	100.0	99.4	98.6	95.8
15+480	100.0	100.0	100.0	100.00	99.7	52.4
16+500	100.0	100.0	98.1	95.8	91.8	89.4
18+000	100.0	100.0	98.2	96.1	73.2	49.2
19+000	100.0	100.0	100.0	100.0	94.2	63.9
20+500	100.0	100.0	100.0	99.8	87.3	55.3
21+500	100.0	100.0	99.8	98.9	91.8	59.7
23+000	100.0	100.0	100.0	99.8	66.8	20.5
23+500	98.2	97.0	88.2	82.4	43.6	23.6
24+500	100.0	100.0	100.0	100.0	68.3	45.3
26+000	100.0	100.0	100.0	99.4	53.4	33.3
27+000	95.9	91.1	63.8	37.8	14.0	7.2
27+500	100.0	100.0	100.0	100.0	96.6	90.6
28+000	98.6	92.0	65.0	60.2	30.7	18.9

Fuente: Dirección General de Caminos (2016) *Informe final estudio de ingeniería mejoramiento de carretera RD AV-06 tramo: Lanquín - Cahabón.*

Además de los ensayos de granulometría, se encuentran los resultados de los ensayos que se utilizaron para realizar la clasificación de los suelos. En la tabla XI se muestran los resultados de los ensayos de las estaciones 0+000 a la 24+000.

Tabla XI. Ensayos para clasificación de suelos en la bibliografía de las estaciones 0+000 a la 24+000

Estación	LL	IP	Den Lb/p ³	% Hum Opt	CBR	% Hin	Clasificación	Descripción
0+000	38.5	8.9	96.6	30.0	2.7	3.7	A - 4	Limo arcilloso café claro
1+000	41.5	15.0	111.4	16.5	31.9	3.3	A - 7 - 6	Arena limosa con arcilla color café oscuro
2+500	28.5	4.6	109.3	30.0	52	0.9	A - 2 - 4	Limo areno arcilloso café claro con grava
4+000	29.3	4.5	114.8	20.3	57	0.8	A - 2 - 4	Limo areno arcilloso café claro con grava
5+000	29.7	4.9	112.9	16.6	24.5	1.6	A - 2 - 4	Limo areno arcilloso café claro con poca grava
6+000	41.5	15.0	111.4	16.5	31.9	3.3	A - 7 - 6	Arena limosa con arcilla color café oscuro
7+000	42.6	13.4	98.5	28.9	12.2	2.9	A - 7 - 5	Arcilla limosa
8+000	29.3	4.5	113.5	34.5	25.1	1.7	A - 2 - 4	Limo arenoso color café
10+000	48.2	17.6	89.7	34.0	2.2	4.5	A - 7 - 5	Limo areno arcilloso café
10+500	34.8	11.7	117.6	26.0	74	0.7	A - 2 - 6	Grava con limo areno arcilloso café claro
11+000	55.5	16.6	85.9	44.4	2.3	4.3	A - 2 - 7	Grava con arena arcillosa color negro
11+500	38.5	8.8	95.8	28.6	2.3	4.3	A - 4	Limo areno arcilloso café claro
12+500	26.4	9.5	86.9	35.0	2.1	4	A - 4	Limo areno arcilloso café
13+500	20.7	4.5	128.6	17.5	74.5	1.5	A - 2 - 4	Grava con limo areno arcilloso café
14+000	91.7	40.1	87.9	31.0	2.6	27	A - 7 - 5	Arcilla color café claro
15+480	41.0	14.2	105.7	19.5	4.4	12	A - 7 - 6	Limo arcilloso color café claro
16+500	86.5	38.6	97.8	23.9	0.9	28	A - 7 - 5	Arcilla color café oscuro
18+000	32.9	2.6	108.5	19.0	50	1.6	A - 4	Arena limosa color café oscuro
19+000	40.2	10.0	94.4	25.5	17.5	4.8	A - 4	Limo arenoso con poca arcilla color café
20+500	41.0	13.6	104.5	20.6	15.2	6.1	A - 7 - 6	Limo arcilloso color café claro
21+500	41.0	10.1	100.6	22.4	6.8	14	A - 5	Limo arenoso color café
23+000	30.5	2.6	118.8	14.4	30.3	2.2	A - 2 - 4	Grava y arena limosa color gris
23+500	29.5	4.7	117.9	18.0	38	0	A - 2 - 4	Limo arenoso café con grava

Fuente: Dirección General de Caminos (2016) *Informe final estudio de ingeniería mejoramiento de carretera RD AV-06 tramo: Lanquín - Cahabón.*

En la tabla XII se muestran los resultados de los ensayos de las estaciones 24+000 a la 28+000.

Tabla XII. Ensayos para clasificación de suelos en la bibliografía de las estaciones 24+000 a la 28+000

Estación	LL	IP	Densidad Lb/p ³	% Hum. Opt.	CBR	% Hin.	Clasificación	Descripción
24+500	34.4	8.2	111.0	20.1	52	0.6	A – 4	Arena limosa color café claro
26+000	35.6	12.1	118.6	14.2	25	0.7	A – 2 – 6	Arena arcillosa color rojizo
27+000	34.3	11.2	125.3	16.0	69	0.4	A – 2 – 6	Grava con limo areno arcilloso café claro
27+500	59.6	26.1	101.4	21.7	1.8	27	A – 7 – 5	Arcilla color rojizo
28+000	29.3	4.5	114.0	19.5	56	0.7	A – 2 – 4	Grava con arena limosa color gris

Fuente: Dirección General de Caminos (2016) *Informe final estudio de Ingeniería mejoramiento de carretera RD AV-06 tramo: Lanquín - Cahabón.*

Se encuentra también en el mismo estudio la tabla II, la cual presenta resultados de ensayos a materiales que se proponen para bancos de material a utilizar, para la construcción de la carretera

En la tabla XIII se muestran las granulometrías y las estaciones de dichos materiales.

Tabla XIII. **Granulometría de los materiales propuestos para bancos de material**

Estación	% Pasa 1"	% Pasa 3/4"	% Pasa 3/8"	% Pasa No. 4	% Pasa No. 40	% Pasa No. 200
4+000	100.0	98.8	92.0	81.8	39.4	22.4
6+500	100.0	98.9	92.1	81.4	39.2	22.6
7+800	100.0	98.7	92.0	81.2	39.1	22.4
8+100	100.0	98.6	91.9	81.0	39.0	22.2
15+700	66.3	54.4	33.2	21.8	8.8	4.5
17+150	52.0	39.9	18.9	9.6	3.8	2.7

Fuente: Dirección General de Caminos (2016) *Informe final estudio de Ingeniería mejoramiento de carretera RD AV-06 tramo: Lanquín - Cahabón.*

Tabla XIV. **Ensayos de clasificación de los materiales propuestos para bancos de material**

Estación	LL	IP	Densidad Lb/p ³	% Hum. Opt.	CBR	% Hin.	Clasificación	Descripción
4+000	26.7	6.2	118.0	15.4	36.4	2.7	A – 1 – b	Arena limosa con grava café oscuro
6+500	26.0	5.5	118.0	15.5	36.2	2.6	A – 1 – b	Arena limosa con grava café oscuro
7+800	26.3	5.8	118.2	15.4	36.5	2.7	A – 1 – b	Arena limosa con grava café oscuro
8+100	26.6	6.1	118.3	15.4	37.0	2.8	A – 1 – b	Arena limosa con grava café oscuro
15+700	NL	NP	136.2	9.9	90.0	0.1	A – 1 – a	Grava con arena limosa café
17+150	36.8	17.8	134.9	8.8	98.9	0.1	A – 2 – 6	Grava y arena arcillosa café

Fuente: Dirección General de Caminos (2016) *Informe final estudio de Ingeniería mejoramiento de carretera RD AV-06 tramo: Lanquín - Cahabón.*

Se encuentran en la tabla referida también los ensayos para realizar la clasificación de los suelos, cuyos datos se presentan en la tabla XIV.

Se incluyen en esta tabla además de los ensayos indicados en las tablas XII y XIII, otros ensayos los cuales se presentan a continuación en la tabla XV.

Tabla XV. **Otros ensayos realizados a los materiales propuestos para bancos**

Estación	% Equivalente de arena	Peso unitario lb/p ³	% Desgaste a sulfatos	% Abrasión
4+000	21.2	91.7	*NA	NA
6+500	21.3	91.9	*NA	NA
7+800	21.4	91.4	*NA	NA
8+100	21.9	91.5	*NA	NA
15+700	11.8	109.6	26.0	24.7
17+150	16.0	126.5	11.0	27.3

Fuente: Dirección General de Caminos (2016) *Informe final estudio de Ingeniería mejoramiento de carretera RD AV-06 tramo: Lanquín - Cahabón.*

Todos los ensayos descritos en las tablas anteriores están relacionados a una ubicación relacionada con la longitud de la carretera, no se encuentran relacionadas a una ubicación geográfica o a una formación geológica específica, por lo que son datos puntuales que no pueden ser comparados entre sí para determinar si existe una relación en los materiales a lo largo de la carretera.

2.7. Condiciones climáticas

La información climática del área se obtuvo del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), la cual fue registrada por las estaciones climatológica e hidrológica cercanas al área en estudio.

La estación climatológica más cercana se ubica en el municipio de Panzós y la estación hidrológica más cercana se ubica en el municipio de Telemán.

De las estaciones indicadas se genera la información la cual sirvió para generar el atlas climatológico que describe el clima en la región, dicha información se muestra en la tabla XVI.

Tabla XVI. **Resumen climático del área en estudio**

Parámetro analizado	Valor
Temperatura promedio anual	25 °C
Temperatura máxima promedio anual	25 °C – 35 °C
Temperatura mínima promedio anual	21 °C – 18 °C
Promedio de mm de lluvia anual	2,000 – 3,000
Días de lluvia al año	175 – 200
Nivel de humedad relativa promedio anual	80 % - 85 %

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología e Hidrología. (2021a). *Atlas climatológico*.

2.8. Historial sísmico

Debido a la ubicación geográfica del país este se encuentra en constantes movimientos sísmicos, los cuales son originados por las diversas fallas que se encuentran a lo largo del mismo, las cuales generan sismos de diferentes magnitudes y direcciones, el departamento de Alta Verapaz no se encuentra exento de dichos movimientos, en la tabla XVII se muestra el registro sísmico del departamento del año 2011 al 2018.

Tabla XVII. Registro sísmico del departamento de Alta Verapaz del 2011 al 2018

Año	mes	día	hora	mi n.	s	LAT-N	LON-W	Prof. (Km)	Magnitud (Rich)
2011	5	23	9	44	29.3	15.283	90.058	5	3.7
2011	5	25	17	20	16.2	15.587	89.817	4.8	3.5
2011	6	16	2	26	0.9	15.228	89.79	50	3.3
2011	6	27	9	2	8.7	15.282	89.834	150	3.9
2012	5	23	0	2	52.7	15.17	89.824	35	3.6
2012	9	10	14	59	48.7	15.65	89.798	23.4	3.2
2013	3	28	13	8	50.6	15.228	89.853	43.5	3.2
2013	3	30	0	39	53.7	15.327	90.034	48.8	3.1
2013	4	4	17	33	50.5	15.512	90.041	21.5	3.9
2013	7	21	20	1	44	15.794	89.994	21.6	3.2
2013	9	19	11	30	5.3	15.772	90.132	10.1	3.5
2013	10	10	16	10	38	15.438	89.913	24.2	3.4
2013	10	27	9	57	38.2	15.583	90.094	132.8	3.5
2013	11	16	2	45	23.1	15.215	89.701	50.8	3.3
2014	1	1	5	20	9.7	15.958	90.052	31.9	3.6
2014	2	6	2	46	48.6	15.736	90.081	130.9	3.6
2014	5	3	12	3	18.7	15.17	89.814	2.8	3.2
2014	5	18	12	21	45.1	16.012	90.149	179.5	3.7
2014	9	10	5	28	55.1	15.258	89.886	6.1	3.4
2014	10	5	4	56	45.6	15.735	89.939	52.9	3.4
2015	1	9	23	54	43.8	15.53	89.914	0	3.2
2015	4	4	15	17	30.6	15.204	89.946	236.3	4
2015	4	28	7	34	49	15.495	89.765	50	3.6
2015	6	2	16	40	24.8	15.465	89.898	50	3.3
2016	4	27	1	36	41	15.863	90.047	160.5	3.7
2016	4	29	3	4	29.4	15.638	89.717	12.1	3.8
2016	12	11	14	57	16.4	15.203	89.882	50	3.8
2017	4	6	5	44	46.6	15.265	89.824	10.1	3.9
2018	3	17	21	26	34.8	15.525	89.826	26.4	3.5
2018	4	10	17	15	2.2	15.335	89.678	6.6	4.6
2018	11	12	3	23	47.7	15.358	90.07	11.3	3.6

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología e Hidrología. (2021b). *Registro sísmico*.

En la tabla XVIII se muestra el registro sísmico del departamento de Alta Verapaz del año 2019 a marzo de 2021.

Tabla XVIII. Registro sísmico del departamento de Alta Verapaz del 2019 a 2020

Año	mes	día	hora	Min.	s	LAT-N	LON-W	Prof. (Km)	Magnitud (Rich)
2019	1	13	14	36	6.4	15.313	89.923	1.1	4.4
2019	4	4	1	56	44.8	15.37	90.113	8	3.8
2019	7	24	1	49	30.9	15.199	89.936	36	3.4
2019	8	10	19	34	36.1	15.701	89.838	12.7	3.1
2019	8	18	5	48	11.9	16	90.145	1.6	3.6
2019	8	31	22	39	17.5	15.984	90.142	3	4
2019	9	9	1	8	0.5	15.278	90.124	6.1	3.8
2019	9	20	12	38	4.8	15.631	90.106	4.9	3.3
2019	11	13	13	54	10.9	15.701	89.897	9.8	4.5
2020	1	10	6	32	30.3	15.526	89.893	7.8	3.2
2020	1	16	10	29	36.5	15.691	90.102	6.2	4.3
2020	6	21	10	47	2.2	15.651	90.042	2.8	3.9
2020	6	22	9	2	38.8	15.627	90.093	13	3.9
2020	6	30	4	41	11.9	15.48	89.944	6	3.9
2020	7	20	1	50	43.3	15.642	90.082	13	3.7
2020	9	5	18	26	59.8	15.281	89.787	10.8	4.3
2020	11	1	2	22	6.8	15.536	90.162	1	4
2020	11	10	1	9	44.2	15.571	89.987	6	3.6
2020	11	20	6	35	11.4	15.631	89.888	23.6	3.4
2020	11	20	13	52	2.7	15.444	89.894	14	3.7
2020	11	22	20	49	15.9	15.65	89.943	8.6	4.2
2020	11	23	23	13	16.7	15.639	89.997	6.2	4.6
2020	11	24	2	41	6.5	15.537	90.08	13	3.9
2020	11	24	4	10	18.3	15.648	89.957	14.6	4.1
2020	11	24	8	32	11.9	15.516	90.154	13.1	3.4
2020	11	27	6	29	32.9	15.666	89.807	13.3	3.6
2020	11	27	7	8	23.5	15.706	90.06	13.2	4.2
2020	11	30	7	26	33.4	15.64	90.108	5.6	4
2020	12	5	19	30	33.2	15.642	89.949	7.1	4.6
2020	12	8	9	30	46.5	15.588	90.163	5.4	3.7
2020	12	9	11	28	6.2	15.644	90.069	12.9	3.8
2020	12	10	4	3	31.7	15.655	90.057	13	3.7
2020	12	10	7	17	40.2	15.633	90.05	6.1	4.4
2020	12	11	8	49	44.8	15.562	90.13	17.9	3.5
2020	12	14	15	15	33.7	15.581	90.074	14.7	3.5
2020	12	16	4	17	6.1	15.617	90.075	13	4.5
2020	12	24	3	31	26.5	15.595	89.981	6.1	4.4

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología e Hidrología. (2021b). *Registro sísmico*.

En la tabla XIX se muestra el registro sísmico del departamento de enero hasta marzo de 2021.

Tabla XIX. Registro sísmico del departamento de Alta Verapaz de enero a marzo de 2021

Año	mes	día	hora	Min.	s	LAT-N	LON-W	Prof. (Km)	Magnitud (Rich)
2021	1	2	7	2	13.9	15.285	89.914	5.4	4
2021	1	3	20	32	54.2	15.624	89.957	8.1	3.7
2021	1	25	10	1	54.5	15.596	89.915	13.1	3.6
2021	2	9	12	52	37.2	15.63	90.05	11.5	4.1
2021	3	2	18	29	8.2	15.594	90.028	0.6	3.8
2021	3	3	15	10	22.8	15.313	89.943	6.6	3.8

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología e Hidrología. (2021b). *Registro sísmico*.

3. TRABAJO DE CAMPO

Para realizar la caracterización de las formaciones geológicas existentes, se realizó una evaluación en campo de los taludes cortados recientemente durante la construcción de la carretera, los cuales muestran las formaciones geológicas de la región.

Inicialmente se realizó el análisis geológico de las formaciones y de su geología estructura de forma general. Es importante resaltar que el análisis se realizó únicamente sobre los taludes cortados por la construcción de la carretera, evidenciando que en la mayor parte de la carretera se encuentra la formación Sepur debido a que se pueden observar varias secuencias de materiales las cuales se describen en la litología de la formación, por lo que el trabajo se centra en realizar la caracterización de dicha formación.

3.1. Geología determinada en campo

Por medio del recorrido en campo se pudo determinar que a lo largo de la carretera se encuentran depósitos de material, así como secuencias de materiales sedimentarios que son descritos en la litología de la formación Sepur. Por encontrarse la carretera a la orilla de los ríos Lanquín y Cahabón, se puede observar la presencia de aluviones de canto rodado en varios puntos.

La formación Sepur proviene de la sedimentación de material en el lecho marino, dicha situación se evidencia en la parte superior de la misma con el material depositado en capas muy pequeñas, en ella se pueden apreciar lutitas, areniscas y margas color café las cuales se encuentran interestratificados

formando secuencias con lentes de caliza como se muestra en la figura 12, las cuales son extremadamente susceptibles a los agentes erosivos.

Figura 12. **Secuencia ubicada en la estación 0+710 LI en el área de estudio**



Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (San Agustín Lanquín, Alta Verapaz. 2021).
Colección Particular. Guatemala.

A lo largo de la carretera se puede observar la parte más reciente de la formación Sepur como la mostrada en la figura 12, se considera la parte más reciente de la formación debido al grado de compactación y tamaño de los estratos.

En la tabla XX se muestra la clasificación de los clastos sedimentarios; y al realizar la medición de los estratos existentes en los tipos de materiales encontrados, se determinó que a lo largo de la carretera se pueden encontrar tres tipos de materiales: arenas medias, gravas y bloques de acuerdo dicha clasificación.

Tabla XX. **Clasificación granulométrica de sedimentos, escala Udden-Wentworth**

Tamaño del clasto (mm)	Clasto sedimentario	
> 256.0	Bloque	Grava
256.0 – 64.0	Grava	
64.0 – 4.0	Guijarro	
4.0 – 2.0	Granos	
2.0 – 1.0	Arena muy gruesa	Arena
1.0 – 0.50	Arena gruesa	
0.50 – 0.25	Arena media	
0.25 – 0.125	Arena fina	
0.125 – 0.032	Arena muy fina	
0.032 – 0.004	Limo	Lodo
< 0.004	Arcilla	

Fuente: Instituto de Energía y Minas. (2015). *Guías para la elaboración de mapas y boletines de la Carta Geológica Nacional.*

Figura 13. **Secuencia ubicada en la estación 1+810 LD en el área de estudio**



Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (San Agustín Lanquín, Alta Verapaz. 2022). Colección Particular. Guatemala.

A lo largo de la carretera se tomaron muestras en los materiales clasificados como arenas medias, los cuales se muestran en la figura 13.

En la tabla XXI se resumen la ubicación de inicio y final de los materiales formados por esta secuencia clasificada como arenas medias de acuerdo a la escala de clasificación granulométrica de sedimentos de Udden-Wentworth.

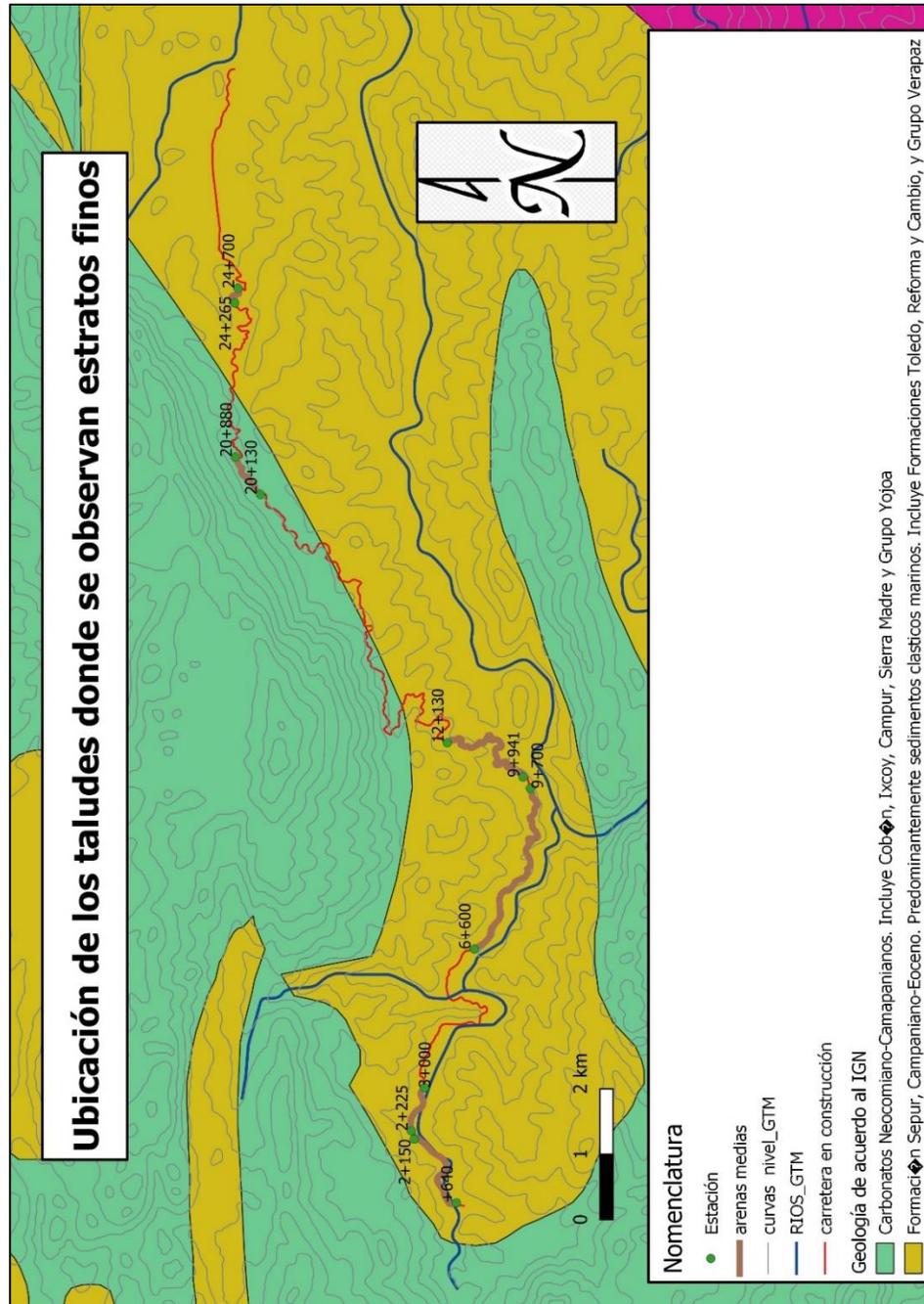
Tabla XXI. **Inicio y final de las arenas medias en el área de estudio**

No.	Inicio		Final	
	Estación	Coordenadas UTM	Estación	Coordenadas UTM
1	0+640	16N 180830.3 1724694.6	2+150	16N 181822.2 1725315.4
2	2+225	16N 181951.6 1725354.9	3+000	16N 182608.9 1725132.4
3	6+600	16N 184709.0 1724310.2	9+700	16N 187146.2 1723383.2
4	9+941	16N 187322.3 1723489.3	12+130	16N 187881.0 1724636.5
5	20+130	16N 191767.6 1727394.8	20+880	16N 192355.9 1727761.0
6	24+265	16N 194703.9 1727154.9	24+700	16N 194937.2 1727650.5

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La figura 14 muestra la ubicación de los lugares a lo largo de la carretera donde se pueden observar las arenas medias descritas en la tabla XXV, los cuales tienen una dimensión entre 0.25 – 0.50 milímetros.

Figura 14. Distribución de las arenas medias en el área de estudio



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Instituto Geográfico Nacional. (2001).

Información geológica de Guatemala.

En algunos lugares se encuentran facies con espesores entre los 64.0 – 256.0 milímetros, los cuales se clasifican en la escala de Udden-Wentworth como grava. En la figura 15 se muestran dichas facies y en la tabla XXII se registra el inicio y final de las mismas.

Figura 15. **Secuencia ubicada en la estación 14+270 LI en el área de estudio**



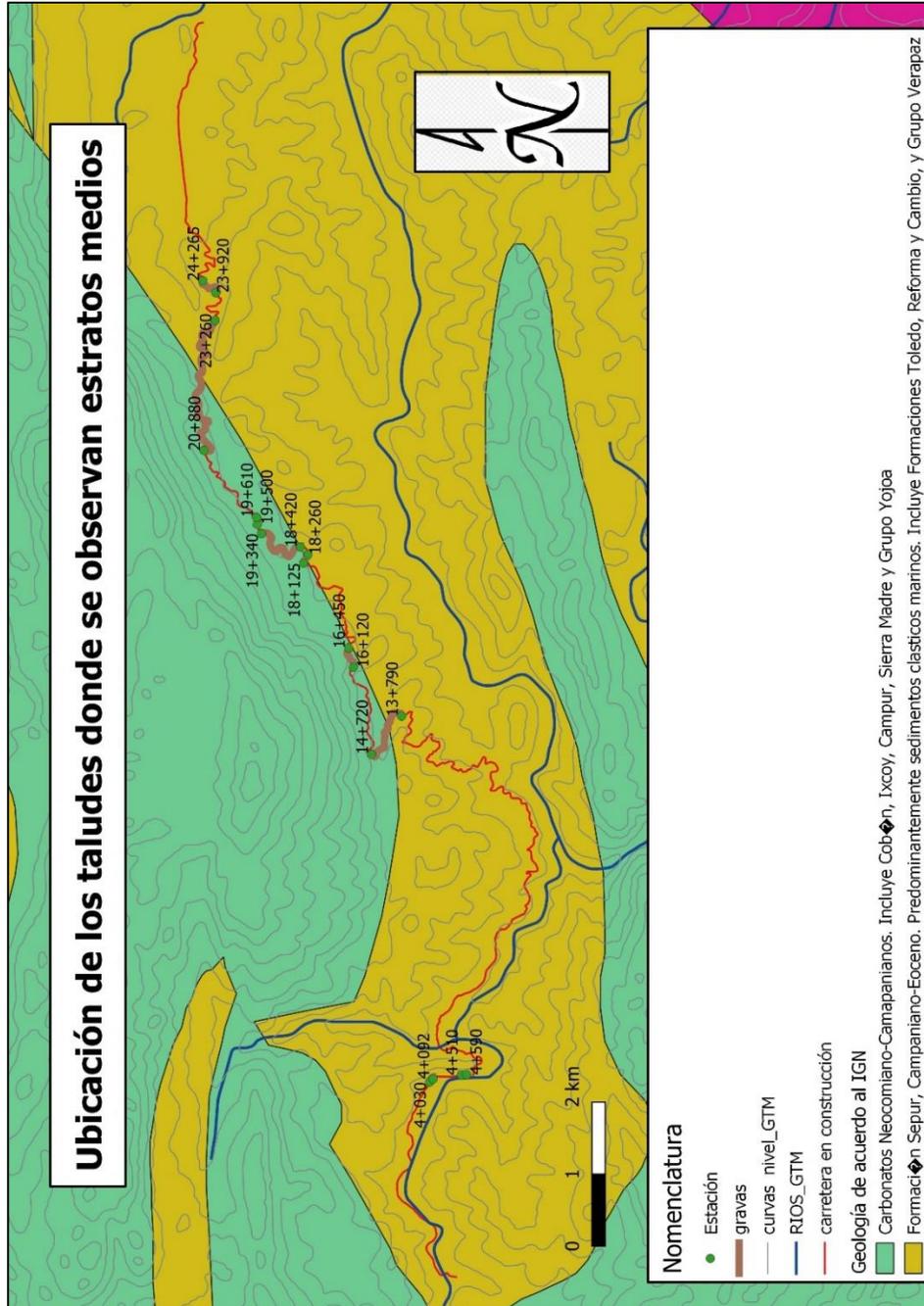
Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (Santa María Cahabón, Alta Verapaz. 2022).
Colección Particular. Guatemala.

Tabla XXII. **Inicio y final de las gravas en el área de estudio**

No.	Inicio		Final	
	Estación	Coordenadas UTM	Estación	Coordenadas UTM
1	4+030	16N 183496.6 1724872.4	4+092	16N 183539.1 1724822.9
2	4+510	16N 183580.6 1724426.9	4+590	16N 183586.2 1724354.7
3	13+790	16N 188589.8 1725118.2	14+720	16N 188072.8 1725550.3
4	16+120	16N 189287.9 1725770.4	16+450	16N 189555.3 1725829.2
5	18+125	16N 190751.6 1726420.9	18+260	16N 190872.4 1726356.7
6	18+420	16N 190977.0 1726459.2	19+340	16N 191177.0 1726992.5
7	19+500	16N 191311.1 1727048.1	19+610	16N 191408.1 1727057.4
8	20+880	16N 192355.9 1727761.0	23+260	16N 194156.8 1727554.7
9	23+920	16N 194541.3 1727533.7	24+265	16N 194703.9 1727154.9

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 16. Distribución de las gravas en el área de estudio



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Instituto Geográfico Nacional. (2001).

Información geológica de Guatemala.

La figura 16 muestra la ubicación de los lugares a lo largo de la carretera donde se pueden observar gravas, cuyas ubicaciones se muestran en la tabla XXII.

El tercer tipo de facies encontrados a lo largo de la carretera son las clasificadas de acuerdo a la escala de Udden-Wentworth es la clasificada como bloque debido a su tamaño, estos contienen estratos mayores a 256.0 milímetros. En la figura 17 se muestran los bloques que se pueden observar a lo largo de la carretera.

Figura 17. **Secuencia ubicada en la estación 13+250 LI en el área de estudio**



Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (Santa María Cahabón, Alta Verapaz. 2022).
Colección Particular. Guatemala.

En la tabla XXIII se describe la ubicación a lo largo de la carretera de los bloques.

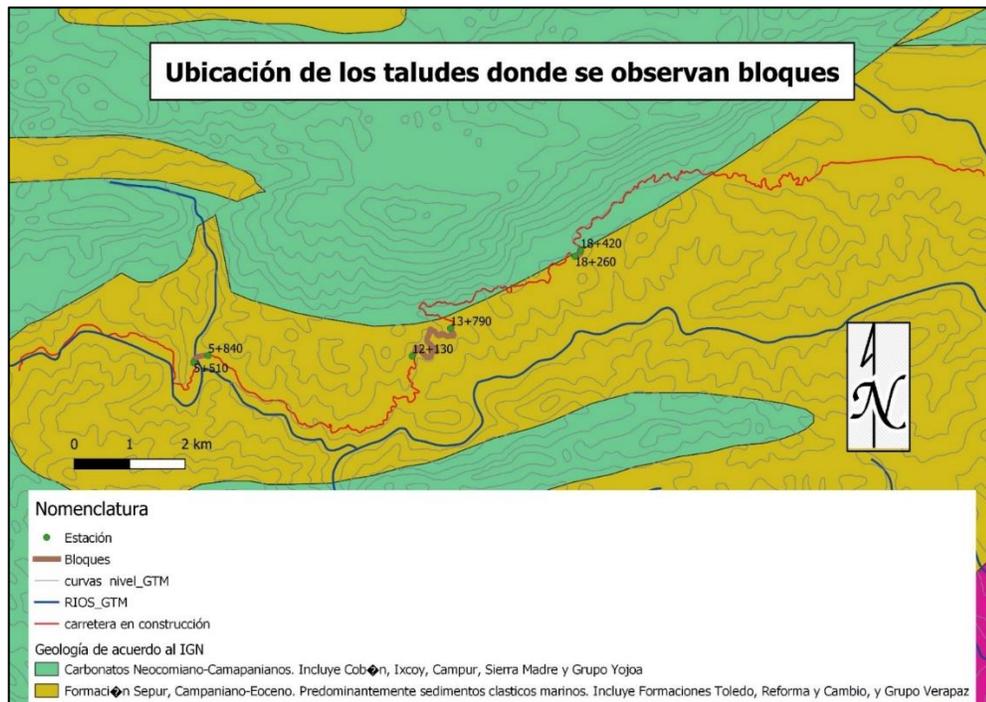
Tabla XXIII. Inicio y final de los bloques en el área de estudio

No.	Inicio		Final	
	Estación	Coordenadas UTM	Estación	Coordenadas UTM
1	5+510	16N 183932.6 1724628.2	5+840	16N 184198.5 1724749.1
2	12+130	16N 187881.0 1724636.5	13+790	16N 188589.8 1725118.2
3	18+260	16N 190872.4 1726356.7	18+420	16N 190977.0 1726459.2

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En la figura 18 se muestra la ubicación de los materiales considerados como bloques.

Figura 18. Distribución de los bloques en el área de estudio



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Instituto Geográfico Nacional. (2001).

Información geológica de Guatemala.

De acuerdo a la descripción de la litología de la formación Sepur, en ella se pueden encontrar también las rocas denominadas grauvacas, estas se pueden observar casi a lo largo de toda la carretera. En la figura 19 se muestra la forma en la que aparecen las grauvacas.

Figura 19. **Lugares donde se visualizan los materiales estratificados de gran tamaño de la formación Sepur en el área de estudio**



Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (San Agustín Lanquín, Alta Verapaz. 2021).
Colección Particular. Guatemala.

Como se observa en la figura anterior las grauvacas se encuentran en forma de un estrato de roca, en la tabla XXIV se registra el lugar donde los suelos tienen la presencia de estas rocas, las cuales se encuentran casi horizontales a la dirección de la carretera.

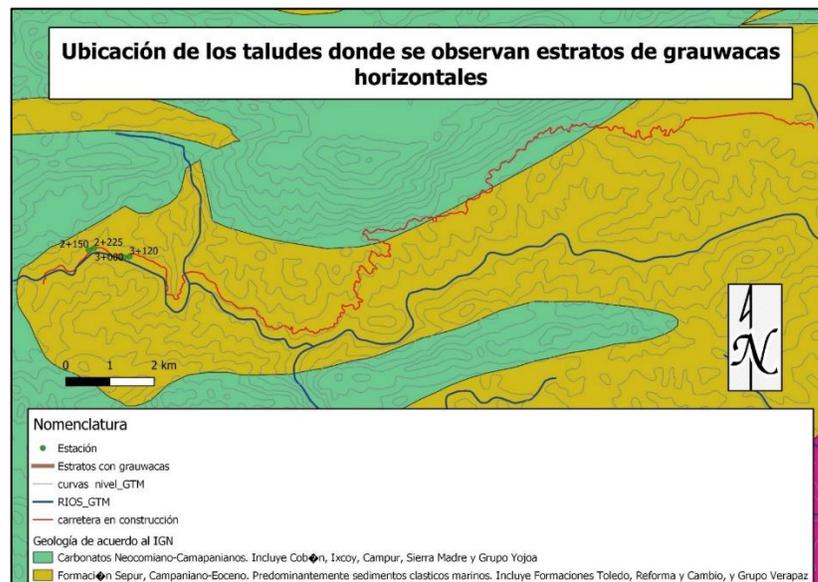
Tabla XXIV. **Inicio y final de los suelos con grauwacas en el área de estudio**

No.	Inicio		Final	
	Estación	Coordenadas UTM	Estación	Coordenadas UTM
1	2+150	16N 181822.2 1725315.4	2+225	16N 181951.6 1725354.9
2	3+000	16N 182608.9 1725132.4	3+120	16N 182741.9 1725136.3

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En la figura 20 se muestra la ubicación de las grauwacas horizontales a lo largo de la carretera. Sin embargo, se pueden observar estratos de grauwacas a lo largo de toda la carretera en lugares puntuales, los cuales no se incluyeron debido a que tienen una orientación casi vertical con relación a la carretera.

Figura 20. **Distribución de las grauwacas horizontales en el área de estudio**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Instituto Geográfico Nacional. (2001).

Información geológica de Guatemala.

Se pueden observar también la presencia de aluviones los cuales se encuentran en dos estados diferentes de consolidación; en algunas secciones de la carretera se puede observar en forma de material suelto con rocas de canto rodado y en otros se observa como rocas las cuales se encuentran formadas de material suelto y rocas de canto rodado en el interior como se muestra en la figura 21, en la tabla XXV se resume la ubicación de los mismos.

Figura 21. **Aluvión encontrado en la estación 3+420 LI en el área de estudio**



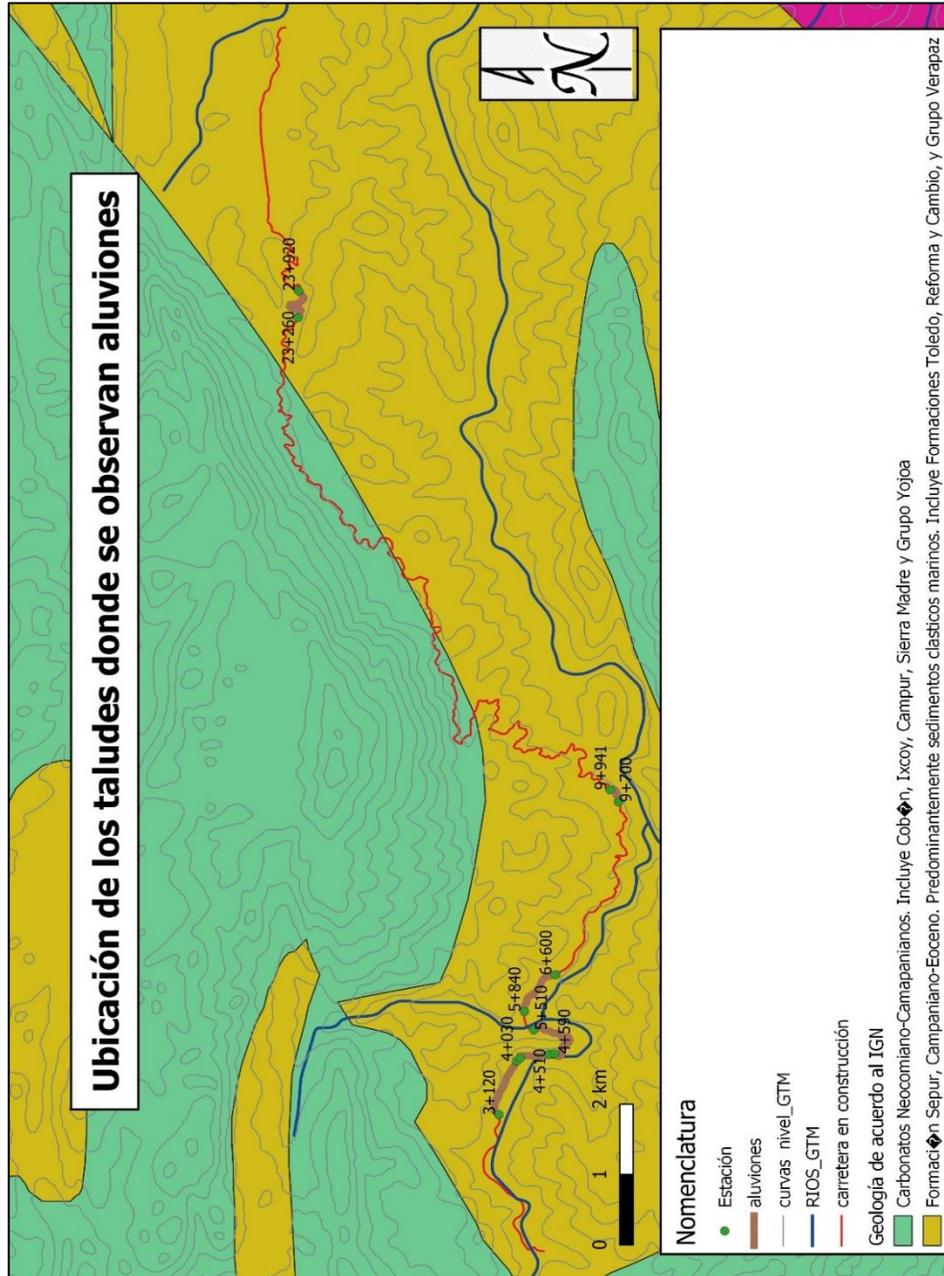
Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (San Agustín Lanquín, Alta Verapaz. 2021).
Colección Particular. Guatemala.

Tabla XXV. **Inicio y final de los aluviones en el área de estudio**

No.	Inicio		Final	
	Estación	Coordenadas UTM	Estación	Coordenadas UTM
1	3+120	16N 182741.9 1725136.3	4+030	16N 183496.6 1724872.4
2	4+092	16N 183539.1 1724822.9	4+510	16N 183580.6 1724426.9
3	4+590	16N 183586.2 1724354.7	5+510	16N 183932.6 1724628.2
4	5+840	16N 184198.5 1724749.1	6+600	16N 184709.0 1724310.2
5	9+700	16N 187146.2 1723383.2	9+941	16N 187322.3 1723489.3
6	23+260	16N 194156.8 1727554.7	23+920	16N 194541.3 1727533.7

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 22. Distribución de los aluviones en el área de estudio



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Instituto Geográfico Nacional. (2001).

Información geológica de Guatemala.

En la figura 22 se muestra la ubicación de los aluviones encontrados a lo largo de la carretera descritos en la tabla XXV.

Por último, se encontraron además rocas calizas, las cuales se verificará en los ensayos si corresponden a la formación de la litología de la formación Sepur, en la información bibliográfica encontrada se describe que en la región se encuentran rocas calizas las cuales se describen como depósitos cuaternarios. Las rocas encontradas se muestran en la figura 23.

Figura 23. **Roca caliza encontrado en la estación 14+895 LI en el área de estudio**



Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (Santa María Cahabón, Alta Verapaz. 2022).
Colección Particular. Guatemala.

La ubicación de estas rocas calizas se describe a continuación en la tabla XXVI.

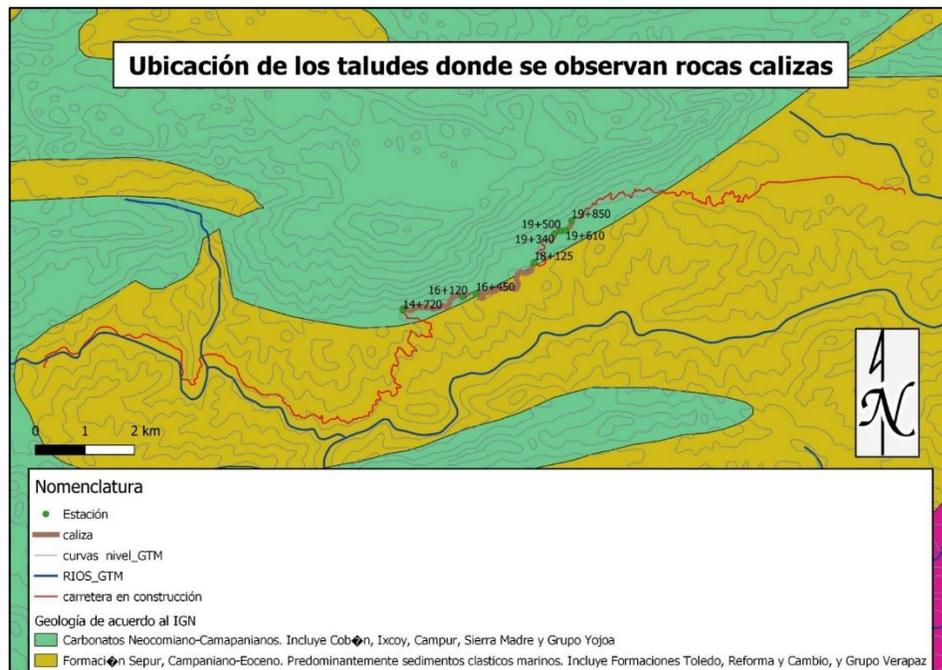
Tabla XXVI. Inicio y final de las rocas calizas en el área de estudio

No.	Inicio		Final	
	Estación	Coordenadas UTM	Estación	Coordenadas UTM
1	14+720	16N 188072.8 1725550.3	16+120	16N 189287.9 1725770.4
2	16+450	16N 189555.3 1725829.2	18+125	16N 190751.6 1726420.9
3	19+340	16N 191177.0 1726992.5	19+500	16N 191311.1 1727048.1
4	19+610	16N 191408.1 1727057.4	19+850	16N 191536.4 1727253.4

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En la figura 24 se muestra la ubicación en el mapa de los materiales indicados en la tabla XXVI.

Figura 24. Distribución de las rocas calizas en el área de estudio



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Instituto Geográfico Nacional. (2001).

Información geológica de Guatemala.

La característica principal de la formación Sepur es su estructura variable, la mayor parte de las unidades geológicas que la componen presentan muchas foliaciones de tamaño y forma irregular, lo cual hace extremadamente complicado realizar un análisis estructural que represente a la formación; por tal motivo, se realizó la identificación visual de los materiales para llevar a cabo la toma de muestra de los mismos.

3.1.1. Geología estructural determinada en campo

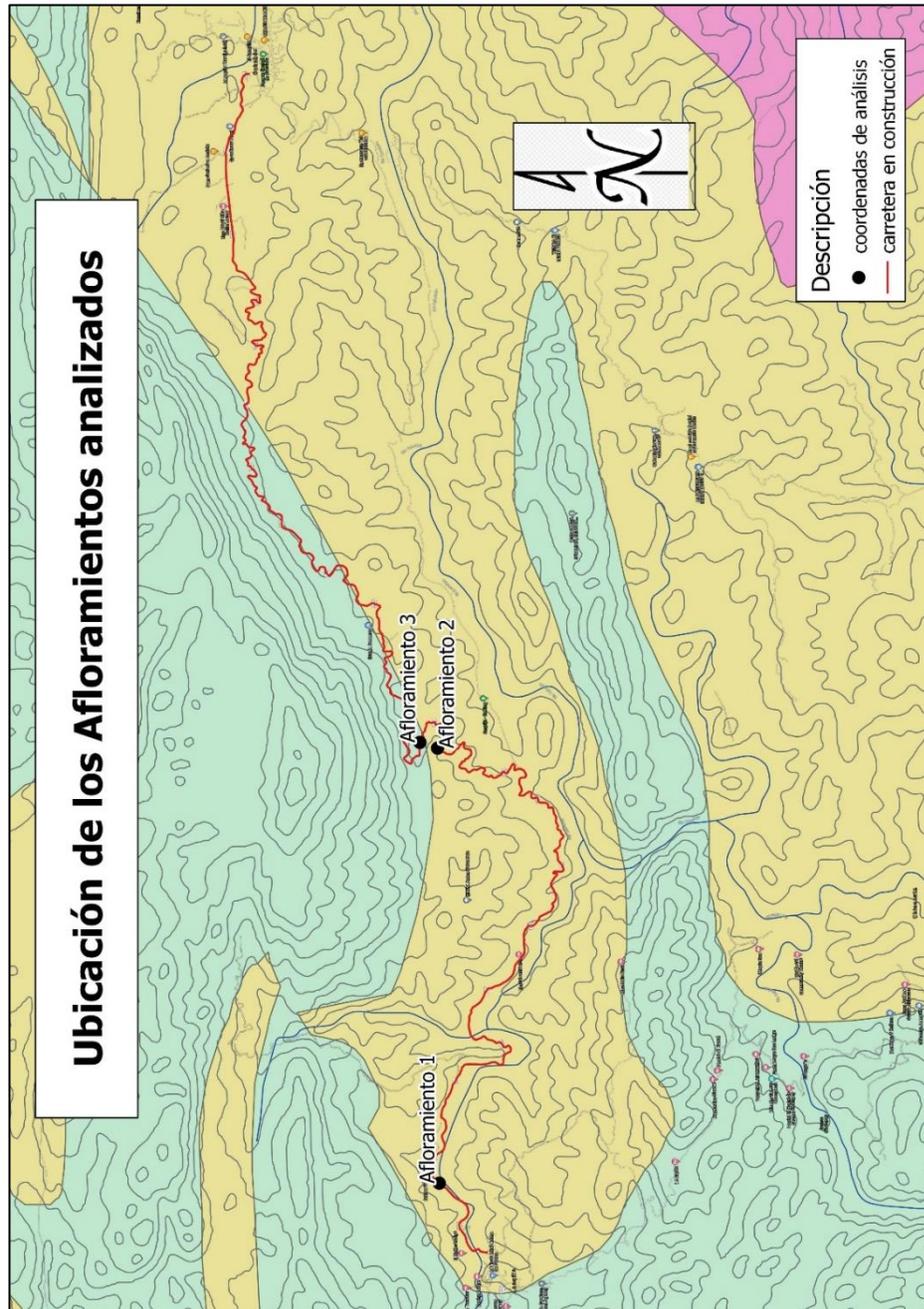
Las estructuras geológicas que forman la Sepur que se encuentran a lo largo de la carretera en estudio, son producto del movimiento causado por la turbulencia o las corrientes de turbidez, los cuales ocasionan el movimiento de los sedimentos depositados en el lecho marino.

Las unidades o estructuras encontradas en mayor dimensión sobresalen cuatro grupos importantes, de las cuales tres unidades están compuestas por secuencias de estratos que varían la primera entre 0.01 cm – 2.4 cm, la segunda entre 1 cm – 27 cm, la tercera varía entre 1.0 cm – 180 cm y la cuarta unidad son aluviones.

Debido a la longitud de la carretera y las curvas que la misma tiene en su diseño geométrico, al realizar un análisis estructural a lo largo de la misma; es posible que se realice un análisis de la misma estructura desde dos puntos de vista diferentes.

Se tomaron tres puntos para realizar el análisis estructural, los cuales coinciden con la ubicación de la toma de muestras de suelo para el ensayo de corte directo.

Figura 25. **Ubicación de los puntos de análisis estructural**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Instituto Geográfico Nacional. (2001).
Información geológica de Guatemala.

Las ubicaciones de los puntos donde se realizó el análisis estructural se muestran en la figura 25.

Para el primer punto analizado el cual se encuentra ubicado a 286 msnm, en las coordenadas UTM 16N 181825 1725256.1, se observa el afloramiento mostrado en la figura 26, la estructura se encuentra orientado a 145/14.

Figura 26. **Graben local en el afloramiento ubicado en la estación 1+895 LD sobre la carretera**



Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (San Agustín Lanquín, Alta Verapaz. 2021).
Colección Particular. Guatemala.

En este punto se puede observar un graben local como estructura principal, en un afloramiento de lutitas con intrusiones de caliza.

En la figura 27 se observa el bloque baja con relación al que sube en el lado derecho del graben.

Figura 27. **Movimiento de los bloques en la falla puntual del afloramiento ubicado en la estación 1+895 LD sobre la carretera**



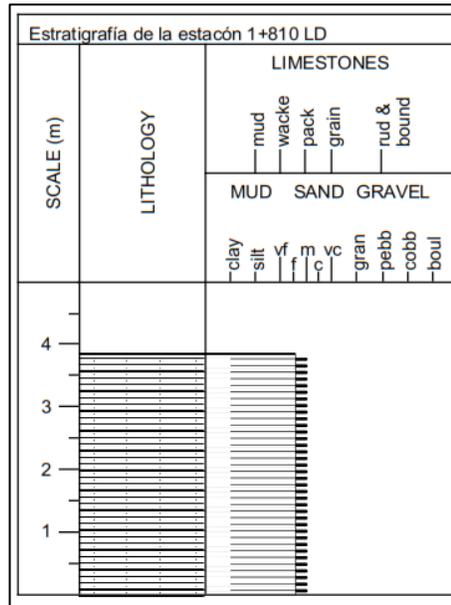
Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (San Agustín Lanquín, Alta Verapaz. 2021).
Colección Particular. Guatemala.

El material se observa moderadamente meteorizado lo cual corresponde a una meteorización grado III de acuerdo a la clasificación del ISRM de 1981, tiene una textura moderadamente rugosa, tiene estratos cuyas longitudes varían de 0.70 m a 1 m.

La apertura es de 1mm entre estratos con relleno de carbonato de calcio en algunas áreas y otras con rellenos arcilloso, el espesor de los estratos es de 3 cm para las lutitas/lodolitas y 8cm para las calizas, las cuales se encuentran intercaladas.

En la figura 28 se muestra la estratigrafía del afloramiento en análisis.

Figura 28. **Estratigrafía del afloramiento ubicado en la estación 1+895 LD sobre la carretera**



Fuente: elaboración propia, empleando SedLog 3.1.

Como se puede observar en la columna estratigráfica del afloramiento, los suelos presentes varían de tamaño desde un tamaño de grano fino que puede ser un limo o una arena hasta uno muy fino que puede ser arcilla.

Se observó además dos familias de discontinuidades de las cuales se tiene la siguiente descripción.

Para la familia 1, tiene una apertura de 1mm con un relleno de arcilloso moderadamente rugoso, la longitud de las discontinuidades es mayor a 3 m, y se repiten cada metro.

Las lecturas de las orientaciones medidas de la familia 1, se presentan en la tabla XXVII.

Tabla XXVII. **Orientación de la familia 1 de discontinuidades en el afloramiento 1**

Lectura	Orientación
1	75/77
2	96/89
3	69/73
4	61/86

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Para la familia 2, una apertura de 5 mm con un relleno calcario, la longitud de las discontinuidades es mayor a 3 m, y se repiten cada metro. Las lecturas de las orientaciones medidas de la familia 2, se presentan en la tabla XXVIII.

Tabla XXVIII. **Orientación de la familia 2 de discontinuidades en el afloramiento 1**

Lectura	Orientación
1	151/82
2	124/87
3	137/87
4	202/88

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Además, se realizó la medición de la orientación de las dos fallas que forman el graven loca, cuyos datos se muestran en la tabla XXIX.

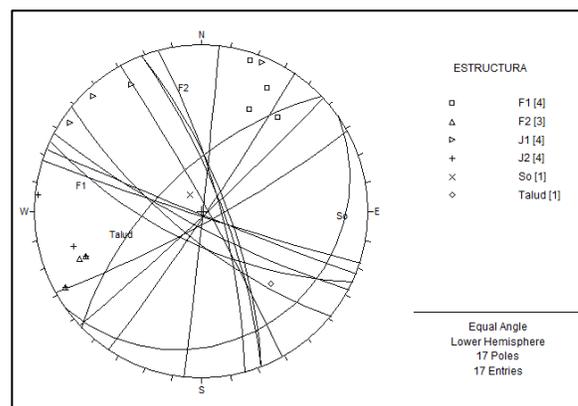
Tabla XXIX. **Orientación de las fallas presentes en el afloramiento 1**

Lectura	Falla 1	Falla 2
1	69/73	219/72
2	69/76	205/68
3	61/86	208/80
4	-----	198/87

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Considerando además de las fallas y familias de discontinuidades encontradas que la carretera tiene un rumbo NE-SW y la orientación del talud es 316/62; se procedió a realizar el análisis estructural por medio del análisis de la orientación de las fallas y familia de discontinuidades del talud utilizando el programa Dips, el cual está diseñado para realizar el análisis de datos geológicos basados en la orientación en su versión trial.

Figura 29. **Orientación de las familias de discontinuidades y fallas en relación al talud ubicado en la estación 1+895 LD sobre la carretera**



Fuente: elaboración propia, empleando Dips 6.0.

En la figura 29 se muestra la representación gráfica de los planos formados por: las familias de discontinuidades familia 1 (J1) y familia 2 (J2), la estructura o estratificación (So), el talud y las fallas falla 1 (F1) y falla 2 (F2).

Como se puede observar en la figura 29, la disposición geométrica de las familias de discontinuidades (J1 y J2) y las fallas (F1 y F2) en relación con el talud de corte de la carretera y la estructura (So) éstos no son potencialmente problemáticos, por no generar cuñas que incrementen el riesgo de desprendimiento de material del mismo.

Para el caso del segundo punto analizado el cual se encuentra ubicado a 354 msnm, en las coordenadas UTM 16N 188253.7 1725100.8, se observa un afloramiento de calizas con intercalaciones de lutitas, se observa un ciclo de estratos de caliza, concreciones de caliza y lutitas, la estructura se encuentra orientado a 354/29.

El espesor del estrato de caliza es de 1.8 m, el espesor del estrato de lutitas va de 5 cm a 10 cm, con un estado levemente meteorizado, lo cual corresponde a una Meteorización grado II de acuerdo a la clasificación del ISRM de 1981, es ligeramente rugoso, con una continuidad de 10 metros.

El talud analizado se muestra a continuación en la figura 30.

Figura 30. **Afloramiento 2 ubicado en la estación 13+250 LI sobre la carretera**



Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (Santa María Cahabón, Alta Verapaz. 2022).
Colección Particular. Guatemala.

En la figura 31 se observan las concreciones de caliza.

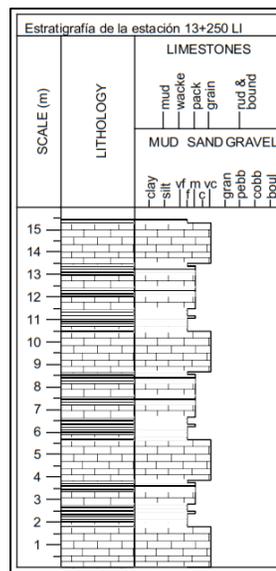
Figura 31. **Concreciones de caliza en el afloramiento 2 ubicado en la estación 13+250 LI sobre la carretera**



Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (Santa María Cahabón, Alta Verapaz. 2022).
Colección Particular. Guatemala.

En la figura 32 se observa la estratigrafía del afloramiento ubicado en la estación 13+250 LI. Como se puede observar, los suelos presentes varían de tamaño desde un tamaño de grano muy fino que puede ser una arcilla hasta uno fino que puede ser arena o limo.

Figura 32. **Estratigrafía del afloramiento ubicado en la estación 13+250 LI sobre la carretera**



Fuente: elaboración propia, empleando SedLog 3.1.

Se observó que existen dos familias de discontinuidades de las cuales se tiene la siguiente descripción. Para la familia 1, tiene una apertura que varía entre 1 mm y 5 mm, con un relleno de carbonato de calcio, tiene una textura rugosa en la caliza y ligeramente rugosa en la lutita, la longitud de las discontinuidades es mayor a 3 m, y se repiten cada 30 cm a 40 cm; las rocas calizas presentan una meteorización leve lo cual corresponde a una meteorización grado II de acuerdo a la clasificación del ISRM de 1981. Las lecturas de las orientaciones medidas de la familia 1, se presentan en la tabla XXX.

Tabla XXX. Orientación de la familia 1 de discontinuidades en el afloramiento 2

Lectura	Orientación
1	170/60
2	143/49
3	149/47
4	141/60

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Para la familia 2, una apertura de 1 mm a 5 mm con un relleno calcita, la longitud de las discontinuidades es 2 m, y se repiten cada metro, el espesor es de 20 cm a 50 cm, tiene una textura rugosa y se encuentra levemente meteorizada lo cual corresponde a una meteorización grado II de acuerdo a la clasificación del ISRM de 1981. Las lecturas de las orientaciones medidas de la familia 2, se presentan en la tabla XXXI.

Tabla XXXI. Orientación de la familia 2 de discontinuidades en el afloramiento 2

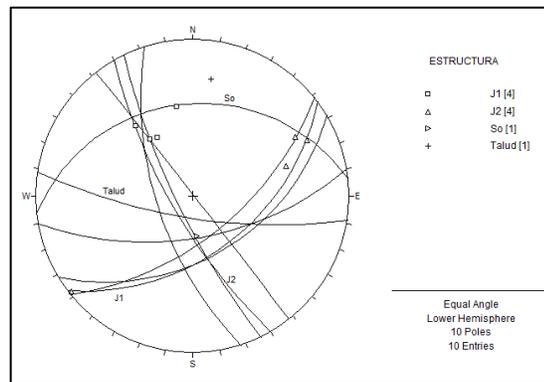
Lectura	Orientación
1	252/64
2	240/74
3	244/78
4	52/89

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Considerando las familias de discontinuidades encontradas, que la carretera tiene un rumbo NW-SE y la orientación del talud es 189/74; se procedió a realizar el análisis estructural por medio del análisis de la orientación de las familias de discontinuidades y el talud.

En la figura 33 se muestra la representación gráfica de los planos formados por las familias de discontinuidades familia 1 (J1) y familia 2 (J2), la estructura o estratificación (So) y el talud.

Figura 33. **Orientación de las familias de discontinuidades y estructura en relación al talud ubicado en la estación 13+250 LI sobre la carretera**



Fuente: elaboración propia, empleando Dips 6.0.

Como se puede observar en la figura 31 al realizar la relación de orientación de las familias de discontinuidades (J1 y J2), la estructura (So) y el talud. De la cual se puede observar que relación espacial y geométrica entre talud de corte y disposición geométrica de las discontinuidades J1 y J2, son patrones que potencialmente pueden generar deslizamiento en cuñas, con movimiento al sur o sureste.

Para el caso del tercer punto analizado el cual se encuentra ubicado a 368 msnm, en las coordenadas UTM 16N 188346.3, 1725359.1, se observa un afloramiento con base de caliza con intercalaciones de areniscas y lutitas, el espesor del estrato de caliza es de 30 cm, el de las areniscas varía entre 6 cm – 8 cm y el de lutitas varía entre 1 cm – 2 cm, con una orientación de la estructura

de 174/30. Tiene una abertura de 1 mm, con una continuidad de más de 100 m de longitud, una repetición entre 5 cm – 10 cm, su textura es moderadamente rugosa y se encuentra levemente meteorizado lo cual corresponde a una meteorización grado II de acuerdo a la clasificación del ISRM de 1981.

En la figura 34 se muestra el afloramiento 3.

Figura 34. **Afloramiento ubicado en la estación 14+270 LI sobre la carretera**



Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (Santa María Cahabón, Alta Verapaz. 2022).
Colección Particular. Guatemala.

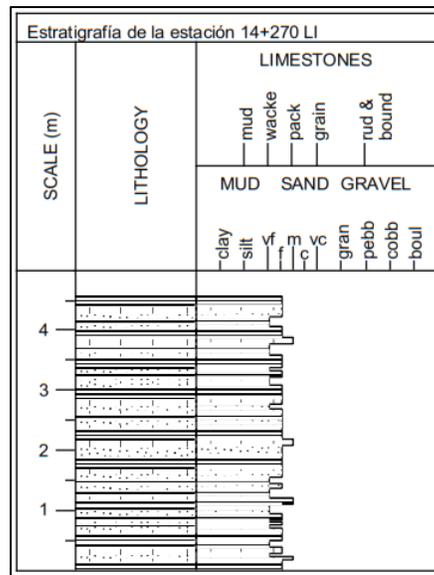
En la figura 35 se observan las intercalaciones de la caliza, areniscas y lutitas. Y en la figura 36 se observa la estratigrafía del afloramiento ubicado en la estación 14+270 LI, los suelos presentes varían de tamaño desde un tamaño de grano medio que puede ser una arena hasta uno muy fino que puede ser arcilla.

Figura 35. **Intercalaciones de caliza, arenisca y lutita en el afloramiento ubicado en la estación 14+270 LI sobre la carretera**



Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (Santa María Cahabón, Alta Verapaz. 2022).
Colección Particular. Guatemala.

Figura 36. **Estratigrafía del afloramiento del afloramiento ubicado en la estación 14+270 LI sobre la carretera**



Fuente: elaboración propia, empleando SedLog 3.1.

Se observó que existen dos familias de discontinuidades de las cuales se tiene la siguiente descripción. Para la familia 1, tiene una apertura que varía entre 1 mm y 2 mm, con un relleno de carbonato de calcio, tiene una textura rugosa, la longitud de las discontinuidades es mayor a 3 m, y se repiten cada 10 cm a 20 cm; la meteorización es de leve lo cual corresponde a una meteorización Grado II de acuerdo a la clasificación del ISRM de 1981.

Las lecturas de las orientaciones medidas de la familia 1, se presentan en la tabla XXXII.

Tabla XXXII. Orientación de la familia 1 de discontinuidades en el afloramiento 3

Lectura	Orientación
1	002/55
2	353/51
3	359/47
4	003/46

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Para la familia 2, una apertura de más d 5 mm con un relleno calcario, la longitud de las discontinuidades es mayor a 3 m, y se repiten cada 10 cm, tiene una textura moderadamente rugosa y se encuentra de levemente meteorizada lo cual corresponde a una meteorización grado II de acuerdo a la clasificación del ISRM de 1981.

Las lecturas de las orientaciones medidas de la familia 2, se presentan en la tabla XXXIII.

Tabla XXXIII. **Orientación de la familia 2 de discontinuidades en el afloramiento 3**

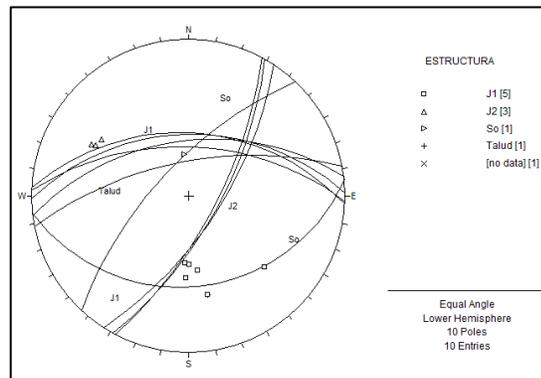
Lectura	Orientación
1	313/67
2	118/70
3	119/68
4	123/67

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Considerando las familias de discontinuidades encontradas, que la carretera tiene un rumbo NE-SW y la orientación del talud es 349/65; se procedió a realizar el análisis estructural por medio del análisis de la orientación de las familias de discontinuidades y el talud.

En la figura 37 se muestra la representación gráfica de los planos formados por: las familias de discontinuidades familia 1 (J1) y familia 2 (J2), la estructura o estratificación (So) y el talud.

Figura 37. **Orientación de las familias de discontinuidades en relación al talud ubicado en la estación 14+270 LI sobre la carretera**



Fuente: elaboración propia, empleando Dips 6.0.

Por la disposición geométrica de las discontinuidades y su relación con el talud, se pueden presentar tres situaciones: en la primera los planos formados por la familia de discontinuidades J1, puede generar deslizamientos tipo traslacional.

La segunda situación se puede presentar debido a la conjunción de las dos familias de discontinuidades J1 y J2, las cuales generan deslizamientos de cuña con movimiento hacia el NE.

Por último, la tercera situación que se puede presentar es debido a la familia de discontinuidades J2 y con la orientación de la carretera, la cual puede presentar deslizamientos en cuña y dependerá del ángulo en el rumbo de la carretera.

3.2. Toma de muestras de suelos

Al realizar la planificación del análisis de las características de los suelos se tenía previsto realizar toma de muestra por medio de perforaciones para poder obtener muestras inalteradas para ensayo triaxial o de corte directo; sin embargo, debido a la gran cantidad de planos de debilidad que presenta la formación no puede realizarse un ensayo que sea representativo para la unidad geológica total.

Por tal motivo se procedió a tomar muestras para realizar los ensayos de clasificación de los suelos de en diferentes puntos de las unidades geológicas encontradas y tabularlas por estratificación fina de los materiales.

A continuación, se describen los puntos de toma de muestras de suelo, clasificando cada uno de acuerdo a las características de los mismos considerando la litología de la formación.

Se realizó la toma de muestras sin excluir las diferentes ubicaciones donde se encontraron los materiales con características similares en cuanto a su formación.

El procedimiento para toma de muestra consistió en preparar sacos para el transporte de las muestras, cada saco fue identificado con la estación de donde fue extraído el material colocando un formato de identificación en el interior junto al material, además de anotar en el formato de registro de toma de muestras.

Para la extracción del material se utilizó una retroexcavadora como se muestra en la figura 38.

Figura 38. Toma de muestra de suelo en la estación 22+920 LD



Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (Santa María Cahabón, Alta Verapaz. 2022).
Colección Particular. Guatemala.

Se realizó la limpieza de la superficie y se realizó una remoción del suelo en el estrato para tomar de este suelo extraído la muestra para ensayo. El envasado de la muestra para el transporte se muestra en la figura 39.

Figura 39. **Toma de muestra de suelo en la estación 24+700 LD**



Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (Santa María Cahabón, Alta Verapaz. 2022).
Colección Particular. Guatemala.

Este procedimiento se realizó para todas las muestras de suelo recolectadas.

A continuación, en la tabla XXXIV se muestran las estaciones y coordenadas de los puntos donde se realizó la toma de muestras de los materiales clasificados inicialmente como arenas medias.

Tabla XXXIV. **Ubicación de los puntos de toma de muestra de arenas finas en el área de estudio**

No.	Estación	Coordenadas UTM
1	1+095	16N 181092.1 1724922.3
2	1+465	16N 181418.2 1724851.1
3	1+570	16N 181510.6 1724877.9
4	6+660	16N 181675.5 1725077.2
5	7+080	16N 185069.8 1724018.2
6	7+235	16N 185165.2 1723923.9
7	7+650	16N 185691.3 1723692.1
8	8+115	16N 185796.0 1723510.8
9	8+660	16N 186298.2 1723387.4

Continuación tabla XXXIV.

10	8+835	16N 186475.3 1723323.0
11	9+245	16N 186823.4 1723339.1
12	9+390	16N 186889.4 1723294.2
13	9+525	16N 186976.8 1723348.5
14	9+573	16N 187075.5 1723369.5
15	9+670	16N 187113.9 1723390.1
16	10+260	16N 187510.7 1723867.7
17	10+675	16N187648.2 1723884.1
18	10+975	16N 187864.7 1723831.8
19	11+230	16N 187944.8 1723975.9
20	11+550	16N 187830.9 1724418.7
21	11+910	16N 187924.9 1724490.3
22	12+040	16N 187908.0 1724568.3
23	20+270	16N 191886.2 1727489.2
24	20+460	16N 192019.1 1727611.3
25	24+520	16N 194793.8 1727758.7

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En la tabla XXXV, se muestran las estaciones y coordenadas de los puntos donde se realizó la toma de muestra de los materiales considerados bloques.

Tabla XXXV. Ubicación de los puntos de toma de muestra de los bloques en el área de estudio

No.	Estación	Coordenadas UTM
1	5+620	16N 183934.6 1724680.0
2	12+210	16N 187877.2 1724675.6
3	12+520	16N 188186.7 1724622.5
4	12+750	16N 188291.2 1724738.8
5	12+890	16N 188213.4 1724804.6
6	13+120	16N 188199.2 1725035.1
7	13+405	16N 188520.7 1724994.0

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXXVI. **Ubicación de los puntos de toma de muestra de gravas en el área de estudio**

No.	Estación	Coordenadas UTM
1	13+795	16N 188606.4 1725149.6
2	14+191	16N 188467.2 1725313.5
3	14+275	16N 188311.8 1725339.6
4	14+430	16N 188229.7 1725363.8
5	14+605	16N 188085.0 1725454.8
6	16+310	16N 189440.4 1725853.7
7	18+525	16N 190934.5 1726547.7
8	18+920	16N 190966.4 1726758.1
9	19+540	16N 191342.7 1727040.2
10	19+600	16N 191402.1 1727057.4
11	20+890	16N 192352.4 1727724.4
12	21+365	16N 192614.2 1727753.6
13	21+680	16N 192783.5 1727781.0
14	21+780	16N 193023.3 1727824.2
15	22+000	16N 193179.3 1727832.4
16	22+380	16N 193391.5 1727806.9
17	22+500	16N 193622.4 1727764.1
18	22+840	16N 193771.5 1727772.2
19	22+920	16N 193935.8 1727752.7

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En la tabla XXXVI donde se muestran las estaciones y coordenadas de los puntos donde se realizó la toma de muestra de los materiales considerados como gravas.

En los taludes que se encontraron materiales bajo estas tres clasificaciones anteriores, pero a su vez contenían una cantidad considerable de grauvacas se les realizó una toma de muestra aparte, la cual se registra a continuación en la tabla XXXVII.

Tabla XXXVII. **Ubicación de los puntos de toma de muestra de suelos estratificados con presencia de grauvacas en el área de estudio**

No.	Estación	Coordenadas UTM
1	2+160	16N 181873.7 1725305.1
2	3+050	16N 182679.9 1725130.2

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXXVIII. **Ubicación de los puntos de toma de muestra de los aluviones en el área de estudio**

No.	Estación	Coordenadas UTM
1	3+540	16N 183083.5 1725110.9
2	3+640	16N 183189.0 1725050.5
3	3+945	16N 183414.2 1724925.4
4	4+190	16N 183576.2 1724690.3
5	4+415	16N 183573.5 1724489.0
6	4+810	16N 183745.3 1724164.8
7	5+165	16N 183896.0 1724399.7
8	5+405	16N 183964.0 1724535.0
9	5+930	16N 184307.3 1724739.1
10	6+210	16N 184503.1 1724569.9
11	6+405	16N 184622.0 1724511.1
12	6+505	16N 184690.4 1724423.2
13	9+850	16N 187318.0 1723451.1
14	23+300	16N 194231.7 1727553.7
15	23+820	16N 194330.3 1727668.2

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La tabla XXXVIII muestra la estación y coordenadas de los puntos de toma de muestra de los aluviones existentes a lo largo de la carretera.

En la tabla XXXIX muestra la estación y coordenadas de los puntos de toma de muestra de los suelos que se encuentran junto a las rocas calizas.

Tabla XXXIX. **Ubicación de los puntos de toma de muestra de los suelos que se encuentran con las rocas calizas en el área de estudio**

No.	Estación	Coordenadas UTM
1	16+535	16N 189630.4 1725851.8
2	16+665	16N 189764.8 1725862.8
3	18+000	16N 190703.3 1726313.8

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3.3. Toma de muestras de rocas

Para realizar ensayos a las rocas encontradas se tomaron dos tipos de muestras las cuales se describen a continuación.

3.3.1. Muestras para análisis petrográfico

Para realizar el análisis petrográfico de las rocas encontradas a lo largo de la carretera, se seleccionó seis puntos a lo largo de toda la carretera, de los cuales se tomaron rocas de poco tamaño para enviarlas al laboratorio del Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas como se ilustra en la figura 40.

Figura 40. **Toma de muestra para análisis petrográfico en la estación
10+615 LI**



Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (San Agustín Lanquín, Alta Verapaz. 2021).
Colección Particular. Guatemala.

El tamaño de las rocas a enviar no es muy grande debido a que las mismas serán analizadas en el microscopio, las muestras de roca fueron colocadas en bolsas con la identificación correspondiente como se muestra en la figura 41.

Figura 41. **Muestras de roca para análisis petrográfico**



Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (San Agustín Lanquín, Alta Verapaz. 2021).
Colección Particular. Guatemala.

La ubicación de los puntos de toma de muestra de roca se describe a continuación en la tabla XL.

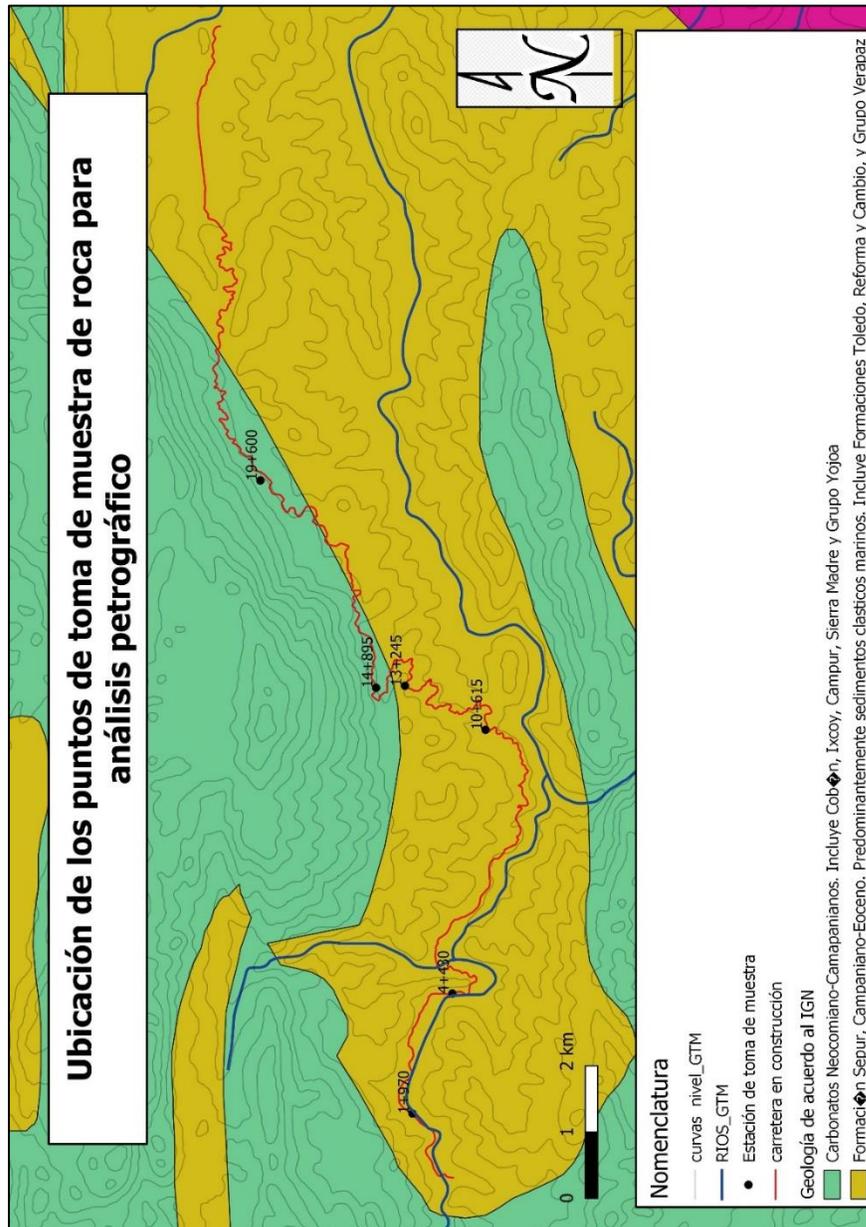
Tabla XL. **Ubicación de los puntos de toma de muestra de roca para análisis petrográfico en el área de estudio**

No.	Estación	Coordenadas UTM
1	1+970	16N 181769.0 1725167.0
2	4+430	16N 183567.6 1724513.8
3	10+615	16N 187542.1 1723899.4
4	13+245	16N 188242.3 1725098.4
5	14+895	16N 188224.6 1725535.0
6	19+600	16N 191408.5 1727196.3

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

A continuación, en la figura 42 se muestra la ubicación a lo largo de la carretera de los lugares donde se tomaron muestras de roca para análisis petrográfico.

Figura 42. **Ubicación de la toma de muestra de roca para ensayo para análisis petrográfico**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Instituto Geográfico Nacional. (2001).

Información geológica de Guatemala.

3.3.2. Muestras para compresión inconfinada

Al igual que los suelos, las rocas que se encuentran en la formación Sepur tienen muchos planos de discontinuidad, además no se encuentra un macizo rocoso de considerables dimensiones en el área de estudio, por ese motivo se realizó una toma de muestra rocas para extracción de núcleos de roca para ensayo de compresión inconfinada.

En la figura 43 se observa la toma de muestras de roca.

Figura 43. **Toma de muestra de roca en la estación 23+260**



Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (Santa María Cahabón, Alta Verapaz. 2022).

Colección Particular. Guatemala.

Las rocas fueron identificadas y transportadas al laboratorio para la preparación de las mismas para ensayo.

En la figura 44 se muestra el transporte de las rocas al laboratorio.

Figura 44. **Transporte de las rocas para su ensayo**



Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (Santa María Cahabón, Alta Verapaz. 2022).
Colección Particular. Guatemala.

La tabla XLI contiene la ubicación de los puntos de toma de muestra de roca para realizar el ensayo de compresión no confinada.

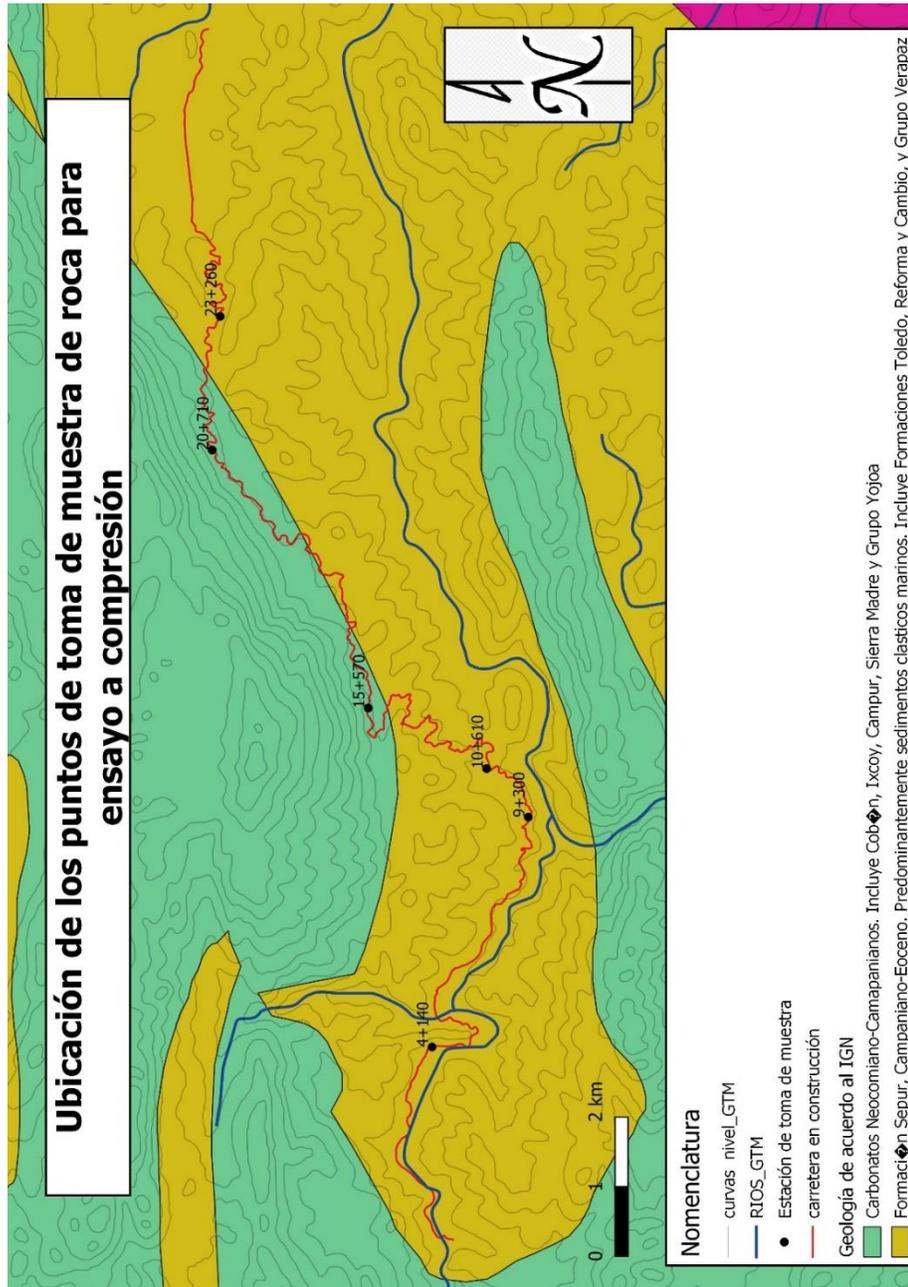
Tabla XLI. **Ubicación de los puntos de toma de muestra de roca para ensayo de compresión en el área de estudio**

No.	Estación	Coordenadas UTM
1	4+140	16N 183559.7 1724805.8
2	9+300	16N 186827.8 1723329.3
3	10+610	16N 187542.8 1723907.2
4	15+570	16N 188462.4 1725586.3
5	20+710	16N 192237.8 1727723.5
6	23+260	16N 194156.8 1727554.7

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En la figura 45 se muestra la ubicación de los puntos de toma de muestra de roca para ensayos a compresión a lo largo de la carretera.

Figura 45. Ubicación de la toma de muestra de roca para ensayo a compresión



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Instituto Geográfico Nacional. (2001).

Información geológica de Guatemala.

3.4. Registro de lluvia

Desde el inicio de la ejecución del proyecto durante los días laborados se ha llevado el registro de lluvia diario, iniciando el mes de noviembre del año 2018 hasta el mes de noviembre del año 2021, cuya información se muestra en la tabla XLII.

Tabla XLII. **Lluvia acumulada mensual en mm**

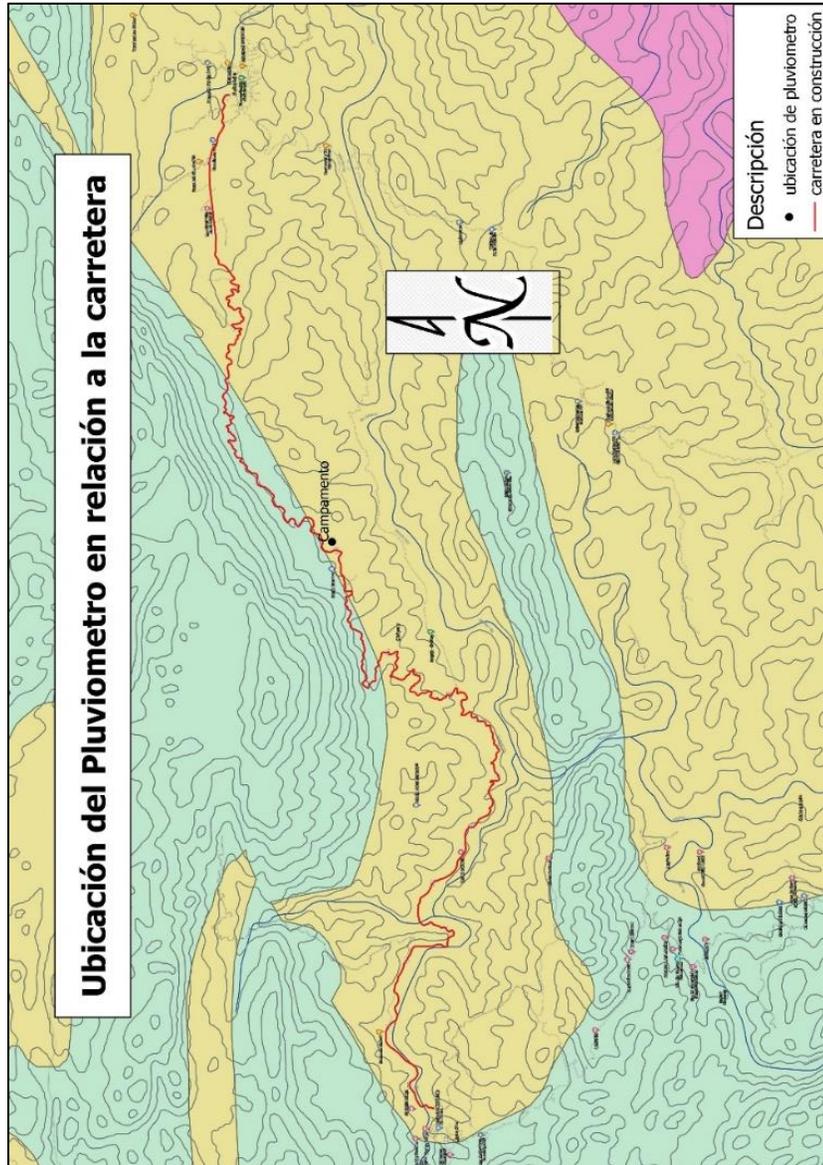
Mes	2018	2019	2020	2021
Enero	-----	103.9	201.9	273.1
Febrero	-----	102.1	162.3	131.8
Marzo	-----	17	112	79.2
Abril	-----	117.6	0	127.8
Mayo	-----	159.8	273.1	165.4
Junio	-----	169.6	335.8	336
Julio	-----	142.2	153.2	322.3
Agosto	-----	100.8	384.3	413.5
Septiembre	-----	273.1	709	255.8
Octubre	-----	210.6	442.7	121.7
Noviembre	-----	190.5	774.7	181.1
Diciembre	95	216.4	-----	-----
TOTAL	95	1,803.6	3,549	2,407.7

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Para ello se utilizó un formato, donde se registra la lectura de lluvia en mm a las 7:00 horas y a las 18:00 horas.

El registro de la lluvia se realiza por medio de lecturas en el pluviómetro ubicado donde se indica en la figura 46 con coordenadas 16N 190561.9, 1726053.2 en el laboratorio de suelos de la empresa constructora del proyecto.

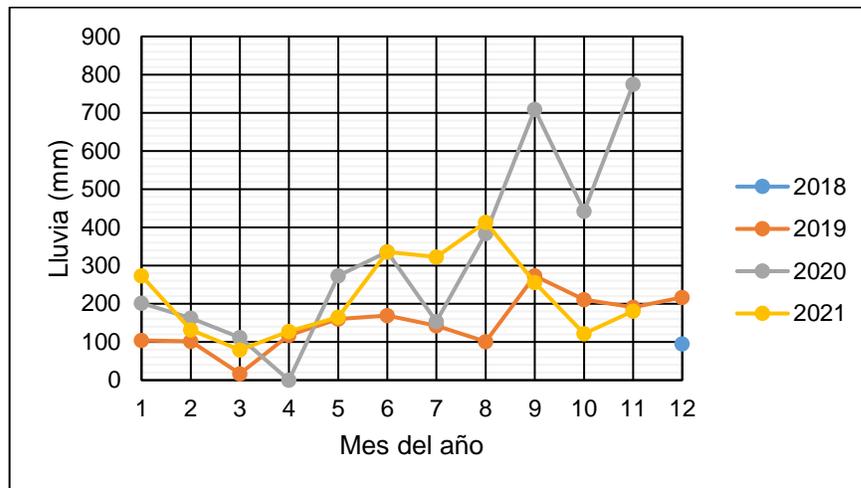
Figura 46. Ubicación del pluviómetro con relación a la carretera



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Instituto Geográfico Nacional. (2001).
Información geológica de Guatemala.

En la figura 47 se muestra el gráfico de la lluvia acumulada mensual.

Figura 47. **Lluvia acumulada mensual en mm**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En la tabla XLIII se resume la cantidad de días de lluvia por mes durante el tiempo del registro de la lluvia.

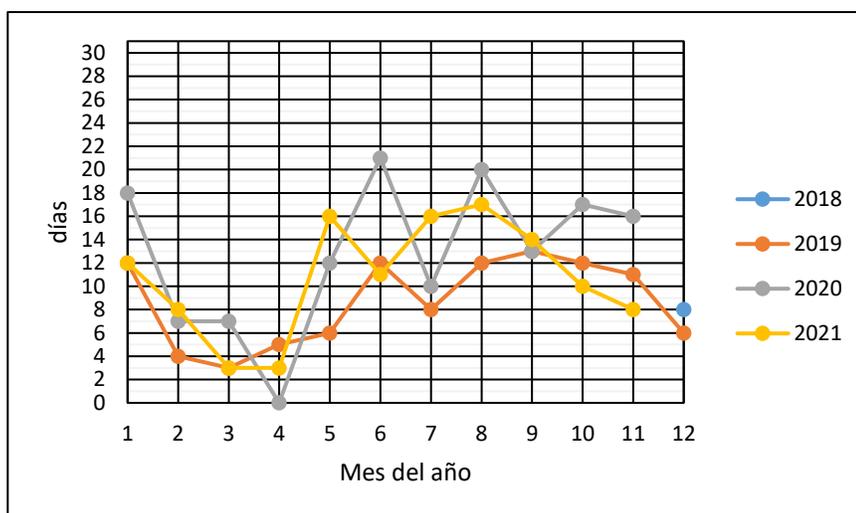
Tabla XLIII. **Días de lluvia mensual**

Mes	2018	2019	2020	2021
Enero	-----	12	18	12
Febrero	-----	4	7	8
Marzo	-----	3	7	3
Abril	-----	5	0	3
Mayo	-----	6	12	16
Junio	-----	12	21	11
Julio	-----	8	10	16
Agosto	-----	12	20	17
Septiembre	-----	13	13	14
Octubre	-----	12	17	10
Noviembre	-----	11	16	8
Diciembre	8	6	-----	-----
TOTAL	8	104	141	118

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

En la figura 48 se muestra el gráfico de los días de lluvia mensual.

Figura 48. **Días de lluvia mensual**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4. ENSAYOS DE LABORATORIO

A continuación, se describe el procedimiento utilizado para la ejecución de los ensayos y los cálculos realizados, para obtener las características de los suelos y de las rocas.

4.1. Ensayos de suelos

Para realizar la clasificación de los suelos se deben iniciar con los ensayos de clasificación como se describe a continuación, para ejemplificar el procedimiento y cálculo a realizar con todos los materiales, se utilizará como ejemplo la muestra de material extraída de la estación 3+050 lado derecho ubicado en las coordenadas 16N 182679.9, 1725130.2.

4.1.1. Granulometría

Se toma como referencia lo indicado en la normativa AASHTO T-27 Método de prueba estándar para el análisis por tamizado de agregados finos y gruesos.

El procedimiento consiste en medir la masa de suelo secada al horno a masa constante y determinar su masa total, posteriormente se hará pasar por la serie de tamices para determinar la masa que se retiene en cada uno de los tamices (AASHTO, 2008d).

Se realizaron 71 ensayos de granulometría para los cuales se utilizaron los tamices que proporcionan la información que sirve para realizar la clasificación y

los que ayuden a definir una curva que representa la granulometría de los suelos, los cuales se indican en la tabla XLIV.

Tabla XLIV. Tamices utilizados para la determinación de la granulometría de los suelos en los ensayos

Designación	Apertura
2 ½"	63.000 milímetros (mm)
2"	50.000 milímetros (mm)
1 ½"	37.500 milímetros (mm)
1"	25.000 milímetros (mm)
¾"	19.000 milímetros (mm)
½"	15.500 milímetros (mm)
3/8"	9.500 milímetros (mm)
No. 4	4.750 milímetros (mm)
No. 10	2.000 milímetros (mm)
No. 40	425 milímetros (mm)
No. 100	150 micrómetros (µm)
No. 200	75 micrómetros (µm)

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

El tamizado se llevó a cabo por el método manual, el cual consiste en sacudir la serie de tamices con movimientos que realicen circunferencias acompañadas de vibración y movimientos verticales y laterales, los cuales garanticen que la muestra de suelo se encuentre en constante movimiento sobre los tamices. Posteriormente se procede a pesar la cantidad de material que retuvo cada tamiz y se registra en acumulado para realizar el cálculo del porcentaje de material que pasa el tamiz de acuerdo a lo indicado en la especificación como se indica en la ecuación 1 mostrada a continuación.

$$CPR = \frac{CMR}{M} \times 100 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

CPR = Porcentaje de material retenido acumulado

CMR = Masa acumulada retenida

M = Masa total secada al horno

Es importante considerar que no debe incluirse la masa del recipiente que contiene la muestra al momento del ensayo.

Posteriormente al cálculo del porcentaje retenido se procede a realizar el cálculo del porcentaje de material que pasa cada tamiz como lo indica la normativa y se muestra en la ecuación 2 a continuación.

$$PP = 100 - CPR \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

PP = Porcentaje de material que pasa

CPR = Porcentaje de material retenido acumulado

Para finalizar el informe se elabora una gráfica de tipo logarítmica donde se traza el porcentaje que pasa en cada tamiz para observar la distribución granulométrica del material y verificar la coherencia en los resultados obtenidos en el ensayo.

Para el caso ejemplo se tiene una muestra inicial la cual fue lavada y secada al horno hasta alcanzar una masa constante de 2,869.9 gramos sin considerar la masa del recipiente que contiene la muestra.

Se procede al tamizado manual y posteriormente se determina la masa acumulada de los tamices, resultado que se muestra en la tabla XLV y se ilustra en la figura 49.

Figura 49. **Ensayo de granulometría por tamizado**



Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (Santa María Cahabón, Alta Verapaz. 2022).
Colección Particular. Guatemala.

Tabla XLV. **Masa neta acumulada registrada en el ensayo de granulometría por tamizado**

Tamices		Masa neta (g)
Pulg.	mm	Retenida (g)
2 1/2"	63.000	0
2"	50.000	0
1 1/2"	37.500	0
1"	25.000	0
3/4"	19.000	52.10
1/2"	12.500	134.30
3/8"	9.500	254.60
No. 4	4.750	593.80
No. 10	2.000	1002.20
No. 40	0.425	1627.80
No. 100	0.150	2252.10
No. 200	0.075	2448.70

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Al tener registradas las masas acumuladas se procede a calcular el porcentaje de masa acumulada utilizando la ecuación 1, como se muestra a continuación.

$$CPR_{3/4"} = \frac{52.10}{2,869.9} \times 100 = 1.8$$

$$CPR_{1/2"} = \frac{134.30}{2,869.9} \times 100 = 4.7$$

$$CPR_{3/8"} = \frac{254.60}{2,869.9} \times 100 = 8.9$$

$$CPR_{No.4} = \frac{593.80}{2,869.9} \times 100 = 20.7$$

$$CPR_{No.10} = \frac{1002.20}{2,869.9} \times 100 = 34.9$$

$$CPR_{No.40} = \frac{1627.80}{2,869.9} \times 100 = 56.7$$

$$CPR_{No.100} = \frac{2252.10}{2,869.9} \times 100 = 78.5$$

$$CPR_{No.200} = \frac{2448.70}{2,869.9} \times 100 = 85.3$$

Posteriormente se calcula el porcentaje de material que pasa como lo indica la ecuación 2 y se muestra a continuación.

$$PP_{\frac{3}{4}"} = 100 - 1.8 = 98.2$$

$$PP_{\frac{1}{2}"} = 100 - 4.7 = 95.3$$

$$PP_{\frac{3}{8}"} = 100 - 8.9 = 91.1$$

$$PP_{No.4} = 100 - 20.7 = 79.3$$

$$PP_{No.10} = 100 - 34.9 = 65.1$$

$$PP_{No.40} = 100 - 56.7 = 43.3$$

$$PP_{No.100} = 100 - 78.5 = 21.5$$

$$PP_{No.200} = 100 - 85.3 = 14.7$$

Al concluir los cálculos se procede a registrar todos los valores en una tabla la cual sirve de base para generar la gráfica correspondiente, para el ejemplo, la masa neta es de 2,869.9 gramos. Los resultados de todos los ensayos realizados se muestran en la tabla XLVI.

Tabla XLVI. **Tabla resumen de los cálculos de la granulometría del material ejemplo**

Tamices		Masa neta (g)	Masa neta (g)	%	%
Pulg.	Mm	Retenida acumulada	Pasa	Retenido	Pasa
2 ½"	63.000	0	2869.9	0	100
2"	50.000	0	2869.9	0	100
1 ½"	37.500	0	2869.9	0	100
1"	25.000	0	2869.9	0	100
¾"	19.000	52.10	2817.8	1.8	98.2

El procedimiento descrito anteriormente fue el realizado a cada material para determinar el tamaño de sus granos, dicho procedimiento se realizó en el laboratorio de la empresa SBI International Holdings AG, la cual me autorizó el uso de los resultados de los ensayos realizados para la elaboración del presente trabajo de graduación. El análisis granulométrico de todos los materiales se presenta a continuación en las tablas XLVII y XLVIII.

Tabla XLVII. Resumen de análisis granulométrico de los materiales entre las estaciones 0+000 a 8+000

Estación	% Material que pasa en tamiz										
	2½"	2"	1 ½"	1"	¾"	½"	⅜"	No.4	No.10	No.40	No.200
	63	50	38	25	19	12.5	9.5	4.75	2	0.425	0.075
1+095	-	-	-	100.0	94.9	92.5	87.0	68.5	39.6	12.2	4.8
1+465	-	-	-	-	100.0	99.2	97.5	85.8	61.7	22.2	9.6
1+570	-	-	-	100.0	98.9	97.2	93.3	77.3	54.6	25.4	13.7
2+160	-	-	-	-	-	-	100.0	97.1	86.1	64.2	28.1
3+050	-	-	-	100.0	98.2	95.3	91.1	79.3	65.1	43.3	14.7
3+540	-	-	-	100.0	99.8	96.9	87.5	67.4	53.4	35.3	11.5
3+640	-	-	-	100.0	97.2	90.7	84.7	66.0	45.6	22.4	10.9
3+945	-	-	-	-	100.0	93.1	82.8	63.7	45.4	29.1	16.5
4+190	-	-	-	100.0	94.0	88.3	80.9	59.3	34.7	13.9	7.5
4+415	-	-	-	100.0	95.2	90.7	83.1	60.3	38.8	17.2	6.3
4+810	-	-	-	-	100.0	95.4	86.8	69.7	53.3	30.1	14.1
5+165	-	-	100.0	95.4	93.2	84.2	73.9	50.7	30.2	13.7	6.9
5+405	-	-	-	100.0	97.1	94.8	93.1	86.5	70.9	21.6	5.7
5+620	-	-	-	-	100.0	98.5	95.2	82.0	68.7	43.0	15.0
5+930	-	-	-	-	100.0	99.6	99.0	90.1	68.7	38.6	19.5
6+210	-	-	-	100.0	92.9	89.9	86.4	75.4	53.7	16.5	6.3
6+405	-	-	-	100.0	96.7	95.9	93.7	86.0	68.5	32.0	7.1
6+505	-	-	-	-	-	100.0	99.4	97.1	87.7	50.6	23.0
6+660	-	-	-	100.0	95.8	92.2	83.4	60.1	36.8	17.3	8.9
7+080	-	-	-	-	-	100.0	98.8	93.4	75.0	47.7	30.8
7+235	-	-	-	100.0	87.4	80.9	77.4	67.5	55.7	35.5	17.5
7+650	-	-	-	100.0	85.3	79.0	66.8	45.0	30.9	19.1	8.7
8+115	-	-	-	100.0	96.8	95.7	90.8	66.8	39.7	15.5	7.9
8+660	-	-	100.0	95.9	95.9	88.5	81.1	66.3	47.0	19.9	8.8

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XLVIII. **Resumen de análisis granulométrico de los materiales entre las estaciones 7+100 a 25+000**

Estación	% Material que pasa en tamiz										
	2½"	2"	1 ½"	1"	¾"	½"	3/8"	No.4	No.10	No.40	No.200
	63	50	38	25	19	12.5	9.5	4.75	2	0.425	0.075
8+835	-	-	-	-	100.0	95.4	89.0	70.6	49.1	20.8	9.2
9+245	-	-	-	-	-	100.0	99.6	89.8	59.2	21.3	9.0
9+390	-	-	-	-	100.0	98.4	94.0	78.7	53.7	20.6	10.0
9+525	-	-	100.0	98.0	97.6	92.6	83.9	55.7	30.6	12.2	6.3
9+573	-	-	-	100.0	97.6	93.6	91.9	72.4	51.5	20.9	11.2
9+670	-	-	-	-	100.0	99.5	96.7	85.0	67.0	38.9	20.2
9+850	-	-	-	-	100.0	89.6	78.2	52.1	29.5	10.7	4.8
10+260	-	-	-	-	100.0	99.1	97.2	88.4	67.2	26.6	10.6
10+675	-	-	-	-	-	-	100.0	99.0	91.2	51.0	20.2
10+975	-	-	-	-	100.0	99.7	99.0	91.2	55.5	15.2	5.5
11+230	-	-	-	-	100.0	99.4	98.0	89.6	69.3	31.9	16.1
11+550	-	-	-	-	100.0	98.0	94.6	83.2	70.8	39.3	21.1
11+910	-	-	-	-	100.0	95.9	89.0	69.8	51.5	25.7	11.4
12+040	-	-	-	-	100.0	96.8	89.9	66.0	46.2	25.3	12.3
12+210	-	-	-	-	-	-	-	100.0	85.9	37.5	17.2
12+520	-	-	-	-	-	100.0	91.6	67.9	50.2	33.8	12.7
12+750	-	-	100.0	99.1	99.1	98.5	96.4	82.5	60.9	31.4	14.4
12+890	-	-	100.0	98.1	97.7	91.4	80.1	59.3	43.1	24.1	10.3
13+120	-	-	-	-	100.0	98.4	92.8	73.4	56.8	36.5	16.6
13+405	-	-	-	-	100.0	93.2	83.7	63.0	47.4	29.0	7.6
13+795	-	-	-	-	-	100.0	91.0	73.1	55.6	34.0	17.8
14+191	-	-	-	-	-	100.0	86.6	67.5	51.4	29.4	16.9
14+275	-	-	-	-	100.0	95.6	89.3	75.3	61.8	38.6	17.6
14+430	-	100.0	92.5	92.5	92.5	86.7	77.3	56.3	43.8	27.3	15.8
14+605	-	-	100.0	95.2	92.4	84.6	74.1	54.1	37.2	17.4	8.7
16+310	-	-	-	-	-	-	100.0	97.4	85.1	59.2	33.5
16+535	-	-	-	-	100.0	91.9	83.4	70.4	53.3	26.0	9.9
16+665	-	-	-	-	-	-	100.0	93.8	75.6	40.7	21.3
18+000	100.0	93.6	89.0	77.1	72.3	61.3	54.4	38.8	27.1	17.7	12.9
18+525	100.0	82.7	78.1	67.4	65.8	60.2	53.6	40.0	32.1	20.1	10.5
18+920	-	-	-	100.0	97.0	91.0	87.0	74.0	61.0	45.0	20.0
19+540	-	-	-	-	-	100.0	97.1	86.6	73.8	49.8	15.9
19+600	-	-	100.0	84.2	80.6	80.0	63.3	50.4	39.6	22.0	10.1
20+270	-	-	-	-	-	-	100.0	99.1	90.0	67.8	36.8
20+460	-	100.0	94.8	84.4	75.8	66.0	60.6	50.2	37.7	18.6	9.0
20+890	-	100.0	93.7	88.2	82.5	75.9	73.7	66.5	54.5	17.9	5.3
21+365	-	100.0	98.0	90.5	85.3	78.0	70.7	55.3	39.2	20.7	10.7
21+680	-	-	100.0	90.8	86.8	78.7	72.1	56.9	41.9	23.5	10.2
21+780	-	-	100.0	96.1	83.7	69.1	61.3	47.0	34.0	20.5	10.1
22+000	-	-	100.0	94.4	90.6	86.7	82.8	75.0	65.6	44.9	23.7
22+380	-	-	100.0	95.1	84.4	72.9	65.4	50.5	39.3	27.6	18.0
22+500	-	100.0	94.6	85.4	79.0	65.6	59.7	47.4	37.6	24.4	11.8
22+840	-	100.0	95.0	89.0	76.0	64.0	57.0	48.0	40.0	28.0	12.0
22+920	-	100.0	85.0	76.0	71.0	64.0	58.0	45.0	33.0	22.0	18.0
23+300	-	-	-	-	100.0	99.0	96.0	84.0	68.0	44.0	21.0
23+280	-	-	100.0	98.0	97.0	93.0	90.0	78.0	65.0	42.0	20.0
24+520	-	-	-	-	100.0	99.4	97.9	90.1	64.3	22.6	7.9

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Los cálculos de la granulometría fueron realizados mediante una hoja de cálculo de Excel.

4.1.2. Límite líquido

Para realizar el ensayo descrito en la normativa AASHTO T-89 Método estándar de prueba para determinar el límite líquido de suelos, este ensayo se realiza para determinar el contenido de humedad (en porcentaje) de un suelo, donde el mismo se encuentran entre los estados líquido y plástico, lo cual se denomina límite líquido (AASHTO, 2008e).

La norma describe el procedimiento a utilizar el cual consiste en tener una mezcla uniforme de suelo y agua que permita formar una pasta, la cual es colocada en un recipiente utilizando una espátula para distribuir la masa de suelo en el fondo, de tal manera que se forme un círculo en el fondo con la masa de suelo cuyo espesor en su punto máximo sea de 10 mm en teniendo el cuidado de que no existan burbujas de aire. Con un ranurador se realiza una ranura a lo largo del diámetro del círculo de la superficie dividiendo la pasta de suelo en dos.

Posteriormente se procede a golpear el recipiente a velocidad constante hasta lograr que en el fondo ambas partes se unan a lo largo de aproximadamente 13 mm (0.5 ") y se registra el número de golpes con lo que se logra dicha unión, si el número de golpes es muy pequeño se debe agregar material seco para endurecer la masa, si el número de golpes es muy grande se añade agua hasta lograr un número con el cual se pueda determinar el factor correspondiente de los indicados en las tablas de la normativa el cual se utilizará para determinar el límite líquido, este procedimiento se repite con tres números de golpes diferentes.

Al lograr dicho objetivo se determina el porcentaje de humedad con el cual se logra realizar la unión de las dos partes en cada número de golpes determinado utilizando la ecuación 3.

$$\%h = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

$\%h$ = Porcentaje de humedad

M_h = Masa de la muestra húmeda de suelo tomada al finalizar los golpes

M_s = Masa de la muestra de suelo secada al horno

Con estos tres valores se genera una gráfica en la cual se correlaciona el número de golpes y el porcentaje de humedad, en esta gráfica se puede determinar el límite líquido el cual corresponde al porcentaje con el cual se intersecta la gráfica en el eje x con 25 golpes. Otra forma de realizar el cálculo es utilizando la ecuación 4.

$$LL = W_N \left(\frac{N}{25} \right)^{0.121} \quad (\text{Ec. 4})$$

O con la ecuación 5

$$LL = kW_N \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

LL = Límite líquido corregido para el cierre a 25 golpes

N = Número de golpes que originen el cierre del material

W_N = Contenido de agua

k = Factor de corrección de la tabla XLIX

Tabla XLIX. **Factor de corrección para el cálculo del límite líquido**

Número de golpes N	Factor para el límite líquido (k)
22	0.985
23	0.990
24	0.995
25	1.000
26	1.005
27	1.009
28	1.014

Fuente: American Association of State Highways and Transportation Officials. (2008e). *Método estándar de prueba para determinar el límite líquido de suelos*.

En la figura 51 se ilustra el ensayo de límite líquido.

Figura 51. **Ensayo para determinar el límite líquido**



Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (Santa María Cahabón, Alta Verapaz. 2022).
Colección Particular. Guatemala.

Para el ejemplo se utilizó el material de la muestra tomada en la estación 3+050 lado derecho, con el cual se obtuvieron los siguientes datos mostrados en la tabla L.

Tabla L. **Masas obtenidas en el ensayo**

Dato registrado	Muestra		
	1	2	3
Muestra	1	2	3
Tara No.	17	18	19
Masa de la tara (g)	50.40	50.23	50.30
No de golpes	13	23	33
Masa húmeda + tara (g)	58.24	58.21	58.40
Masa seca + tara (g)	56.27	56.32	56.60

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Posteriormente se procede a sacar la masa húmeda (M_h) y masa seca (M_s) la cual se calcula restando el valor de la tara a la masa obtenida en el ensayo.

$$M_h = (\text{Masa húmeda} + \text{tara}) - \text{tara} \quad (\text{Ec. 6})$$

Para la muestra 1 tenemos:

$$M_h = (\text{Masa húmeda} + \text{tara}) - \text{tara} = 58.24g - 50.40g = 7.84g$$

$$M_s = (\text{Masa seca} + \text{tara}) - \text{tara} = 56.27g - 50.40g = 5.87g$$

Para la muestra 2 tenemos:

$$M_h = (\text{Masa húmeda} + \text{tara}) - \text{tara} = 58.21g - 50.23g = 7.98g$$

$$M_s = (\text{Masa seca} + \text{tara}) - \text{tara} = 56.32g - 50.23g = 6.09g$$

Para la muestra 3 tenemos:

$$M_h = (\text{Masa húmeda} + \text{tara}) - \text{tara} = 58.40g - 50.30g = 8.10g$$

$$M_s = (\text{Masa seca} + \text{tara}) - \text{tara} = 56.60g - 50.30g = 6.30g$$

Con estos datos se calcula la humedad de cada muestra de acuerdo a la ecuación 3, como se muestra a continuación.

Para la muestra 1 tenemos:

$$\%h = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 = \frac{7.84 - 5.87}{5.87} \times 100 = 33.6 \%$$

Para la muestra 2 tenemos:

$$\%h = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 = \frac{7.98 - 6.09}{6.09} \times 100 = 31.0 \%$$

Para la muestra 3 tenemos:

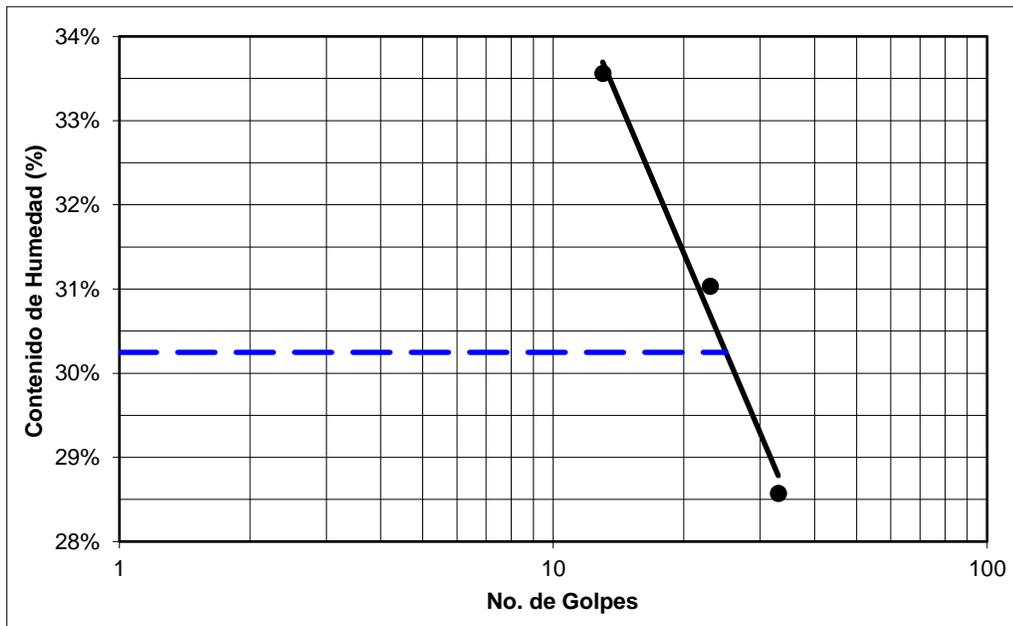
$$\%h = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 = \frac{8.10 - 6.30}{6.30} \times 100 = 28.6 \%$$

Si se realiza el cálculo del límite líquido por medio de la ecuación 4, se tendría como resultado el obtenido como se muestra a continuación.

$$LL = W_N \left(\frac{N}{25} \right)^{0.121} = 31.0 \left(\frac{23}{25} \right)^{0.121} = 30.7$$

Para el caso en el que se calcule por medio de la gráfica obtenida a partir de los datos de las tres muestras, en una hoja de cálculo de Excel se procede a elaborar una gráfica logarítmica como la mostrada en la figura 52.

Figura 52. **Gráfica para determinación del límite líquido de la muestra tomada en la estación 3+050 LD**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Como se puede observar en la gráfica, son tres series importantes; la primera corresponde a los puntos que muestran el número de golpes para el cierre del material y su humedad correspondiente. La segunda serie corresponde a la línea (línea negra sólida) de correlación que representa a dichos valores y que sirve para determinar el límite líquido. Por último, la serie que ayuda a

determinar el valor del límite líquido ya que inicia donde se localiza la intersección de los 25 golpes con la línea de correlación y finaliza en el eje donde se localiza el porcentaje de humedad de tal forma que se puede determinar el mismo, el cual corresponde al valor del límite líquido.

Como se indicó anteriormente este análisis se realiza en una hoja de cálculo la cual facilita la determinación de la línea de correlación y encontrar el valor del límite líquido por medio de una ecuación, esto se realizó utilizando la hoja de cálculo de Excel y el resultado obtenido para el material indicado es de 30.2; los resultados se muestran en la tabla LI y LII.

Tabla LI. Resumen de resultados del ensayo de límite líquido de los materiales entre las estaciones 0+000 a 8+000

Estación	Límite Líquido
1+095	41.0
1+465	42.9
1+570	57.6
2+160	47.3
3+050	30.2
3+540	34.5
3+640	35.9
3+945	42.1
4+190	45.3
4+415	35.3
4+810	34.5
5+165	36.4
5+405	No Líquido
5+620	35.2
5+930	43.4
6+210	39.9
6+405	21.2
6+505	38.7
6+660	33.7
7+080	48.2
7+235	36.2
7+650	38.4

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LII. Resumen de resultados del ensayo de límite líquido de los materiales entre las estaciones 8+000 a 25+000

Estación	Límite Líquido
8+115	34.7
8+660	38.7
8+835	33.4
9+245	43.0
9+390	34.1
9+525	32.2
9+573	36.4
9+670	34.3
9+850	33.0
10+260	37.0
10+675	39.6
10+975	45.0
11+230	38.5
11+550	37.1
11+910	37.8
12+040	34.8
12+210	38.5
12+520	33.0
12+750	36.9
12+890	36.3
13+120	34.2
13+405	39.3
13+795	39.0
14+191	42.8
14+275	39.9
14+430	37.9
14+605	37.8
16+310	43.2
16+535	45.1
16+665	46.8
18+000	42.4
18+525	34.7
18+920	44.0
19+540	43.1
19+600	50.4
20+270	48.4
20+460	41.7
20+890	26.5
21+365	40.4
21+680	41.0
21+780	39.9
22+000	44.2
22+380	29.5
22+500	40.7
22+840	73.1
22+920	33.4
23+300	38.4
23+820	37.2
24+520	40.0

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.1.3. Límite plástico

Se sigue el procedimiento descrito en la normativa AASHTO T-90, en éste se determinan en porcentaje el contenido de humedad más bajo de un suelo, donde el mismo se encuentran en el estado plástico, lo cual se denomina límite plástico.

El procedimiento consiste en elaborar rollos de material mediante hacer rodar una pequeña cantidad de la masa de suelo entre la palma de la mano y/o los dedos, sobre una superficie la cual debe estar en una posición horizontal, debe ser lisa y puede estar formada de papel o vidrio esmerilado aplicando una fuerza adecuada para formar un rollo con el suelo, el cual vaya disminuyendo su diámetro hasta alcanzar los 3 mm; dicho procedimiento se debe realizar en no más de dos minutos.

El suelo debe contener la cantidad de agua necesaria, que permita realizar dichos rollos de material, lo cual es el indicativo que el material conserva el estado plástico, los rollos del material se colocan en recipientes cerrados previamente pesados, para que no pierdan la humedad y se colocan en por lo menos dos recipientes, realizando los rollos necesarios para obtener un aproximado de 8 gramos o más de material para colocarlo en el horno y secar el material a peso constante.

La cantidad de agua que contiene el material con la cual se realiza esta actividad, se le denomina límite plástico y se determina mediante la ecuación 7, la cual se muestra a continuación.

$$LP = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

LP = Límite plástico

M_h = Masa de la muestra húmeda de suelo tomada al finalizar la elaboración de rollos

M_s = Masa de la muestra de suelo secada al horno

En la figura 53, se muestra parte del procedimiento del ensayo para determinar el límite plástico.

Figura 53. **Ensayo para determinar el límite plástico**



Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (Santa María Cahabón, Alta Verapaz. 2022).
Colección Particular. Guatemala.

Para el caso del material ubicado en la estación 3+050 lado derecho; se realizó el procedimiento, con lo cual se obtuvo los resultados de la medición de las masas mostrados en la tabla LIII.

Tabla LIII. **Datos registrados de las masas del material para la determinación del límite plástico**

Dato registrado	Muestras	
Muestra	1	2
Tara No.	7	8
Masa de la tara (g)	50.49	50.13
Masa húmeda + tara (g)	53.29	53.03
Masa seca + tara (g)	52.70	52.42

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Con estos valores se procede a calcular la masa seca y húmeda restando la tara como se muestra a continuación.

Para la muestra 1 tenemos:

$$M_h = (\text{Masa húmeda} + \text{tara}) - \text{tara} = 53.29 \text{ g} - 50.49 \text{ g} = 2.80 \text{ g}$$

$$M_s = (\text{Masa seca} + \text{tara}) - \text{tara} = 52.70 \text{ g} - 50.49 \text{ g} = 2.21 \text{ g}$$

Para la muestra 2 tenemos:

$$M_h = (\text{Masa húmeda} + \text{tara}) - \text{tara} = 53.03 \text{ g} - 50.13 \text{ g} = 2.90 \text{ g}$$

$$M_s = (\text{Masa seca} + \text{tara}) - \text{tara} = 52.42 \text{ g} - 50.13 \text{ g} = 2.29 \text{ g}$$

Con los datos obtenidos se procede a calcular el límite plástico en las muestras de acuerdo a la ecuación 7.

Para la muestra 1 tenemos:

$$LP = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 = \frac{2.80 - 2.21}{2.21} \times 100 = 26.7$$

Para la muestra 2 tenemos:

$$LP = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 = \frac{2.90 - 2.29}{2.29} \times 100 = 26.6$$

Para el reporte se realiza el promedio de ambas muestras con lo que el LP es 26.7.

$$LP = \frac{M_1 - M_2}{2} = \frac{26.7 - 26.6}{2} = 26.7$$

Al igual que el límite líquido el límite plástico se calculó por medio de una hoja de cálculo en Excel.

Se realizó el ensayo para determinar el límite plástico de todos los materiales los cuales se presentan en las tablas LIV, LV y LVI a continuación.

Tabla LIV. Resumen de resultados del ensayo de límite plástico de los materiales entre las estaciones 0+000 a 4+300

Estación	LP
1+095	30.0
1+465	34.0
1+570	41.3
2+160	38.0
3+050	26.7
3+540	26.4
3+640	28.3
3+945	30.8
4+190	35.4

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LV. **Resumen de resultados del ensayo de límite plástico de los materiales entre las estaciones 4+300 a 20+500**

Estación	LP
4+415	24.5
4+810	27.3
5+165	27.4
5+405	No Plástico
5+620	25.4
5+930	34.9
6+210	29.6
6+405	18.3
6+505	32.0
6+660	25.9
7+080	32.7
7+235	25.3
7+650	28.6
8+115	25.9
8+660	30.5
8+835	25.0
9+245	34.3
9+390	26.0
9+525	24.4
9+573	25.2
9+670	28.0
9+850	25.7
10+260	30.2
10+675	31.7
10+975	31.6
11+230	27.8
11+550	26.6
11+910	27.1
12+040	22.3
12+210	29.2
12+520	28.8
12+750	26.5
12+890	26.1
13+120	26.5
13+405	26.9
13+795	28.0
14+191	26.4
14+275	27.6
14+430	29.3
14+605	29.0
16+310	31.9
16+535	34.6
16+665	32.2
18+000	24.5
18+525	26.3
18+920	33.0
19+540	36.9
19+600	29.6
20+270	41.2
20+460	31.3

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LVI. **Resumen de resultados del ensayo de límite plástico de los materiales entre las estaciones 20+500 a 25+000**

Estación	LP
20+890	21.3
21+365	29.5
21+680	30.0
21+780	29.6
22+000	31.9
22+380	20.2
22+500	26.8
22+840	45.1
22+920	23.6
23+300	28.6
23+820	30.8
24+520	31.0

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.1.4. Índice de plasticidad

Para determinar el índice de plasticidad se realiza el procedimiento descrito en la normativa AASHTO T-90.

El índice de plasticidad es el rango o intervalo de humedad necesario en el que el suelo mantiene su estado plástico, por lo que para determinar el índice de plasticidad se utiliza la ecuación 8. Sin embargo, en el caso en el que no se pueda determinar el límite líquido, o que el límite plástico sea igual o mayor al límite líquido debe reportarse el material como no plástico.

$$IP = \text{Límite Líquido} - \text{Límite Plástico} \quad (\text{Ec. 8})$$

En el caso del material ubicado en la estación 3+050 lado derecho, se realizó el cálculo del índice de plasticidad con los datos mostrados en la tabla LVII a continuación.

Tabla LVII. **Datos para el cálculo del índice de plasticidad**

Descripción	Valor
Límite líquido	30.3
Límite plástico	26.7

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Estos valores se utilizaron para realizar el cálculo descrito en la Ecuación 7 como se muestra a continuación.

$$P = \text{Límite Líquido} - \text{Límite Plástico} = 30.3 - 26.7 = 3.6$$

Estos cálculos al igual que los anteriores descritos se realizaron para todos los materiales en una hoja de Excel y cuyos resultados se resumen a continuación en las tablas LVIII, LIX y LX.

Tabla LVIII. **Resumen de resultados de la determinación del índice de plasticidad de los materiales entre las estaciones 0+000 a 4+500**

Estación	IP
1+095	11.0
1+465	9.0
1+570	16.3
2+160	9.3
3+050	3.6

Continuación tabla LVIII.

3+540	8.1
3+640	7.6
3+945	11.3
4+190	9.8
4+415	10.8

Fuente:elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LIX. Resumen de resultados de la determinación del índice de plasticidad de los materiales entre las estaciones 4+500 a 25+000

Estación	IP
4+810	7.3
5+165	9.1
5+405	No Plástico
5+620	9.8
5+930	8.6
6+210	10.3
6+405	2.9
6+505	6.6
6+660	7.7
7+080	15.6
7+235	10.9
7+650	9.7
8+115	8.8
8+660	8.2
8+835	8.4
9+245	8.7
9+390	8.1
9+525	7.9

Continuación tabla LIX.

9+573	11.3
9+670	6.3
9+850	7.3
10+260	6.8
10+675	7.9
10+975	13.4
11+230	10.6
11+550	10.5
11+910	10.7
12+040	12.5
12+210	9.3
12+520	4.3
12+750	10.3
12+890	10.2
13+120	7.7
13+405	12.4
13+795	11.0
14+191	16.4
14+275	12.4
14+430	8.7
14+605	8.8
16+310	11.2
16+535	10.4
16+665	14.6
18+000	18.0
18+525	8.3
18+920	11.0
19+540	6.2
19+600	20.9
20+270	7.2
20+460	10.4
20+890	5.2

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LX. **Resumen de resultados de la determinación del índice de plasticidad de los materiales entre las estaciones 4+500 a 21+000**

Estación	IP
21+365	10.9
21+680	11.0
21+780	10.2
22+000	12.3
22+380	13.9
22+500	28.0
22+840	9.8
22+920	9.9
23+300	5.1
23+820	6.4
24+520	9.0

Fuente:elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.1.5. Ensayo de densidad-humedad (Proctor)

Para realizar el ensayo descrito en la normativa AASHTO T180, este ensayo se realiza para determinar el peso seco del suelo con diferentes contenidos de humedad (en porcentaje).

La norma describe el procedimiento a utilizar el cual consiste en mezclar la muestra de suelo, posteriormente se prepara un espécimen compactando el suelo en el molde de 4" de diámetro (el cual debe tener un collar ajustado) en tres capas que tengan aproximadamente la misma altura, cada capa se compacta con 25 golpes los cuales se deben distribuir uniformemente con un martillo de 4.54

kg (10 lb) con altura de 457 mm (18 pulgadas). Durante todo el proceso el molde debe permanecer en una superficie firme.

Posteriormente al llenado se procede a retirar el collar y se recorta el exceso del suelo del molde, de forma que no sobresalga el material del molde utilizando una regla metálica. Al limpiar terminar de quitar el exceso de suelo se procede a pesar el molde con el material dentro (el cual se registra en Kg.)

Al concluir el peso del molde se procede a sacar el material del molde y se toma una muestra de suelo para determinar la humedad, pesando inicialmente la muestra y secándola en el horno hasta que tenga una masa constante.

Este procedimiento se repite agregando una cantidad considerable de agua la cual permite incrementar la humedad del material en 1 o 2 puntos porcentuales.

Para determinar la masa unitaria seca y la humedad se utilizan las ecuaciones 9 y 10:

$$w = \frac{A-B}{B-C} \times 100 \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:

w = Porcentaje de humedad en la muestra con base en la muestra secada al horno

A = Masa del recipiente y del suelo húmedo

B = Masa del recipiente y del suelo seco

C = Masa del recipiente

$$d_d = \frac{d_h}{w+100} \times 100 \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

w = Porcentaje de humedad en la muestra con base en la muestra secada al horno

d_d = Masa unitaria seca (Kg/m^3)

d_h = Masa unitaria húmeda (Kg/m^3)

En la figura 54 se ilustra el ensayo de densidad–humedad.

Figura 54. **Ensayo densidad–humedad**



Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (Santa María Cahabón, Alta Verapaz. 2022).
Colección Particular. Guatemala.

Para continuar con el ejemplo se utiliza el material de la muestra tomada en la estación 3+050 lado derecho, con el cual se obtuvieron los siguientes datos mostrados en la tabla LXI.

Tabla LXI. Masas obtenidas en el ensayo

Ensayo	Dato	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3		Muestra 4	
	Volumen de la tara	0.974	0.974	0.974	0.974	0.974	0.974	0.974	0.974
	Tara (Kg)	4.107	4.107	4.107	4.107	4.107	4.107	4.107	4.107
Densidad	Material húmedo + tara (Kg)	5.947	6.090	6.112	6.054				
	No. de tara	33	34	13	14	16	17	18	19
	Tara (g)	50.24	50.64	49.74	49.15	50.23	50.23	50.23	50.23
Humedad	Material húmedo + tara (g)	106.36	106.63	108.31	107.43	105.32	105.32	111.15	111.15
	Material seco + tara (g)	100.88	101.00	101.12	100.26	97.21	97.21	100.99	100.99

Fuente: Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

A continuación, se calculará la humedad de la muestra 1.

$$w_1 = \frac{A - B}{B - C} \times 100 = \frac{106.36 - 100.88}{100.88 - 50.24} \times 100 = \frac{5.48}{50.64} \times 100 = 10.8$$

$$w_2 = \frac{A - B}{B - C} \times 100 = \frac{106.63 - 101.00}{101.00 - 50.64} \times 100 = \frac{5.63}{50.36} \times 100 = 11.2$$

Se determina la humedad de la muestra con el promedio de las humedades determinadas, como se muestra a continuación.

$$w_{m1} = \frac{w_1 + w_2}{2} = \frac{10.8 + 11.2}{2} = 11.0$$

A continuación, se calcula la densidad de la muestra 1, primero se determina el peso del suelo húmedo y del suelo seco, como se muestra a continuación.

$$\text{Peso del suelo húmedo} = (\text{Peso húmeda} + \text{tara}) - \text{tara} = 5.947 - 4.107 = 1.84$$

Posteriormente se calcula la densidad del suelo, dividiendo el peso por el volumen del molde

$$d_h = \frac{\text{Peso}_h}{\text{volumen}} = \frac{1.84\text{Kg}}{0.000947\text{m}^3} = 1,943 \text{ Kg/m}^3$$

Finalmente se determina la densidad seca, como se muestra a continuación.

$$d_d = \frac{d_h}{w + 100} \times 100 = \frac{1,943}{11 + 100} \times 100 = \frac{1,943}{111} \times 100 = 1,750 \text{ Kg/m}^3$$

Para el caso de la muestra 2, se calculará la humedad.

$$w_1 = \frac{A - B}{B - C} \times 100 = \frac{108.31 - 101.12}{101.12 - 49.74} \times 100 = \frac{7.19}{51.38} \times 100 = 14.0$$

$$w_2 = \frac{A - B}{B - C} \times 100 = \frac{107.43 - 100.26}{100.26 - 49.15} \times 100 = \frac{7.17}{51.11} \times 100 = 14.0$$

Se determina la humedad de la muestra con el promedio de las humedades determinadas, como se muestra a continuación:

$$w_{m1} = \frac{w_1 + w_2}{2} = \frac{14.0 + 14.0}{2} = 14.0$$

A continuación, se calcula la densidad de la muestra 2, primero se determina el peso del suelo húmedo y del suelo seco, como se muestra a continuación:

$$\text{Peso del suelo húmedo} = (\text{Peso húmeda} + \text{tara}) - \text{tara} = 6.090 - 4.107 = 1.98$$

Posteriormente se calcula la densidad del suelo, dividiendo el peso por el volumen del molde:

$$d_h = \frac{\text{Peso}_h}{\text{volumen}} = \frac{1.98\text{Kg}}{0.000947\text{m}^3} = 2,094 \text{Kg}/\text{m}^3$$

Finalmente se determina la densidad seca, como se muestra a continuación:

$$d_d = \frac{d_h}{w + 100} \times 100 = \frac{2,094}{14 + 100} \times 100 = \frac{2,094}{114} \times 100 = 1,837 \text{Kg}/\text{m}^3$$

Para el caso de la muestra 3, se calculará la humedad.

$$w_1 = \frac{A - B}{B - C} \times 100 = \frac{105.32 - 97.21}{97.21 - 50.23} \times 100 = \frac{8.11}{46.98} \times 100 = 17.3$$

$$w_2 = \frac{A - B}{B - C} \times 100 = \frac{105.32 - 97.21}{97.21 - 50.23} \times 100 = \frac{8.11}{46.98} \times 100 = 17.3$$

Se determina la humedad de la muestra con el promedio de las humedades determinadas, como se muestra a continuación.

$$w_{m1} = \frac{w_1 + w_2}{2} = \frac{17.3 + 17.3}{2} = 17.3$$

A continuación, se calcula la densidad de la muestra 3, primero se determina el peso del suelo húmedo, como se muestra a continuación:

$$\text{Peso del suelo húmedo} = (\text{Peso húmeda} + \text{tara}) - \text{tara} = 6.112 - 4.107 = 2.01$$

Posteriormente se calcula la densidad del suelo, dividiendo el peso por el volumen del molde:

$$d_h = \frac{\text{Peso}_h}{\text{volumen}} = \frac{2.01\text{Kg}}{0.000947\text{m}^3} = 2,117 \text{Kg}/\text{m}^3$$

Finalmente se determina la densidad seca, como se muestra a continuación:

$$d_d = \frac{d_h}{w + 100} \times 100 = \frac{2,117}{17.3 + 100} \times 100 = \frac{2,117}{117.3} \times 100 = 1,805 \text{Kg}/\text{m}^3$$

Para finalizar el ejemplo, de la muestra 4 se calculará la humedad.

$$w_1 = \frac{A - B}{B - C} \times 100 = \frac{111.15 - 100.99}{100.99 - 50.23} \times 100 = \frac{10.16}{50.76} \times 100 = 20.0$$

$$w_2 = \frac{A - B}{B - C} \times 100 = \frac{111.15 - 100.99}{100.99 - 50.23} \times 100 = \frac{10.16}{50.76} \times 100 = 20.0$$

Se determina la humedad de la muestra con el promedio de las humedades determinadas, como se muestra a continuación:

$$w_{m1} = \frac{w_1 + w_2}{2} = \frac{20.0 + 20.0}{2} = 20.0$$

A continuación, se calcula la densidad de la muestra 4, primero se determina el peso del suelo húmedo y del suelo seco, como se muestra a continuación:

$$\text{Peso del suelo húmedo} = (\text{Peso húmeda} + \text{tara}) - \text{tara} = 6.054 - 4.107 = 1.95$$

Posteriormente se calcula la densidad del suelo, dividiendo el peso por el volumen del molde:

$$d_h = \frac{\text{Peso}_h}{\text{volumen}} = \frac{1.95\text{Kg}}{0.000947\text{m}^3} = 2,059 \text{Kg}/\text{m}^3$$

Finalmente se determina la densidad seca, como se muestra a continuación:

$$d_d = \frac{d_h}{w + 100} \times 100 = \frac{2,059}{20. + 100} \times 100 = \frac{2,059}{120} \times 100 = 1,715 \text{Kg}/\text{m}^3$$

A continuación, en la tabla LXII se resumen los resultados de los cálculos realizados.

Tabla LXII. Resumen de resultados de densidad–humedad

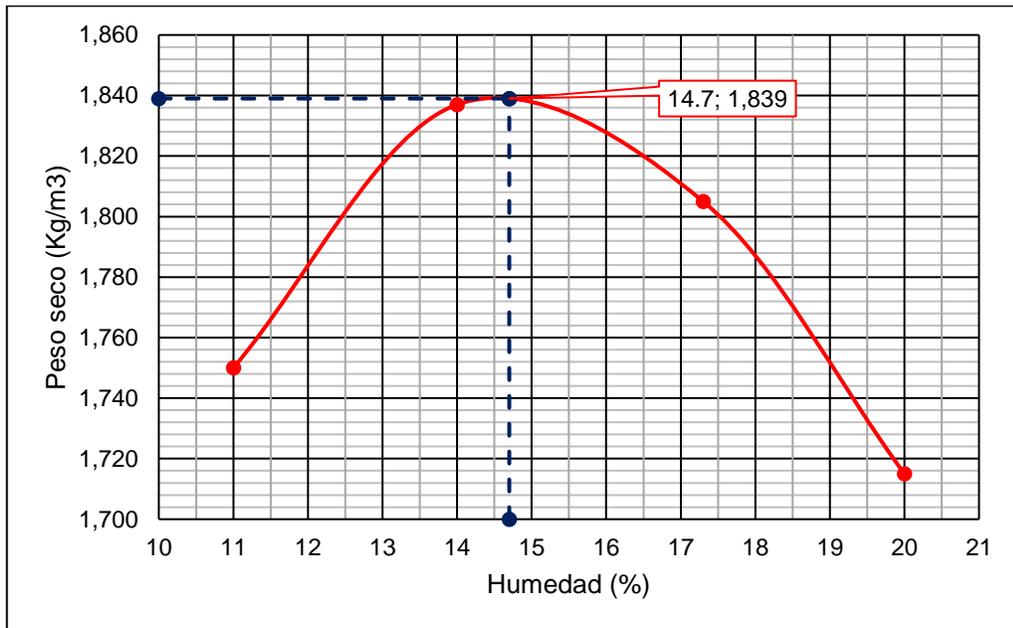
Descripción	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Humedad	11.0	14.0	17.3	20.0
Densidad	1,750 Kg/m ³	1,837 Kg/m ³	1,805 Kg/m ³	1,715 Kg/m ³

Fuente:elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Con los resultados de la tabla LXII se procede a elaborar la gráfica para determinar la densidad máxima y la humedad con la que se puede obtener.

En la figura 55 se muestra la gráfica y la determinación de los datos.

Figura 55. **Gráfica para determinación de la densidad máxima y la humedad óptima de la muestra tomada en la estación 3+050 LD**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Al igual que los ensayos anteriores, este análisis se realiza en una hoja de cálculo la cual facilita la determinación de la densidad máxima y la humedad óptima, para ello se utilizó una hoja de cálculo de Excel.

Los resultados obtenidos para el material de la muestra tomada en la estación 3+050 lado derecho son: humedad óptima de 14.7 % y densidad máxima de 1,839 Kg/m³.

Los resultados de todos los ensayos se muestran a continuación en la tabla LXIII y LXIV.

Tabla LXIII. Resumen de resultados del ensayo de densidad–humedad de los materiales entre las estaciones 0+000 a 13+500

Estación	PUS Max. (Lb/p³)	PUS Max. (Kg/m³)	Humedad Óptima %
1+095	113.6	1820.0	18.0
1+465	108.0	1729.4	21.3
1+570	105.2	1685.1	23.3
2+160	101.8	1630.4	24.5
3+050	114.8	1839.0	14.7
3+540	125.7	2014.0	11.3
3+640	125.6	2012.6	13.0
3+945	108.1	1731.0	19.2
4+190	124.4	1993.0	11.9
4+415	121.6	1948.0	13.3
4+810	114.6	1835.7	16.2
5+165	122.0	1954.7	11.5
5+405	127.2	2037.5	10.8
5+620	114.4	1832.5	15.2
5+930	113.9	1823.9	14.6
6+210	123.2	1973.5	13.7
6+405	125.8	2015.1	11.5
6+505	103.2	1653.1	22.5
6+660	116.9	1871.8	18.1
7+080	107.5	1722.5	18.2
7+235	116.2	1861.5	15.9
7+650	115.6	1850.9	16.5
8+115	112.3	1799.4	18.9
8+660	109.8	1758.8	21.4
8+835	117.4	1880.6	16.0
9+245	109.2	1749.5	18.6
9+390	118.1	1891.3	16.9
9+525	126.9	2033.2	11.4
9+573	120.9	1936.2	14.1
9+670	114.0	1825.9	16.3
9+850	127.0	2035.0	12.5
10+260	113.5	1818.1	17.2
10+675	104.2	1668.3	19.9
10+975	108.4	1736.4	19.0
11+230	111.2	1781.1	18.3
11+550	114.8	1838.9	17.7
11+910	116.3	1862.9	16.8
12+040	116.5	1865.5	17.5
12+210	114.1	1827.7	19.5
12+520	113.4	1816.7	17.6
12+750	116.0	1858.5	16.3
12+890	120.1	1923.2	14.0
13+120	109.5	1753.4	18.8
13+405	113.2	1813.6	16.5

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXIV. **Resumen de resultados del ensayo de densidad–humedad de los materiales entre las estaciones 13+500 a 25+000**

Estación	PUS Max. (Lb/p³)	PUS Max. (Kg/m³)	Humedad Óptima %
13+795	111.1	1780.2	16.5
14+191	118.3	1894.2	16.0
14+275	115.3	1847.1	16.5
14+430	114.5	1833.3	17.9
14+605	114.3	1831.0	19.3
16+310	98.0	1570.0	24.6
16+535	108.1	1731.0	23.3
16+665	98.2	1572.0	23.5
18+000	130.8	2095.5	10.4
18+525	120.0	1922.2	14.7
18+920	108.6	1739.9	21.1
19+540	104.5	1673.6	18.4
19+600	122.1	1956.5	14.8
20+270	90.7	1452.2	26.0
20+460	110.3	1766.0	21.0
20+890	122.4	1959.9	12.9
21+365	116.7	1869.4	16.9
21+680	112.2	1796.8	19.6
21+780	110.6	1771.0	17.6
22+000	108.7	1740.7	21.7
22+380	136.6	2187.8	8.8
22+500	116.5	1866.5	15.8
22+840	105.1	1684.0	20.8
22+920	115.0	1842.1	16.6
23+300	105.6	1692.0	18.2
23+820	117.8	1887.6	16.4
24+520	111.1	1779.7	20.4

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.1.6. Ensayo de equivalente de arena

Para realizar el ensayo equivalente de arena se sigue el procedimiento descrito en la normativa AASHTO T176.

Por medio de este ensayo se determina una relación en porcentaje, de los granos finos que son arenas y los que son arcilla en una muestra dada.

El procedimiento consiste en agregar una cantidad determinada de una solución a un volumen determinado de suelo; el cuál se mezcla en un cilindro de plástico graduado y se agita para que se desprendan de las arenas la cobertura arcillosa.

Luego de agitar la muestra de suelo, se procede a adicionar más solución para que el material arcilloso quede en suspensión. Posteriormente se deja que el material sufra una sedimentación de los granos de arena, y se toma la lectura de la altura de la arcilla en suspensión y de la arena. Finalmente, se determina la relación de las alturas expresada en porcentaje.

Para determinar el equivalente de arena se utiliza la ecuación 11:

$$EA = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} \times 100 \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde:

EA = Equivalente de arena.

En la figura 56 se ilustra el ensayo de densidad–humedad. Para el caso del material de la muestra tomada en la estación 3+050 lado derecho, se obtuvieron las lecturas indicadas en la tabla LXV.

Figura 56. **Ensayo de equivalente de arena**



Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (Santa María Cahabón, Alta Verapaz. 2022).
Colección Particular. Guatemala.

Tabla LXV. **Masas obtenidas en el ensayo**

Dato	Muestra 1	Muestra 2
Lectura de arena	2.20	2.20
Lectura de arcilla	12.80	12.90

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

A continuación, se calculará el equivalente de arena de la muestra 1.

$$EA = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} \times 100 = \frac{2.20}{12.80} \times 100 = 17$$

Posteriormente se procedió a calcular el equivalente de arena de la muestra 2.

$$EA = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} \times 100 = \frac{2.20}{12.90} \times 100 = 17$$

A continuación, en la tabla LXVI se resumen los resultados de los cálculos realizados.

Tabla LXVI. **Resumen de resultados de densidad–humedad**

Dato	Muestra 1	Muestra 2
Lectura de arena	2.20	2.20
Lectura de arcilla	12.80	12.90
Equivalente de arena	17	17

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Los cálculos realizados para el ensayo de equivalente de arena se realizaron en una hoja de cálculo. Los resultados de todos los ensayos se muestran a continuación en la tabla LXVII, LXVIII y LXIX.

Tabla LXVII. Resumen de resultados del ensayo equivalente de arena de los materiales entre las estaciones 0+000 a 6+500

Estación	Equivalente de arena
1+095	38 %
1+465	26 %
1+570	21 %
2+160	14 %
3+050	17 %
3+540	19 %
3+640	26 %
3+945	16 %
4+190	26 %
4+415	35 %
4+810	20 %
5+165	30 %
5+405	41 %
5+620	17 %
5+930	11 %
6+210	26 %
6+405	26 %

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXVIII. Resumen de resultados del ensayo de equivalente de arena de los materiales entre las estaciones 6+500 a 22+600

Estación	Equivalente de arena
6+505	22 %
6+660	32 %
7+080	5 %
7+235	12 %
7+650	15 %

Continuación tabla LXVIII.

8+115	32 %
8+660	39 %
8+835	30 %
9+245	21 %
9+390	34 %
9+525	33 %
9+573	22 %
9+670	22 %
9+850	40 %
10+260	36 %
10+675	14 %
10+975	24 %
11+230	26 %
11+550	23 %
11+910	25 %
12+040	24 %
12+210	29 %
12+520	20 %
12+750	28 %
12+890	22 %
13+120	20 %
13+405	18 %
13+795	20 %
14+191	21 %
14+275	20 %
14+430	20 %
14+605	30 %
16+310	13 %
16+535	20 %
16+665	10 %
18+000	18 %
18+525	21 %

Continuación tabla LXVIII.

18+920	20 %
19+540	14 %
19+600	11 %
20+270	12 %
20+460	24 %
20+890	38 %
21+365	24 %
21+680	18 %
21+780	9 %
22+000	24 %
22+380	16 %
22+500	19 %

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXIX. **Resumen de resultados del ensayo de equivalente de arena de los materiales entre las estaciones 22+600 a 25+000**

Estación	Equivalente de arena
22+840	13 %
22+920	25 %
23+300	18 %
23+820	24 %
24+520	25 %

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.1.7. Ensayo CBR

Para llevar a cabo el ensayo de Relación de Soporte de California (*California Bearing Ratio*, CBR), por medio del cual se determina un índice de resistencia al

corte en muestras de suelos, se sigue el procedimiento indicado en la normativa AASHTO T-193.

El procedimiento consiste en elaborar tres especímenes de tal forma que su densidad varíe entre el 95 % y el 100 % de su densidad máxima (determinado en el ensayo Proctor), se debe llenar el molde en cinco capas, posteriormente se determina masa del molde y del material.

Se debe determinar la humedad del suelo que se va a compactar y posteriormente se determina la cantidad de agua a agregar para elaborar los especímenes. La cantidad de agua a agregar se determina de acuerdo a la ecuación 12.

$$W_w = \left(\frac{w_h}{1 + \frac{w_o}{100}} \right) \times \left(\frac{w_p - w_o}{100} \right) \quad (\text{Ec. 12.})$$

Donde:

W_w = Masa de agua a añadir

w_h = Masa húmeda de la porción del suelo

w_o = % de humedad inicial

w_p = % de humedad pre-fijada

Se calcula, además, la densidad de las muestras utilizando las mismas ecuaciones del ensayo Proctor y se determina la humedad del material con el que se prepararon los especímenes.

Se debe calcular también la expansión de cada muestra, de acuerdo a las lecturas del aparato de deformación como se muestra en la ecuación 13.

$$\% \text{ Expansión} = \frac{L_2 - L_1}{h} \times 100 \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde:

L_1 = Lectura inicial

L_2 = Lectura final

$L_2 - L_1$ = Cambio de altura del espécimen durante la inmersión

h = Altura de la muestra del ensayo antes de la expansión

Se procede a graficar la curva esfuerzo-penetración, por medio de los valores medidos durante el ensayo de penetración, posteriormente se procede a realizar la corrección de la curva para determinar los valores corregidos de la penetración y la resistencia. Finalmente se procede a graficar la curva densidad seca – CBR corregido, de la misma se determina el valor del CBR con un porcentaje de compactación a un 95 % de la densidad.

Figura 57. **Equipo para el ensayo CBR**



Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (Santa María Cahabón, Alta Verapaz. 2022).

Colección Particular. Guatemala.

En la figura 57 se ilustra parte del equipo utilizado en el ensayo CBR. Para el caso del material de la muestra tomada en la estación 3+050 lado derecho, se determinó la humedad natural del material con los datos mostrados en la tabla LXX.

Tabla LXX. **Masas obtenidas en el ensayo**

Dato	Muestra 1	Muestra 2
No. de tara	1	2
Masa tara (g)	50.45	50.5
Material húmedo + tara (g)	110.45	110.10
Material seco + tara (g)	106.23	105.86

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Para determinar la humedad utilizamos la ecuación 9, como se muestra a continuación:

$$w_1 = \frac{A - B}{B - C} \times 100 = \frac{110.45 - 106.23}{106.23 - 50.45} \times 100 = \frac{4.22}{55.78} \times 100 = 7.57$$

$$w_2 = \frac{A - B}{B - C} \times 100 = \frac{110.10 - 105.86}{105.86 - 50.5} \times 100 = \frac{4.24}{55.36} \times 100 = 7.62$$

Para definir la humedad se realiza el promedio de los valores obtenidos de ambas muestras.

$$w = \frac{w_1 + w_2}{2} = \frac{7.57 + 7.62}{2} = 7.6 \%$$

A continuación, se calculará el agua que se añadirá a la muestra para compactar utilizando la ecuación 12.

$$W_w = \left(\frac{w_h}{1 + \frac{w_o}{100}} \right) \times \left(\frac{w_p - w_o}{100} \right)$$

$$W_w = \left(\frac{7000}{1 + \frac{7.60}{100}} \right) \times \left(\frac{14.7 - 7.60}{100} \right) = (6505) \times (0.071) = 462$$

Se agrega el agua calculada y se procede a compactar los especímenes, para el caso del material ejemplo se agregaron 450 ml de agua y posteriormente se calcula la densidad o masa unitaria de los especímenes antes de sumergirlos en agua y la humedad del material compactado.

Para determinar la humedad del material se tienen los datos indicados en la tabla LXXI.

Tabla LXXI. **Masas obtenidas en el ensayo**

Dato	Muestra 1	Muestra 2
No. de tara	9	10
Masa tara (g)	49.88	49.59
Material húmedo + tara (g)	110.58	109.34
Material seco + tara (g)	103.10	101.74

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

$$w_1 = \frac{A - B}{B - C} \times 100 = \frac{110.58 - 103.10}{103.10 - 49.88} \times 100 = \frac{7.48}{53.22} \times 100 = 14.1$$

$$w_2 = \frac{A - B}{B - C} \times 100 = \frac{109.34 - 101.74}{101.74 - 49.59} \times 100 = \frac{7.60}{52.15} \times 100 = 14.6$$

Para definir la humedad se realiza el promedio de los valores obtenidos.

$$w = \frac{w_1 + w_2}{2} = \frac{14.1 + 14.6}{2} = 14.3 \%$$

Antes de iniciar el proceso de inmersión se determina la densidad de cada uno de los especímenes de acuerdo a los datos obtenidos que se registraron en la tabla LXXII.

Tabla LXXII. **Masas obtenidas en el ensayo**

Dato	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
No. de golpes	56	25	10
No. de tara	4	5	6
Masa tara (g)	6,750	7,287	6,730
Volumen del molde cm ³	2,412	2,446	2,314
Material húmedo + tara (g)	11,830	12,175	11,100
% de humedad	14.3	14.3	14.3

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

A continuación, se calcula la densidad de la muestra 3, primero se determina el peso del suelo húmedo con la ecuación 6, como se muestra a continuación.

$$\text{Peso del suelo húmedo} = (\text{Peso húmeda} + \text{tara}) - \text{tara} =$$

$$\text{Peso del suelo húmedo}_{56} = 11,830 - 6,750 = 5,080$$

$$\text{Peso del suelo húmedo}_{25} = 12,175 - 7,287 = 4,888$$

$$\text{Peso del suelo húmedo}_{10} = 11,100 - 6,730 = 4,370$$

Posteriormente se calcula la densidad húmeda del suelo, dividiendo el peso por el volumen del molde.

$$d_{h56} = \frac{\text{Peso}_h}{\text{volumen}} = \frac{5,080 \text{ g}}{2,412 \text{ cm}^3} = 2.106 \text{ g/cm}^3 = 2,106 \text{ Kg/m}^3$$

$$d_{h25} = \frac{\text{Peso}_h}{\text{volumen}} = \frac{4,888 \text{ g}}{2,446 \text{ cm}^3} = 1.998 \text{ g/cm}^3 = 1,998 \text{ Kg/m}^3$$

$$d_{h10} = \frac{\text{Peso}_h}{\text{volumen}} = \frac{4,370 \text{ g}}{2,314 \text{ cm}^3} = 1.889 \text{ g/cm}^3 = 1,889 \text{ Kg/m}^3$$

Finalmente se determina la densidad seca, como se muestra a continuación.

$$d_{d56} = \frac{d_h}{w + 100} \times 100 = \frac{2,106}{14.3 + 100} \times 100 = \frac{2,106}{114.3} \times 100 = 1,843 \text{ Kg/m}^3$$

$$d_{d56} = \frac{d_h}{w + 100} \times 100 = \frac{1,998}{14.3 + 100} \times 100 = \frac{1,998}{114.3} \times 100 = 1,748 \text{ Kg/m}^3$$

$$d_{d56} = \frac{d_h}{w + 100} \times 100 = \frac{1,889}{14.3 + 100} \times 100 = \frac{1,889}{114.3} \times 100 = 1,653 \text{ Kg/m}^3$$

Para finalizar los cálculos se procede a determinar el hinchamiento o expansión de los especímenes de acuerdo con los datos registrados en la tabla LXXIII y la ecuación 13.

Tabla LXXIII. **Lecturas realizadas durante la inmersión de las muestras en pulgadas**

Fecha	Hora	Tiempo (h)	56 golpes	25 golpes	10 golpes
			Molde 4	Molde 5	Molde 6
20/01/2019	17:00	0	0.050	0.050	0.050
21/01/2019	17:00	24	0.145	0.135	0.135
22/01/2019	17:00	48	0.145	0.140	0.135
23/01/2019	17:00	72	0.145	0.145	0.135
24/01/2019	17:00	96	0.145	0.145	0.135

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Para el caso del molde 4, compactado a 56 golpes tenemos que la expansión al finalizar las 96 horas de inmersión es:

$$\% \text{ Expansión} = \frac{0.145 - 0.050}{5} \times 100 = \frac{0.095}{5} \times 100 = 1.9$$

Para el caso del espécimen compactado con 25 golpes en la tara 5, tenemos:

$$\% \text{ Expansión} = \frac{0.145 - 0.050}{5} \times 100 = \frac{0.095}{5} \times 100 = 1.9$$

Y para el espécimen compactado con 10 golpes en la tara 6, tenemos:

$$\% \text{ Expansión} = \frac{0.135 - 0.050}{5} \times 100 = \frac{0.085}{5} \times 100 = 1.7$$

Como último paso del ensayo se procede a realizar la corrida del mismo en la prensa CBR, de lo cual se obtuvieron los datos mostrados en la tabla LXXIV.

Tabla LXXIV. **Lecturas tomadas en la corrida del ensayo CBR en la prensa**

Penetración (pulg)	Velocidad (min)	Carga estándar	56 golpes	25 golpes	10 golpes
			Molde 4	Molde 5	Molde 6
			Lectura	Lectura	Lectura
0.000	0:00		0	0	0
0.025	0:50		24	21	18
0.050	1:00		36	28	21
0.075	1:50		50	38	26
0.100	2:00	1,000	75	58	35
0.150	3:00		108	69	42
0.200	4:00	1,500	144	98	51
0.300	6:00		173	108	64
0.400	8:00		200	131	75

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Con los datos de la lectura se procede a calcular la carga en libras que se está aplicando a la muestra por medio de la ecuación 13, la cual fue tomada del último certificado de verificación del anillo utilizado para el ensayo realizado.

$$y(lb) = 5.6792X - 97.4937 \quad (\text{Ec. 14})$$

A continuación, se muestra el cálculo de la carga en libras del molde 4 compactado a 56 golpes.

$$y(lb) = 5.6792(24) - 97.4937 = 39$$

$$y(\text{lb}) = 5.6792(36) - 97.4937 = 107$$

$$y(\text{lb}) = 5.6792(50) - 97.4937 = 186$$

$$y(\text{lb}) = 5.6792(75) - 97.4937 = 328$$

$$y(\text{lb}) = 5.6792(108) - 97.4937 = 516$$

$$y(\text{lb}) = 5.6792(144) - 97.4937 = 720$$

$$y(\text{lb}) = 5.6792(173) - 97.4937 = 885$$

$$y(\text{lb}) = 5.6792(200) - 97.4937 = 1,038$$

Para el caso del molde 5 compactado a 25 golpes, el cálculo de la carga en libras se muestra a continuación.

$$y(\text{lb}) = 5.6792(21) - 97.4937 = 22$$

$$y(\text{lb}) = 5.6792(28) - 97.4937 = 62$$

$$y(\text{lb}) = 5.6792(38) - 97.4937 = 108$$

$$y(\text{lb}) = 5.6792(58) - 97.4937 = 232$$

$$y(\text{lb}) = 5.6792(69) - 97.4937 = 294$$

$$y(\text{lb}) = 5.6792(98) - 97.4937 = 459$$

$$y(lb) = 5.6792(108) - 97.4937 = 516$$

$$y(lb) = 5.6792(131) - 97.4937 = 646$$

Para el caso del molde 6 compactado a 10 golpes, el cálculo de la carga en libras se muestra a continuación.

$$y(lb) = 5.6792(18) - 97.4937 = 5$$

$$y(lb) = 5.6792(21) - 97.4937 = 22$$

$$y(lb) = 5.6792(26) - 97.4937 = 50$$

$$y(lb) = 5.6792(35) - 97.4937 = 101$$

$$y(lb) = 5.6792(42) - 97.4937 = 141$$

$$y(lb) = 5.6792(51) - 97.4937 = 192$$

$$y(lb) = 5.6792(64) - 97.4937 = 266$$

$$y(lb) = 5.6792(75) - 97.4937 = 328$$

Al tener determinadas las cargas, se procede a calcular la resistencia, para el caso ejemplo el pistón de penetración tiene un área de 3 pulgadas cuadradas, por lo que se calcula la resistencia en Psi.

$$Resistencia = \frac{Fuerza}{Área} \quad (Ec. 15)$$

Para las cargas soportadas por el molde 4 compactado a 56 golpes tenemos:

$$\text{Resistencia} = \frac{39}{3} = 13 \text{ Psi}$$

$$\text{Resistencia} = \frac{107}{3} = 36 \text{ Psi}$$

$$\text{Resistencia} = \frac{186}{3} = 62 \text{ Psi}$$

$$\text{Resistencia} = \frac{328}{3} = 109 \text{ Psi}$$

$$\text{Resistencia} = \frac{516}{3} = 172 \text{ Psi}$$

$$\text{Resistencia} = \frac{720}{3} = 240 \text{ Psi}$$

$$\text{Resistencia} = \frac{885}{3} = 295 \text{ Psi}$$

$$\text{Resistencia} = \frac{1,038}{3} = 346 \text{ Psi}$$

Para las cargas soportadas por el molde 5 compactado a 25 golpes tenemos:

$$\text{Resistencia} = \frac{22}{3} = 7 \text{ Psi}$$

$$\text{Resistencia} = \frac{62}{3} = 21 \text{ Psi}$$

$$\text{Resistencia} = \frac{108}{3} = 36 \text{ Psi}$$

$$\text{Resistencia} = \frac{232}{3} = 77 \text{ Psi}$$

$$\text{Resistencia} = \frac{294}{3} = 98 \text{ Psi}$$

$$\text{Resistencia} = \frac{459}{3} = 153 \text{ Psi}$$

$$\text{Resistencia} = \frac{516}{3} = 172 \text{ Psi}$$

$$\text{Resistencia} = \frac{646}{3} = 215 \text{ Psi}$$

Para las cargas soportadas por el molde 6 compactado a 10 golpes tenemos:

$$\text{Resistencia} = \frac{5}{3} = 2 \text{ Psi}$$

$$\text{Resistencia} = \frac{22}{3} = 7 \text{ Psi}$$

$$\text{Resistencia} = \frac{50}{3} = 17 \text{ Psi}$$

$$Resistencia = \frac{101}{3} = 34 \text{ Psi}$$

$$Resistencia = \frac{141}{3} = 47 \text{ Psi}$$

$$Resistencia = \frac{192}{3} = 64 \text{ Psi}$$

$$Resistencia = \frac{266}{3} = 89 \text{ Psi}$$

$$Resistencia = \frac{328}{3} = 109 \text{ Psi}$$

En la tabla LXXV, se resumen los datos calculados de la resistencia y la penetración, para los tres especímenes en ensayo.

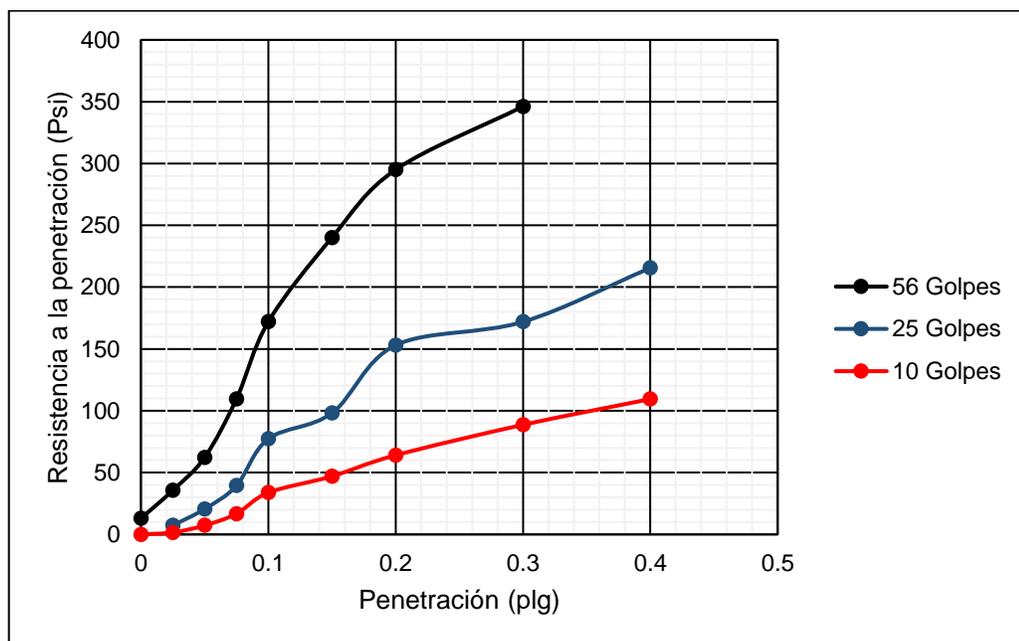
Tabla LXXV. **Lecturas tomadas en la corrida del ensayo CBR en la prensa**

Penetración (pulg)	56 golpes	25 golpes	10 golpes
	Molde 4	Molde 5	Molde 6
	Psi	Psi	Psi
0.000	0	0	0
0.025	13	7	2
0.050	36	21	7
0.075	62	39	17
0.100	109	77	34
0.150	172	98	47
0.200	240	153	64
0.300	295	172	89
0.400	346	215	109

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Con los datos obtenidos se procede a graficar los valores para determinar la curva resistencia a la penetración – penetración, como se muestra en la figura 58.

Figura 58. **Gráfica de resistencia – penetración de la muestra tomada en la estación 3+050 LD**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Para realizar la corrección de los valores de la carga y de la penetración, se traza una recta cuya pendiente pasa por los puntos indicados en la tabla LXXVI, los cuales muestran los datos obtenidos para el molde de 56 golpes. En dicha ecuación se busca el valor de x cuando y tiene un valor de 0 y este resultado se suma al valor obtenido en el ensayo para determinar la penetración corregida, a continuación, se muestran los cálculos realizados para determinar la corrección de las lecturas de 0.100” del molde 4 compactado a 56 golpes.

Tabla LXXVI. **Lecturas tomadas en la corrida del ensayo CBR en la prensa**

Penetración (pulg)	56 golpes
	Molde 4
	Psi
0.025	13
0.100	109

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Determinando la pendiente:

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (\text{Ec. 16})$$

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{109 - 13}{0.100 - 0.025} = \frac{96}{0.075} = 1280$$

Ahora tenemos la ecuación de la recta:

$$y = mx + b \quad (\text{Ec. 17})$$

$$y = 1280x + b$$

Al sustituir los valores de $y = 13$ y $x = 0.025$ determinamos el valor de la constante en la siguiente ecuación:

$$b = y - 1280x = 13 - 1280(0.025) = -19$$

Por lo tanto, la ecuación de la recta nos queda:

$$y = 1280x - 19$$

Si buscamos el valor de x cuando $y=0$, sustituimos los valores y tenemos:

$$0 = 1280x - 19$$

$$19 = 1280x$$

$$\frac{19}{1280} = x$$

Por lo tanto:

$$x = 0.015$$

Entonces el valor corregido de la penetración es:

$$P = 0.100 + 0.015 = 0.115$$

Para determinar el valor de la Resistencia corregida se sigue el mismo proceso, determinando los datos de la ecuación de acuerdo a los valores mostrados en la tabla LXXVII.

Tabla LXXVII. **Lecturas tomadas en la corrida del ensayo CBR en la prensa**

Penetración (pulg)	56 golpes
	Molde 4
	Psi
0.100	109
0.150	172

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Determinando la pendiente:

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{172 - 109}{0.150 - 0.100} = \frac{63}{0.05} = 1260$$

Ahora tenemos la ecuación de la recta:

$$y = mx + b$$

$$y = 1260x + b$$

Al sustituir los valores de $y = 109$ y $x = 0.100$ determinamos el valor de la constante en la siguiente ecuación:

$$b = y - 1260x = 109 - 1260(0.100) = -17$$

Por lo tanto, la ecuación de la recta nos queda:

$$y = 1260x - 17$$

Si buscamos el valor de y cuando $x=0.115$, sustituimos los valores y tenemos:

$$y = 1260(0.115) - 17 = 128$$

Este procedimiento se repite para calcular las correcciones para los datos de 0.2" y para cada espécimen de ensayo, para facilitar los cálculos esto se realiza en una hoja de cálculo la cual se muestra en los apéndices. A continuación, en la tabla LXXVIII, se muestran los valores corregidos para cada muestra.

Tabla LXXVIII. **Lecturas tomadas en la corrida del ensayo CBR en la prensa**

Penetración (pulg)	Carga estándar	56 golpes	25 golpes	10 golpes
		Molde 4	Molde 5	Molde 6
		Psi (corr)	Psi (corr)	Psi (corr)
0.100	1,000	128	84	39
0.200	1,500	248	156	69

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Con estos datos se procede a calcular el CBR como se indica en la norma, cuyo procedimiento es: dividiendo la carga corregida por la carga estándar y multiplicando por 100, como se muestra a continuación. Para el molde 4 compactado a 56 golpes tenemos:

$$CBR_{0.1"} = \frac{128}{1,000} \times 100 = 13$$

$$CBR_{0.2"} = \frac{248}{1,500} \times 100 = 17$$

Para el molde 5, compactado a 30 golpes tenemos:

$$CBR_{0.1"} = \frac{84}{1,000} \times 100 = 8$$

$$CBR_{0.2"} = \frac{156}{1,500} \times 100 = 10$$

Para el molde 6, compactado a 10 golpes tenemos:

$$CBR_{0.1"} = \frac{39}{1,000} \times 100 = 4$$

$$CBR_{0.2"} = \frac{69}{1,500} \times 100 = 5$$

Los datos obtenidos del CBR corregido y la densidad seca determinada convertida en Lb/p^3 , se muestran en la tabla LXXIX, éstos servirán para elaborar las curvas de densidad – CBR corregido.

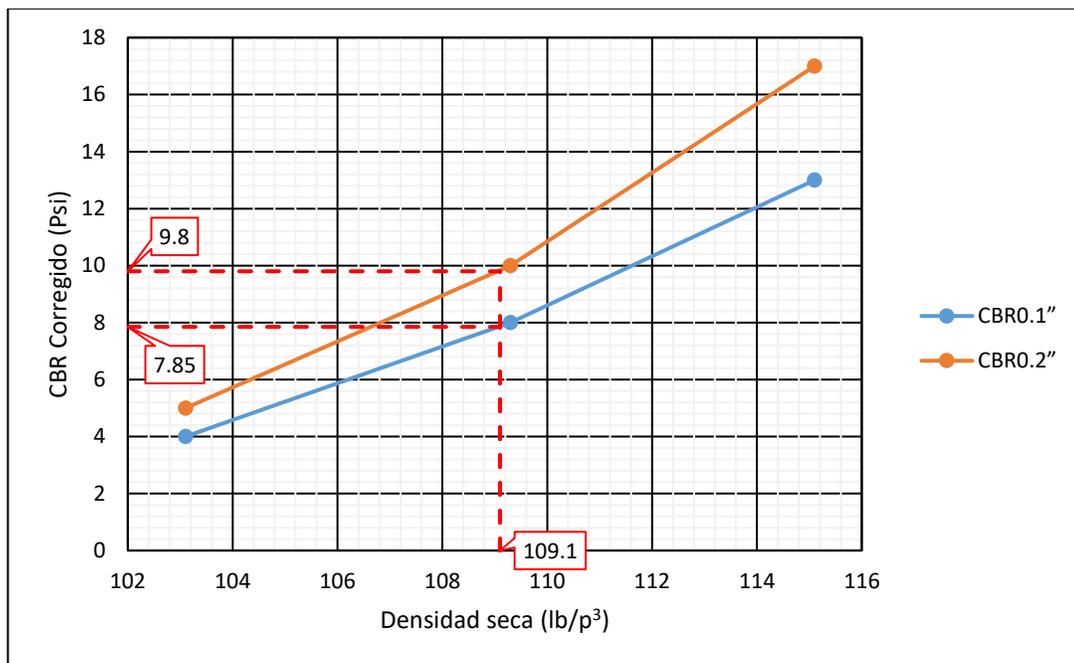
Tabla LXXIX. Lecturas tomadas en la corrida del ensayo CBR en la prensa

Molde	Densidad seca	$CBR_{0.1"}$	$CBR_{0.2"}$
Molde 6 (10 golpes)	103.1	4	5
Molde 5 (25 golpes)	109.3	8	10
Molde 4 (56 golpes)	115.1	13	17

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La gráfica mostrada en la figura 59 sirve para determinar el CBR al 95 % de la compactación, como en el ensayo Proctor se determinó que la densidad seca máxima del material es de 1,839 Kg/m³ (114.8 lb/p³), se determina que el 95 % de la compactación corresponde a 1,747 Kg/m³ (109.1 lb/p³); por lo tanto, con este valor de la densidad determinamos el CBR_{0.1"} y CBR_{0.2"}.

Figura 59. **Gráfica de resistencia – penetración de la muestra tomada en la estación 3+050 LD**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Como se observa en la gráfica los valores del CBR al 95 % de compactación son CBR_{0.1"}=7.85 y CBR_{0.2"}= 9.8. Como se indicó con anterioridad los cálculos de los ensayos realizados se llevaron a cabo en una hoja de cálculo.

A continuación, en la tabla LXXX y LXXXI se registran los resultados obtenidos para todas las muestras.

Tabla LXXX. Resumen de resultados del ensayo CBR de los materiales entre las estaciones 0+000 a 16+500

Estación	CBR a 95 % de compact.	Hinchamiento
1+095	51.00	0.12 %
1+465	41.00	0.10 %
1+570	41.00	0.32 %
2+160	29.10	0.42 %
3+050	8.5	1.90 %
3+540	42.0	0.20 %
3+640	52.0	0.5 %
3+945	26.5	0.6 %
4+190	11.5	0.44 %
4+415	38.0	0.04 %
4+810	28.0	0.12 %
5+165	35.0	0.20 %
5+405	47.5	0.02 %
5+620	27.5	1.08 %
5+930	0.4	3.12 %
6+210	44.0	0.22 %
6+405	36.0	0.04 %
6+505	12.0	1.06 %
6+660	59.0	0.06 %
7+080	0.3	6.62 %
7+235	4.6	2.10 %
7+650	35.0	0.82 %
8+115	47.0	0.16 %
8+660	41.0	0.02 %
8+835	52.0	0.08 %
9+245	30.40	1.12 %
9+390	81.00	0.02 %
9+525	81.50	0.00 %
9+573	47.00	0.00 %
9+670	70.00	0.50 %
9+850	95.00	0.36 %
10+260	53.00	0.70 %
10+675	13.00	1.86 %
10+975	31.80	0.54 %
11+230	37.40	0.70 %
11+550	59.50	0.18 %
11+910	65.70	0.20 %
12+040	40.0	0.04 %
12+210	5.00	2.02 %
12+520	37.0	0.30 %
12+750	39.0	0.00 %
12+890	55.0	0.02 %
13+120	49.8	0.28 %
13+405	46.0	0.86 %
13+795	39.0	0.10 %
14+191	62.0	0.22 %
14+275	47.2	0.86 %
14+430	36.5	0.06 %

Continuación tabla LXXX.

14+605	47.5	0.09 %
16+310	4.4	4.12 %

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXXXI. Resumen de resultados del ensayo CBR de los materiales entre las estaciones 16+500 a 25+000

Estación	CBR a 95 % de compact.	Hinchamiento
16+310	4.4	4.12 %
16+535	26.0	0.13 %
16+665	3.5	4.31 %
18+000	71.0	0.18 %
18+525	38.0	0.38 %
18+920	39.50	0.44 %
19+540	19.40	1.82 %
19+600	36.35	0.80 %
20+270	5.80	3.12 %
20+460	28.40	0.12 %
20+890	52.00	0.02 %
21+365	59.00	0.08 %
21+680	48.00	0.26 %
21+780	55.00	0.22 %
22+000	42.00	0.22 %
22+380	55.70	0.06 %
22+500	46.00	0.26 %
22+840	11.20	1.96 %
22+920	59.00	0.06 %
23+300	11.50	2.14 %
23+820	72.00	0.40 %
24+520	52.00	0.46 %

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.1.8. Ensayo de corte directo

Los ensayos de corte directo fueron realizados en el Laboratorio de Suelos del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería (CII) de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Las muestras fueron tomadas en campo como preparadas para su transporte como se muestra en la figura 60.

Figura 60. **Muestras para ensayo de corte directo**



Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (Santa María Cahabón, Alta Verapaz. 2022).
Colección Particular. Guatemala.

Los resultados de los ensayos de laboratorio se muestran en la tabla LXXXII.

Tabla LXXXII. **Valores de cohesión y ángulo de fricción interna obtenidos en el ensayo de corte directo**

No. de muestra	Estación	Unidad donde se tomó la muestra	Ángulo de fricción interna	Cohesión
1	1+050 LD	Arenas medias	42 °	1.155 ton/m ²
2	1+950 LD	Gravas	34.87 °	1.591 ton/m ²
3	3+400 LI	Aluvión	32.64 °	4.906 ton/m ²
4	4+430 LI	Grauvaca	38.79 °	1.605 ton/m ²
5	13+250 LI	Bloques	39.97 °	1.681 ton/m ²
6	14+895 LI	Gravas	38.92 °	2.683 ton/m ²

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.2. Ensayos de rocas

Para determinar realizar la caracterización de las rocas encontradas en el área de estudio se procedió a realizar los ensayos que se describen a continuación, con sus correspondientes resultados.

4.2.1. Análisis petrográfico macroscópico

Con el apoyo brindado en el Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESEM) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos, se trasladaron las muestras para realizar un análisis petrográfico.

En el CESEM se procedió a realizar un análisis macroscópico el cual consisten en la descripción superficial de las rocas de acuerdo a sus características visibles superficialmente, los resultados se resumen a continuación en la tabla LXXXIII.

Tabla LXXXIII. **Resumen del análisis macroscópico realizado a las rocas en el área de estudio**

Estación	Descripción
1+970 LD	Calco-arenisca, fuerte alteración, pardo rojiza
4+430 LI	Conglomerado, partículas sub-redondeadas, 1 a 4 mm pardo oscuro
10+615 LI	Caliza compacta, gris oscuro, presenta vetillas de calcita
13+245 LI	Arenisca gris oscuro, compacta, alteración escasa
14+895 LI	Caliza compacta, alteración escasa, grisácea
19+600 LI	Caliza compacta, alteración escasa, beige

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Luna y Gordillo (2001). *Análisis petrográfico macroscópico.*

4.2.2. Ensayos para determinar las características mecánicas y propiedades físicas de las rocas

A continuación, se describen los ensayos realizados para determinar las características de las rocas y sus correspondientes resultados. Para poder tener una muestra de la roca con dimensiones conocidas que permitieran realizar los ensayos se procedió a extraer núcleos de roca utilizando como base la indicado en la normativa AASHTO T-24M/T24-07.

Figura 61. Rocas después de haber extraído los cilindros para ensayo



Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (Santa María Cahabón, Alta Verapaz. 2022).
Colección Particular. Guatemala.

Debido a que la normativa establece la toma de muestras de estructuras fijas, se procedió a fijar las rocas en la posición en la que se encontraban en lugar de donde fueron tomadas y posteriormente se procedió a perforar su interior con una máquina saca-núcleos con una broca de 4" de diámetro, como se muestra en la figura 61. Como se puede observar en la figura 62 los cilindros extraídos de la roca tienen una forma irregular en sus extremos.

Figura 62. **Cilindro extraído de la roca para ensayo**



Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (Santa María Cahabón, Alta Verapaz. 2022).
Colección Particular. Guatemala.

Figura 63. **Cilindros listos para ensayos**



Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (Santa María Cahabón, Alta Verapaz. 2022).
Colección Particular. Guatemala.

Por tal motivo se procedió a cortar los extremos de los cilindros para que tuvieran una forma regular quedando como se muestra en la figura 63, ya listos para los ensayos correspondientes. Previo a dar inicio con los ensayos se

procedió a determinar las dimensiones de los cilindros, así como su masa; datos que se registran en la tabla LXXXIV.

Tabla LXXXIV. **Dimensiones y masa de los cilindros de roca**

Estación	Diámetro (pulg.)	Altura (pulg.)	Masa (g)	Diámetro (cm)	Altura (cm)
1+970 LD	3.906	5.228	2,400.1	9.92	13.28
4+430 LI	3.894	8.307	3,979.0	9.89	21.10
10+615 LI	3.839	7.992	3,929.9	9.75	24.77
13+245 LI	3.843	9.453	4,681.5	9.76	24.01
14+895 LI	3.783	5.260	2,339.4	9.61	13.36
19+600 LI	3.898	4.870	2,311.6	9.90	12.37

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Originalmente se midieron las dimensiones de los cilindros en pulgadas, debido a que se utilizó una broca de diámetro de 4" y posteriormente se procedió a la conversión de los mismos.

4.2.2.1. **Determinación de la densidad**

Para determinar la densidad de la roca se siguió lo indicado para dichos cálculos en la normativa AASHTO T-22.

El cual indica que la densidad es la relación entre la masa y el volumen como se indica en la ecuación 18.

$$Densidad = \frac{W}{V} \quad (Ec. 18)$$

Donde:

W = masa del espécimen o cilindro

V = Volumen del espécimen determinado por el promedio del diámetro, el promedio de la altura del cilindro.

Para ejemplificar los cálculos realizados en los ensayos a las rocas se utilizará como ejemplo la muestra de roca que se tomó de la estación 1+970 Lado Derecho, por lo que a continuación se muestra el cálculo de la densidad de la roca utilizando la ecuación 18, los datos obtenidos se registran en la tabla LXXXV.

$$\text{Densidad} = \frac{W}{V} = \frac{2.4001 \text{ Kg}}{\pi \left(\frac{0.0992}{2} \text{ m}\right)^2 0.1328 \text{ m}} = 2,338 \text{ Kg/m}^3$$

Tabla LXXXV. **Resumen de las densidades de las rocas en el área de estudio**

Estación	Densidad (Kg/m³)
1+970 LD	2,338
4+430 LI	2,454
10+615 LI	2,590
13+245 LI	2,606
14+895 LI	2,415
19+600 LI	2,427

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.2.2.2. Determinación del peso específico

Debido a que se puede considerar una roca como un suelo sin vacíos en el interior se puede calcular el peso específico de las rocas utilizando la ecuación 19.

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde:

W = masa del espécimen o cilindro el cual es afectado por la gravedad (Kg).

V = Volumen del espécimen determinado por el promedio del diámetro, el promedio de la altura del cilindro.

Para el caso de la roca ubicada en la estación 1+970 lado derecho el peso específico se calculó como se muestra a continuación.

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{mg}{V} = \frac{2.4001 \text{ Kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2}{\pi \frac{(0.0992\text{m})^2}{4} 0.1328\text{m}} = 22,935 \text{ Kg/m}^3$$

De la misma forma que se realizó el cálculo anterior, se realiza para todos los cilindros de roca y los resultados se muestran en la tabla LXXXVI.

Tabla LXXXVI. **Resumen del peso específico de las rocas en el área de estudio**

Estación	Peso específico (Kg/m ³)	Peso específico (ton/m ³)
1+970 LD	22,935	22.9
4+430 LI	24,078	24.1
10+615 LI	25,432	25.4
13+245 LI	25,560	25.6
14+895 LI	23,688	23.7
19+600 LI	23,810	23.8

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.2.2.3. Determinación de la resistencia a la compresión inconfiada

Para determinar la resistencia de la roca a la compresión inconfiada se siguió la normativa indicada en AASHTO T-22.

En el ensayo se aplica una carga axial de compresión con una velocidad constante, hasta que se presenta la falla. La resistencia a la compresión se determina dividiendo la carga máxima soportada entre el área de la sección transversal del cilindro, como se muestra en la ecuación 20.

$$Resistencia = \frac{Carga\ máxima}{Área\ transversal\ del\ cilindro} \quad (Ec. 20)$$

Si la relación de la altura respecto al diámetro del cilindro no es 2, se debe realizar una corrección de acuerdo a lo indicado en la tabla LXXXVII.

Tabla LXXXVII. **Factor de corrección por relación altura diámetro**

L/D	Factor
1.75	0.98
1.50	0.96
1.25	0.93
1.00	0.87

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Se realizó la determinación de la carga máxima soportada por los cilindros de concreto en una máquina de compresión como se muestra en la figura 64.

Figura 64. **Ensayo a compresión de núcleos de roca**



Fuente: [Fotografía de Sonia Beatriz Matías]. (Santa María Cahabón, Alta Verapaz. 2022).
Colección Particular. Guatemala.

El registro de la carga máxima soportada por cada cilindro de roca se muestra en la tabla LXXXVIII.

Tabla LXXXVIII. **Carga máxima soportada por los cilindros de roca**

Estación	Carga máxima (lb_r)
1+970 LD	32,188
4+430 LI	57,380
10+615 LI	83,216
13+245 LI	165,952
14+895 LI	168,393
19+600 LI	200,430

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Con esta carga se procede a determinar la resistencia del cilindro de roca, para este caso se realizó el cálculo en el sistema inglés de unidades de medida

como lo indica la Ecuación 20 y posteriormente se realizó la conversión al sistema internacional.

$$Resistencia = \frac{Carga\ máxima}{Área\ transversal\ del\ cilindro} = \frac{32,188\ lb}{\pi \frac{(3.906\ pp\ g)^2}{4}} = 2,533\ Psi$$

El valor de la resistencia obtenida no tiene aplicado aún el factor de corrección por altura, en la tabla LXXXIX se muestra el registro de la resistencia de cada cilindro de roca.

Tabla LXXXIX. **Resistencia a la compresión de los cilindros de roca**

Estación	Resistencia (Psi)	Resistencia (Kg/cm²)
1+970 LD	2,533	178.1
4+430 LI	4,900	344.5
10+615 LI	7,259	510.4
13+245 LI	15,648	1,100.2
14+895 LI	14,225	1,000.1
19+600 LI	15,607	1,097.3

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Los valores fueron calculados en una hoja de Excel que ya cuenta con la aplicación del factor de corrección por altura.

5. RESUMEN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A continuación, se presenta el resumen de resultados de los ensayos de laboratorio y el análisis de los mismos.

5.1. Suelos

El procedimiento realizado para dicha actividad consistió inicialmente en la separación de resultados de acuerdo al tipo de suelo analizado, por lo que se realizará el análisis de los materiales clasificados originalmente como arenas medias, gravas, bloques, con presencia de grauvacas, aluviones y suelo con presencia de roca caliza por separado.

Se procedió a realizar la separación de los datos necesarios para cada tipo de material, de acuerdo con lo indicado en el capítulo 1 en el subíndice 1.2.1, los métodos de clasificación de los suelos. Para ejemplificar la clasificación de los suelos con ambos sistemas se utilizará el material cuya muestra se tomó de la estación 3+050 lado derecho y los datos necesarios para ambas clasificaciones, se muestran en la tabla XC.

Tabla XC. **Resumen de resultados necesario para la clasificación por los métodos AASHTO y SUCS del material ejemplo**

Estación	% de material que pasa				Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad
	No. 4	No.10	No.40	No.200			
3+050	79.3	65.1	43.3	14.7	30.2	26.7	3.6

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Para iniciar la clasificación por el sistema AASHTO se analiza el porcentaje de material que pasa el tamiz No. 200, si el resultado es $> 35 \%$ el material se clasificará como un suelo fino, o si es $\leq 35 \%$ será un suelo clasificado como granular, por lo que se puede decir que el suelo en análisis es granular.

Debido a que el suelo es granular se procede a clasificarlo de acuerdo a lo indicado en la tabla VII.

Para este caso el material cumple con los requisitos para clasificarse como un A-1-b, los cuales son:

- El porcentaje de material que pasa el tamiz No. 40 no debe ser mayor de 50 y para este material es de 43.3.
- El porcentaje de material que pasa el tamiz No. 200 no debe ser mayor de 25 y en el caso del material es de 14.7.
- El índice de plasticidad no debe ser mayor de 6 y para el material en análisis es de 3.6.

Por tal motivo se puede concluir que el suelo ubicado en la estación 3+050 lado derecho es un material A-1-b.

Para realizar la clasificación de los materiales por el método establecido por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), inicialmente se procede a determinar si el suelo es de grano grueso o grano fino, lo cual se define por la cantidad de material que pasa el tamiz No. 200, si el porcentaje que pasa es $< 50 \%$ se considera un suelo grueso, el cual puede ser grava o arena y si el

porcentaje que pasa es $> 50\%$ se considera un suelo fino, el cual puede ser limo, arcilla o material orgánico.

Debido a que el porcentaje del material que pasa el tamiz No. 200 es menor que 50, el material se clasifica el suelo como grueso.

Posteriormente se debe analizar el porcentaje que pasa el tamiz No. 4, en el cual si el porcentaje es $< 50\%$ el material en análisis se forma principalmente de gravas, por lo contrario, si el porcentaje es $> 50\%$ se establece que el suelo o material se compone principalmente de arenas, como es el caso del material ejemplo que se encuentra con un porcentaje que pasa el tamiz No. 4 de 79.3 por lo que el grupo correspondiente es S (arena).

Para concluir con la clasificación debido a que el porcentaje de material que pasa el tamiz No. 200 es $> 12\%$, se concluye la clasificación del suelo con en análisis del límite líquido y el índice de plasticidad. Al graficar los datos del límite líquido y el índice de plasticidad se determina que tiene contenido de limos; por tal motivo, el material ubicado en la estación 3+050 lado derecho es una arena limosa (SM).

En la tabla XCI se muestra la clasificación para cada uno de los sistemas para el suelo ubicado en la estación 3+050 lado derecho.

Tabla XCI. Clasificación por los métodos AASHTO y SUCS del material ejemplo

Estación	Clasificación AASHTO	Clasificación SUCS
3+050	A-1-b	SM

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Este procedimiento se realizó en una hoja de cálculo con todos los materiales.

En la tabla XCII se muestra la clasificación de los materiales clasificados originalmente como arenas medias.

Tabla XCII. Clasificación por los métodos AASHTO y SUCS de los materiales clasificados originalmente como arenas medias y los resultados de los otros ensayos realizados

Estación	Plasticidad			Clasificación AASHTO	Clasificación SUCS	Densidad máxima	Humedad óptima	EA	Hinchamiento
	LL	LP	IP						
1+095	41.0	30.0	11.0	A-2-7	SW	1820.0	18.0 %	38 %	0.12 %
1+465	42.9	34.0	9.0	A-2-5	SP SM	1729.4	21.3 %	26 %	0.10 %
1+570	57.6	41.3	16.3	A-2-7	SM	1685.1	23.3 %	21 %	0.32 %
6+660	33.7	25.9	7.7	A-2-4	SP SM	1871.8	18.1 %	32 %	0.06 %
7+080	48.2	32.7	15.6	A-2-7	SM	1722.5	18.2 %	5 %	6.62 %
7+235	36.2	25.3	10.9	A-2-6	SM	1861.5	15.9 %	12 %	2.10 %
7+650	38.4	28.6	9.7	A-2-4	GP GM	1850.9	16.5 %	15 %	0.82 %
8+115	34.7	25.9	8.8	A-2-4	SP SM	1799.4	18.9 %	32 %	0.16 %
8+660	38.7	30.5	8.2	A-2-4	SW SM	1758.8	21.4 %	39 %	0.02 %
8+835	33.4	25.0	8.4	A-2-4	SW SM	1880.6	16.0 %	30 %	0.08 %
9+245	43.0	34.3	8.7	A-2-5	SP SM	1749.5	18.6 %	21 %	1.12 %
9+390	34.1	26.0	8.1	A-2-4	SP SM	1891.3	16.9 %	34 %	0.02 %
9+525	32.2	24.4	7.9	A-2-4	SW SM	2033.2	11.4 %	33 %	0.00 %
9+573	36.4	25.2	11.3	A-2-6	SP SM	1936.2	14.1 %	22 %	0.00 %
9+670	34.3	28.0	6.3	A-1-b	SM	1825.9	16.3 %	22 %	0.50 %
10+260	37.0	30.2	6.8	A-2-4	SP SM	1818.1	17.2 %	36 %	0.70 %
10+675	39.6	31.7	7.9	A-2-4	SM	1668.3	19.9 %	14 %	1.86 %
10+975	45.0	31.6	13.4	A-2-7	SW SM	1736.4	19.0 %	24 %	0.54 %
11+230	38.5	27.8	10.6	A-2-6	SM	1781.1	18.3 %	26 %	0.70 %
11+550	37.1	26.6	10.5	A-2-6	SM	1838.9	17.7 %	23 %	0.18 %
11+910	37.8	27.1	10.7	A-2-6	SP SM	1862.9	16.8 %	25%	0.20 %
12+040	34.8	22.3	12.5	A-2-6	SC	1865.5	17.5 %	24%	0.04 %
20+270	48.4	41.2	7.2	A-5	SM	1452.2	26.0 %	12%	3.12 %
20+460	41.7	31.3	10.4	A-2-5	GW GM	1766.0	21.0 %	24%	0.12 %
24+520	40.0	31.0	9.0	A-2-4	SW SM	1779.7	20.4 %	25%	0.46 %

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

De forma general al observar los resultados de la clasificación de los suelos que fueron clasificados como arenas medias de acuerdo al espesor de sus estratos, podemos analizar lo siguiente:

En la clasificación por el sistema SUCS 23 de las 25 clasificaciones realizadas determinan al material como arena por lo que un 92 % de los materiales se clasifican como arena y los dos (8 %) restantes tienen contenido de grava.

Para el método AASHTO 23 de los 25 materiales se clasifican como del grupo A-2 (arenas con arcillas) con su correspondiente subgrupo por lo que se puede decir que un 92 % de los materiales se clasifican como arenas con un alto contenido de finos los cuales en su mayoría son arcillas, de los dos restantes uno (4 %) se clasifica como A-1 (arenas con fragmentos de grava) y uno (4 %) como A-5 (limo).

Estos materiales tienen un límite líquido que varía entre 32.2 y 57.6, el límite plástico varía entre 22.3 y 41.3, el índice de plasticidad varía entre 6.3 y 16.3.

La humedad óptima promedio es de 18.3 %, del porcentaje de materiales finos promedio contenidos en el material el 24.5 % es equivalente de arena y el 75.5 % son arcillas y el porcentaje de hinchamiento promedio determinado en la saturación del suelo en el ensayo CBR es de 0.8 %.

En la tabla XCIII se muestran los resultados de las clasificaciones con ambos sistemas de los suelos clasificados geológicamente como gravas, considerando el espesor de las facies de los materiales.

Tabla XCIII. Clasificación por los métodos AASHTO y SUCS de los materiales clasificados originalmente como gravas y los resultados de los otros ensayos realizados

Estación	Plasticidad			Clasificación AASHTO	Clasificación SUCS	Densidad máxima	Humedad óptima	EA	Hinchamiento
	LL	LP	IP						
13+795	39.0	28.0	11.0	A-2-6	SM	1780.2	16.5 %	20 %	0.10 %
14+191	42.8	26.4	16.4	A-2-7	SM	1894.2	16.0 %	21 %	0.22 %
14+275	39.9	27.6	12.4	A-2-6	SM	1847.1	16.5 %	20 %	0.86 %
14+430	37.9	29.3	8.7	A-2-4	GM	1833.3	17.9 %	20 %	0.06 %
14+605	37.8	29.0	8.8	A-2-4	GW GM	1831	19.3 %	30 %	0.09 %
16+310	43.2	31.9	11.2	A-2-7	SM	1570	24.6 %	13 %	4.12 %
18+525	34.7	26.3	8.3	A-2-4	GP GM	1922.2	14.7 %	21 %	0.38 %
18+920	44.0	33.0	11.0	A-2-7	SM	1739.9	21.1 %	20 %	0.44 %
19+540	43.1	36.9	6.2	A-1-b	SM	1673.6	18.4 %	14 %	1.82 %
19+600	50.4	29.6	20.9	A-2-7	GP GM	1956.5	14.8 %	11 %	0.80 %
20+890	26.5	21.3	5.2	A-1-b	SW SC	1959.9	12.9 %	38 %	0.02 %
21+365	40.4	29.5	10.9	A-2-6	GP GM	1869.4	16.9 %	24 %	0.08 %
21+680	41.0	30.0	11.0	A-2-7	SP SM	1796.8	19.6 %	18 %	0.26 %
21+780	39.9	29.6	10.2	A-2-4	GP GM	1771.0	17.6 %	9 %	0.22 %
22+000	44.2	31.9	12.3	A-2-7	SM	1740.7	21.7 %	24 %	0.22 %
22+380	40.7	26.8	13.9	A-2-7	GP GM	2187.8	8.8 %	16 %	0.06 %
22+500	73.1	45.1	28.0	A-2-7	GP GM	1866.5	15.8 %	19 %	0.26 %
22+840	33.4	23.6	9.8	A-2-4	GC	1684.0	20.8 %	13 %	1.96 %
22+920	38.4	28.6	9.9	A-2-4	SM	1842.1	16.6 %	25 %	0.06 %

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Al alcanzar los materiales su desintegración se procedió a realizar la clasificación de los mismos. Por el sistema SUCS se puede observar que 10 de las 19 clasificaciones se consideran arenas lo cual corresponde a un 52.6 % de los materiales, los 9 materiales restantes se clasifican como gravas (47.4 %) con un contenido de arcilla. Al analizar los materiales por el sistema AASHTO, se puede observar que 17 de las 19 muestras analizadas (89.5 %) se clasifican como A-2 (arenas con arcillas), y los dos restantes (10.5 %) se clasifican como A-1 (arenas con fragmentos de grava).

El límite líquido varía entre 26.5 y 73.1, el límite plástico varía entre 20.2 y 45.1, el índice de plasticidad varía entre 5.2 y 28.0. La humedad óptima promedio es de 17.4 %, del porcentaje de materiales finos promedio contenidos en el material el 19.7 % es equivalente de arena y el 80.3 % son arcillas y el porcentaje de hinchamiento promedio determinado en la saturación del suelo en el ensayo CBR es de 0.6 %.

En la tabla XCV se resumen los resultados de los materiales clasificados como bloques, de acuerdo al tamaño máximo que podrían tener las partículas del suelo debido al tamaño de sus facies en la escala de clasificación geológica.

Tabla XCIV. Clasificación por los métodos AASHTO y SUCS de los materiales clasificados originalmente como bloques y los resultados de los otros ensayos realizados

Estación	Plasticidad			Clasificación AASHTO	Clasificación SUCS	Densidad máxima	Humedad óptima	EA	Hinchamiento
	LL	LP	IP						
5+620	35.2	25.4	9.8	A-2-4	SM	1832.5	15.2 %	17%	1.08 %
12+210	38.5	29.2	9.3	A-2-4	SM	1827.7	19.5 %	29%	2.02 %
12+520	33.0	28.8	4.3	A-1-b	SM	1816.7	17.6 %	20%	0.30 %
12+750	36.9	26.5	10.3	A-2-4	SM	1858.5	16.3 %	28%	0.00 %
12+890	36.3	26.1	10.2	A-2-4	SP SM	1923.2	14.0 %	22%	0.02 %
13+120	34.2	26.5	7.7	A-2-4	SM	1753.4	18.8 %	20%	0.28 %
13+405	39.3	26.9	12.4	A-2-6	SP SM	1813.6	16.5 %	18%	0.86 %

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Al realizar la clasificación por el método SUCS se observa que todas las muestras analizadas se clasifican como arenas. En el caso de la clasificación por el sistema AASHTO, 6 de las 7 muestras analizadas se clasifican como A-2 (arenas con arcillas) lo cual corresponde al 85.7 % y la muestra restante (14.3 %) se clasifica como A-1 (arenas con fragmentos de grava).

El límite líquido varía entre 33.0 y 39.3, el límite plástico que varía entre 25.4 y 29.2, el índice de plasticidad que varía entre 4.3 y 12.4. La humedad óptima promedio es de 16.8 %, del porcentaje de materiales finos promedio contenidos en el material el 21.9 % es equivalente de arena y el 78.1 % son arcillas y el porcentaje de hinchamiento promedio determinado en la saturación del suelo en el ensayo CBR es de 0.7 %.

A continuación, en la tabla XCV se muestra la clasificación realizada a los suelos que en su interior contienen vetas de roca identificadas como grauwacas.

Tabla XCV. **Clasificación por los métodos AASHTO y SUCS de los materiales clasificados originalmente como suelos con grauwacas y los resultados de los otros ensayos realizados**

Estación	Plasticidad			Clasificación AASHTO	Clasificación SUCS	Densidad máxima	Humedad óptima	EA	Hinchamiento
	LL	LP	IP						
2+160	47.3	38.0	9.3	A-2-5	SM	1630.4	24.5 %	14%	0.42 %
3+050	30.2	26.7	3.6	A-1-b	SM	1839	14.7 %	17%	1.90 %

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Las dos muestras tomadas se clasifican por el sistema SUCS como arenas con contenido de finos, para el caso de la clasificación realizada por el sistema AASHTO en una de las muestras se clasifican como A-2 (arenas con arcillas) lo cual corresponde al 50 % y la muestra restante (50 %) se clasifica como A-1 (arenas con fragmentos de grava).

El límite líquido que varía entre 30.2 y 47.3, el límite plástico varía entre 38.0 y 26.7, el índice de plasticidad varía entre 3.6 y 9.3. La humedad óptima promedio es de 19.6 %, del porcentaje de materiales finos promedio contenidos en el

material el 15 % es equivalente de arena y el 85 % son arcillas y el porcentaje de hinchamiento promedio determinado en la saturación del suelo en el ensayo CBR es de 1.16 %.

En la tabla XCVI se muestra la clasificación de los materiales clasificados como aluviones.

Tabla XCVI. Clasificación por los métodos AASHTO y SUCS de los materiales clasificados originalmente como aluviones y los resultados de los otros ensayos realizados

Estación	Plasticidad			Clasificación AASHTO	Clasificación SUCS	Densidad máxima	Humedad óptima	EA	Hinchamiento
	LL	LP	IP						
3+540	34.5	26.4	8.1	A-2-4	SP SM	2014	11.3 %	19 %	0.20 %
3+640	35.9	28.3	7.6	A-2-4	SP SM	2012.6	13.0 %	26 %	0.50 %
3+945	42.1	30.8	11.3	A-2-7	SM	1731	19.2 %	16 %	0.60 %
4+190	45.3	35.4	9.8	A-2-5	SW SM	1993	11.9 %	26 %	0.44 %
4+415	35.3	24.5	10.8	A-2-6	SW SM	1948	13.3 %	35 %	0.04 %
4+810	34.5	27.3	7.3	A-2-4	SM	1835.7	16.2 %	20 %	0.12 %
5+165	36.4	27.4	9.1	A-2-4	GW GM	1954.7	11.5 %	30 %	0.20 %
5+405	NL	NP	NP	A-1-b	SW	2037.5	10.8 %	41 %	0.02 %
5+930	43.4	34.9	8.6	A-2-5	SM	1823.9	14.6 %	11 %	3.12 %
6+210	39.9	29.6	10.3	A-2-4	SW SM	1973.5	13.7 %	26 %	0.22 %
6+405	21.2	18.3	2.9	A-1-b	SP SM	2015.1	11.5 %	26 %	0.04 %
6+505	38.7	32.0	6.6	A-2-4	SM	1653.1	22.5 %	22 %	1.06 %
9+850	33.0	25.7	7.3	A-2-4	GW	2035.0	12.5 %	40 %	0.36 %
23+300	30.4	25.3	5.1	A-2-4	SM	1692.0	18.2 %	18 %	2.14 %
23+820	37.2	30.8	6.4	A-1-b	SM	1887.6	16.4 %	24 %	0.40 %

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Al realizar la clasificación de los materiales denominados como aluviones por medio del sistema SUCS 13 de las 15 muestras (86.7 %) se consideran arenas con una cantidad considerable de finos, 12 de las 13 muestras (80 %) los finos que contienen son arcillas con excepción del material ubicado en la estación 5+405 que no tiene plasticidad, las dos muestras restantes (13.3 %) son arenas

con contenidos de grava. Si la clasificación se realiza por medio del sistema AASHTO, 12 de las 15 muestra analizadas (80 %) se clasifican como A-2 (arenas con arcillas), dos muestras (20 %) se clasifican como A-1 (arenas con fragmentos de grava) y el material ubicado en la estación 5+405 no contiene arcillas porque no presenta plasticidad.

El límite líquido de varía entre 21.9 y 45.3, el límite plástico varía entre 18.3 y 35.4 y el índice de plasticidad varía entre 2.9 y 11.3. La humedad óptima promedio es de 14.4 %, del porcentaje de materiales finos promedio contenidos en el material el 25.2 % es equivalente de arena y el 74.8 % son arcillas y el porcentaje de hinchamiento promedio determinado en la saturación del suelo en el ensayo CBR es de 0.6 %.

Como último análisis de la clasificación de los suelos, se realizó la clasificación del material que acompaña a las rocas calizas encontradas en el área de estudio, los cuales se muestran en la tabla XCVII.

Tabla XCVII. **Clasificación por los métodos AASHTO y SUCS de los materiales clasificados originalmente como suelos con rocas calizas y los resultados de los otros ensayos realizados**

Estación	Plasticidad			Clasificación AASHTO	Clasificación SUCS	Densidad máxima	Humedad óptima	EA	Hinchamiento
	LL	LP	IP						
16+535	45.1	34.6	10.4	A-2-5	SW SM	1731	23.3 %	20 %	0.13 %
16+665	46.8	32.2	14.6	A-2-7	SM	1572	23.5 %	10 %	4.31 %
18+000	42.4	24.5	18.0	A-2-7	GC	2095.5	10.4 %	18 %	0.18 %

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Al realizar la clasificación por el sistema SUCS se tiene que 2 de las 3 muestras analizadas (66.7 %) se consideran arena con una cantidad

considerable de finos los cuales como se evidencia en los resultados de la plasticidad es arcilla, la otra muestra analizada (33.3 %) se clasifica como una grava con un alto contenido de granos finos los cuales también son arcillas. La clasificación del sistema AASHTO establece que todos los materiales son clasificados como A-2 (arenas con arcillas).

El límite líquido varía entre 42.4 y 46.8, el límite plástico varía entre 24.5 y 34.6 y el índice de plasticidad varía entre 10.4 y 18. La humedad óptima promedio es de 19.1 %, del porcentaje de materiales finos promedio contenidos en el material el 15.8 % es equivalente de arena y el 84.2 % son arcillas y el porcentaje de hinchamiento promedio determinado en la saturación del suelo en el ensayo CBR es de 1.5 %.

En resumen, de las 71 muestras de suelo clasificadas por el método SUCS 55 se clasifican como arenas lo que corresponde al 76 %, 1 de las muestras de suelo (1 %) se considera arena sin arcilla debido a que no presenta plasticidad, las restantes 15 muestras se consideran gravas con un alto contenido de fino (23 %) cuyo contenido de finos es arcilla debido a que todas tienen plasticidad.

Por el método AASHTO de las 71 muestras clasificadas 60 muestras (85 %) se clasifican dentro del grupo A-2 los cuales de acuerdo a la definición corresponden a arenas con un contenido finos, los cuales son arcillas debido a la plasticidad que presentan. 1 muestra (1 %) se clasifica como A-2 lo cual significa que es arena con un contenido de finos los cuales no son arcilla debido a que no presenta plasticidad. 9 de las muestras (13 %) pertenecen al grupo A-1 los cuales se clasifican como arenas con gravas y finos, cuyos finos son arcilla debido a los resultados obtenidos en los ensayos de plasticidad. Y 1 muestra (1 %) se clasifica en el grupo A-5 el cual corresponde a los materiales como limos.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el ensayo corte directo se puede observar que los suelos ensayados son arcillosos, lo cual permite que tenga una Cohesión entre 1.155 ton/m^2 y 4.906 ton/m^2 , se analizaron muestras de suelo a corte directo de cada uno de los grupos de suelos registrados obteniendo los resultados mostrados en la tabla LXXIX.

En estos resultados destaca el valor alto obtenido de cohesión del material ubicado en la estación 3+400 LI, el cual se clasifica como un aluvión el cual es un material arcilloso con presencia de gravas. El mínimo valor obtenido de cohesión lo presenta el material clasificado inicialmente como arenas medias ubicado en la estación 1+050 LD, éste es un material formado por muchas capas finas.

En los resultados obtenidos en los materiales ubicados en las estaciones 1+950 LD, 4+430 LI y 13+250 LI se observan valores de cohesión similares, estos suelos se clasifican originalmente como gravas, grauwaca y bloques. Estos resultados son coherentes con lo observado del comportamiento de dichos materiales en el campo y durante la ejecución de los ensayos de clasificación.

Finalmente, el material ubicado en la estación 14+895 LI clasificado originalmente como grava difiere en los valores obtenidos en el ensayo, lo cual puede estar directamente relacionado con la cantidad de humedad del material, la cual es de 5.1 al comparar este valor no tiene mucha diferencia con el 5.4 que presenta las Gravavas ubicadas en la estación 1+950 LD; sin embargo, por ser materiales que contienen arcilla esa diferencia se considera representativa.

Con relación a los resultados obtenidos del ángulo de fricción interna, el valor más alto obtenido es el del material ubicado en la estación 1+050 LD, cuyo

material se clasificó originalmente como arenas medias, el cual está formado de muchas capas que tiene espesores de aproximadamente 1 mm.

El valor más bajo obtenido es del material ubicado en la estación 3+400 LI, el cual corresponde al aluvión. Los restantes materiales ubicados en las estaciones 1+950 LD, 4+430 LI, 13+250 LI y 14+895 LI tienen valores similares de ángulo de fricción interna.

5.2. Rocas

La tabla XCVIII presenta el resumen de los resultados obtenidos del ensayo realizado de compresión inconfiada a las rocas en el área de estudio.

Tabla XCVIII. **Resumen de resultados de los ensayos realizados a las rocas encontradas en el área de estudio**

Estación	Descripción	Densidad (Kg/m ³)	Peso específico (Kg/m ³)	Resistencia (Kg/cm ²)
1+970 LD	Calco-arenisca, fuerte alteración, pardo rojiza	3,356	32,918	178.1
4+430 LI	Conglomerado, partículas subredondeadas, 1 a 4 mm pardo oscuro	3,511	34,440	344.5
10+615 LI	Caliza compacta, gris oscuro, presenta vetillas de calcita	3,712	36,418	510.4
13+245 LI	Arenisca gris oscuro, compacta, alteración escasa	3,729	36,588	1,100.2
14+895 LI	Caliza compacta, alteración escasa, grisácea	3,452	33,861	1,000.1
19+600 LI	Caliza compacta, alteración escasa, beige	3,469	34,034	1,097.3

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Los resultados de los ensayos realizados a las rocas muestreadas a lo largo de los taludes de la carretera que se encuentra sobre la formación Sepur no

puede ser asociados con un macizo rocoso; debido a que, en la parte visible de la formación en los taludes no se observa un macizo rocoso y las muestra fueron tomadas de vetas de roca.

Se realizaron ensayos de compresión inconfiada de roca para determinar una característica mecánica de las mismas; sin embargo, la presencia de rocas no es significativa con relación a los suelos, en el área de estudio.

En las cercanías se encuentran bancos que se han utilizado con anterioridad para la explotación de roca; sin embargo, sobre la línea de trazo de la carretera sólo se encuentran suelos, la cantidad de roca encontrada no es significativa con relación a los suelos disponibles en el área de análisis.

CONCLUSIONES

1. Se pudo determinar que a lo largo del tramo vial RD AV 06, se encuentra la formación geológica conocida como Sepur, situación que se determinó debido a la concordancia de los suelos encontrados con la descripción litológica de la misma.
2. La determinación de las características mecánicas tales como la cohesión y el ángulo de fricción interna, se realizaron de manera puntual, en diferentes unidades geológicas encontradas a lo largo de la carretera. Dichos resultados son representativos del material en el punto de muestreo, la presencia de gran cantidad de planos de debilidad, no permiten que los resultados obtenidos sean representativos de una unidad geológica, sino de un estrato en particular. De acuerdo con los resultados obtenidos se observa que todos los materiales en los puntos analizados tienen un alto contenido de arcilla, lo cual es congruente con el valor de Cohesión de los mismos.
3. El comportamiento de los suelos ante la acción de los agentes erosivos se evaluó por el grado de meteorización presentada por los suelos cortados de los taludes, los suelos que presentan gran cantidad de capas o planos de debilidad tienen una mayor meteorización en la superficie del afloramiento la cual se considera moderadamente meteorizado, los suelos con capas de tamaño intermedio presentan un grado de meteorización moderado y los lugares donde las capas de los materiales tiene mayor tamaño se encuentran ligeramente meteorizados, situación que puede

deberse a la disminución de los planos de debilidad al aumentar el tamaño de las capas de los suelos.

4. Debido a la presencia de arcillas en los suelos, el agua que puede ser absorbida por los mismos causa problemas de expansión y contracción, a pesar de que los porcentajes de hinchamiento presentados por los suelos en el ensayo CBR no son elevados se debe considerar que para obtener dichos resultados se toma un 95 % de su compactación máxima, situación que para los suelos en estado natural no es representativa. Los planos formados por las facies o capas de material permiten el paso de agua con mucha facilidad entre los suelos incrementando la susceptibilidad a la misma, considerando que en el área de estudio de acuerdo a los registros del INSIVUMEH el promedio de días de lluvia en el año 175 y 200 y la cantidad de lluvia oscila entre 175 mm y 200 mm; de acuerdo con los registros realizados en el área de estudio el promedio de días de lluvia oscila entre 104 y 118 y la cantidad de lluvia registrada es de 1,803.6 y 2407.7 sin considerar el año 2020 donde se presentaron las tormentas Eta y Iota .

5. Se realizó análisis de las características de los materiales por medio de la determinación de las propiedades físicas, se pudo determinar que los suelos analizados de la formación Sepur son en su mayoría arenas aproximadamente entre un 75 % y 85 %, solamente un 1 % de las muestras analizadas (una muestra) no contiene arcillas, los suelos que no se clasifican como arenas tienen presencia de gravas y arcillas. El índice de plasticidad obtenido oscila entre 2.9 y 28. Las rocas encontradas no se consideran significativas debido a que se encuentran aisladas dentro de los suelos.

RECOMENDACIONES

1. Establecer el tipo de actividades en la cual se pueden utilizar los materiales ensayados en proyectos constructivos, especialmente carreteras; es posible, debido a los resultados obtenidos de los ensayos de clasificación.
2. Determinar las actividades a realizar para extracción de los materiales de su ubicación en condiciones de humedad controladas, evitará cualquier inconveniente con la plasticidad de los mismos.
3. Garantizar que los materiales sean compactados a la humedad óptima para garantizar que alcancen la densidad máxima, de acuerdo a los resultados obtenidos es indispensable, cuando éstos se utilizarán en rellenos.
4. Garantizar un sistema de drenaje que permita que los suelos se mantengan alejados del agua; evitará la variación de la humedad en los materiales, mejorando así la calidad de los rellenos que puedan realizarse con los mismos.

REFERENCIAS

1. American Association of State Highway and Transportation Officials. (2008a). *AASHTO M-145. Práctica estándar para la clasificación de suelo y mezclas de suelos y agregados para la construcción de carreteras*. Estados Unidos: Autor.
2. American Association of State Highway and Transportation Officials. (2008b). *AASHTO-T22. Método estándar de ensayo de resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de hormigón*. Estados Unidos: Autor.
3. American Association of State Highway and Transportation Officials. (2008c). *AASHTO-T24M/T24-07. Método estándar de prueba para obtener y ensayar núcleos perforados y vigas talladas de hormigón*. Estados Unidos: Autor.
4. American Association of State Highways and Transportation Officials. (2008d). *AASHTO-T27. Método de prueba estándar para el análisis por tamizado de agregados finos y gruesos*. Estados Unidos: Autor.
5. American Association of State Highways and Transportation Officials. (2008e). *AASHTO-T89. Método estándar de prueba para determinar el límite líquido de suelos*. Estados Unidos: Autor.

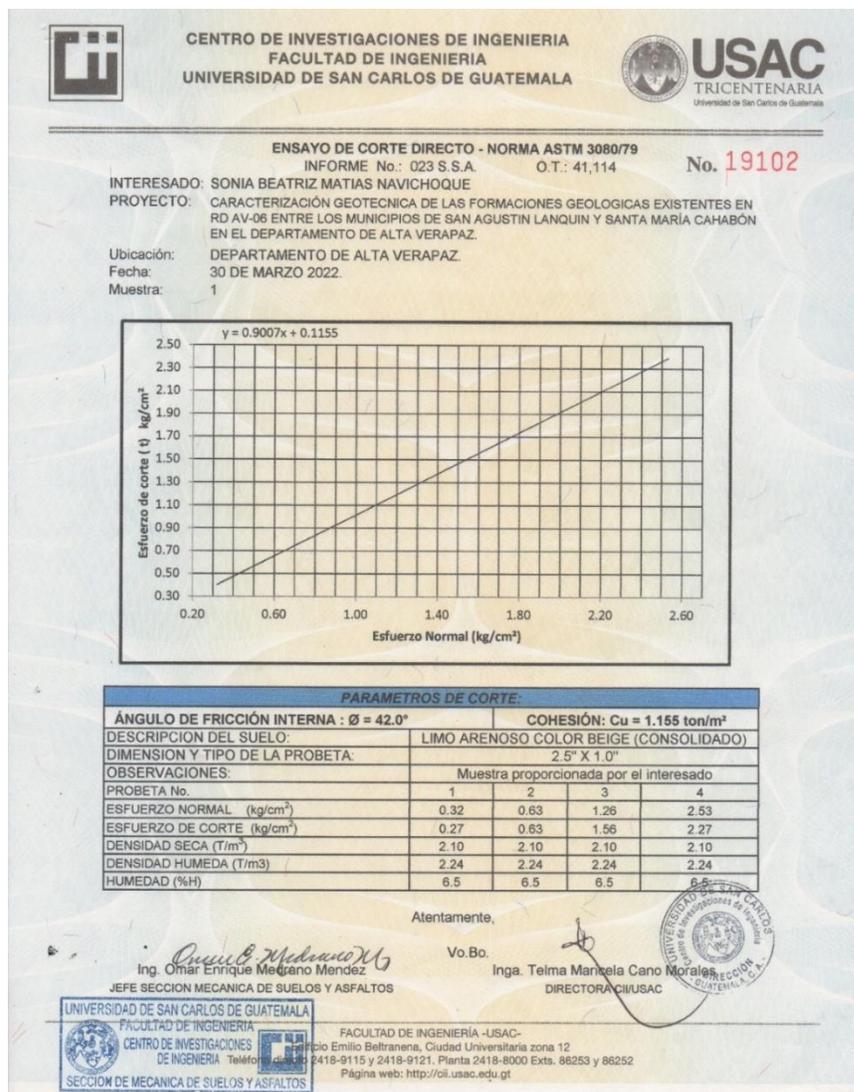
6. American Association of State Highways and Transportation Officials. (2008f). *AASHTO-T90. Método estándar de prueba para la determinación del límite plástico y el índice de plasticidad de los suelos*. Estados Unidos: Autor.
7. American Society for Testing and Materials. (1993). *ASTM D2487. Práctica estándar para la clasificación de suelos para propósitos de ingeniería*. Estados Unidos: Autor.
8. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (2018). *NSE 2.1 Estudios geotécnicos*. Guatemala: Autor.
9. Berganza, H. (1988). *Estudios geológicos para carreteras*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
10. Chén, C., Solares, S., Carbonell, F., Leal, D., Román, B., Ligorria, P. y Yat, W. (2010). *Actualización del Léxico Estratigráfico del Bloque Maya en Guatemala*. Alta Verapáz, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
11. Das, B. M. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. México: Cengage Learning Editores, S.A.
12. Das, B. M. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. México: Cengage Learning Editores, S.A.
13. Dávila, J. (2011). *Diccionario Geológico*. Perú: INGEMMET.

14. Dimitri, K. y Judd, W. (1961). *Principios de geología y geotecnia para ingenieros*. Barcelona, España: Ediciones Omega, S. A.
15. Dirección General de Caminos (2016). *Informe final estudio de ingeniería mejoramiento de carretera RDAV 06 tramo: Lanquín - Cahabón*. Guatemala: Autor.
16. Donnelly, T., Horne, G. S., Finch, R. C. y López Ramos, E. (2021). *Northern Central America; The Maya and Chortis Blocks*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
17. González, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2004). *Ingeniería Geológica*. Madrid, España: Pearson Educación, S. A.
18. Granada, U. (2021). *Glosario de geología*. España: Real academia de ciencias exactas, físicas y naturales. Recuperado de https://www.ugr.es/~agcasco/personal/rac_geologia/rac.htm#G.
19. Harvey, J. (1993). *Geología para ingenieros geotécnicos*. México: Limusa.
20. Instituto de Energía y Minas. (2015). *Guías para la elaboración de mapas y boletines de la Carta Geológica Nacional*. Guatemala: Autor.
21. Instituto Geográfico Nacional (2001). *Información geológica de Guatemala*. Guatemala: Autor.
22. Instituto Geográfico Nacional (2002). *Base de Datos Guatemala*. Guatemala: Autor.

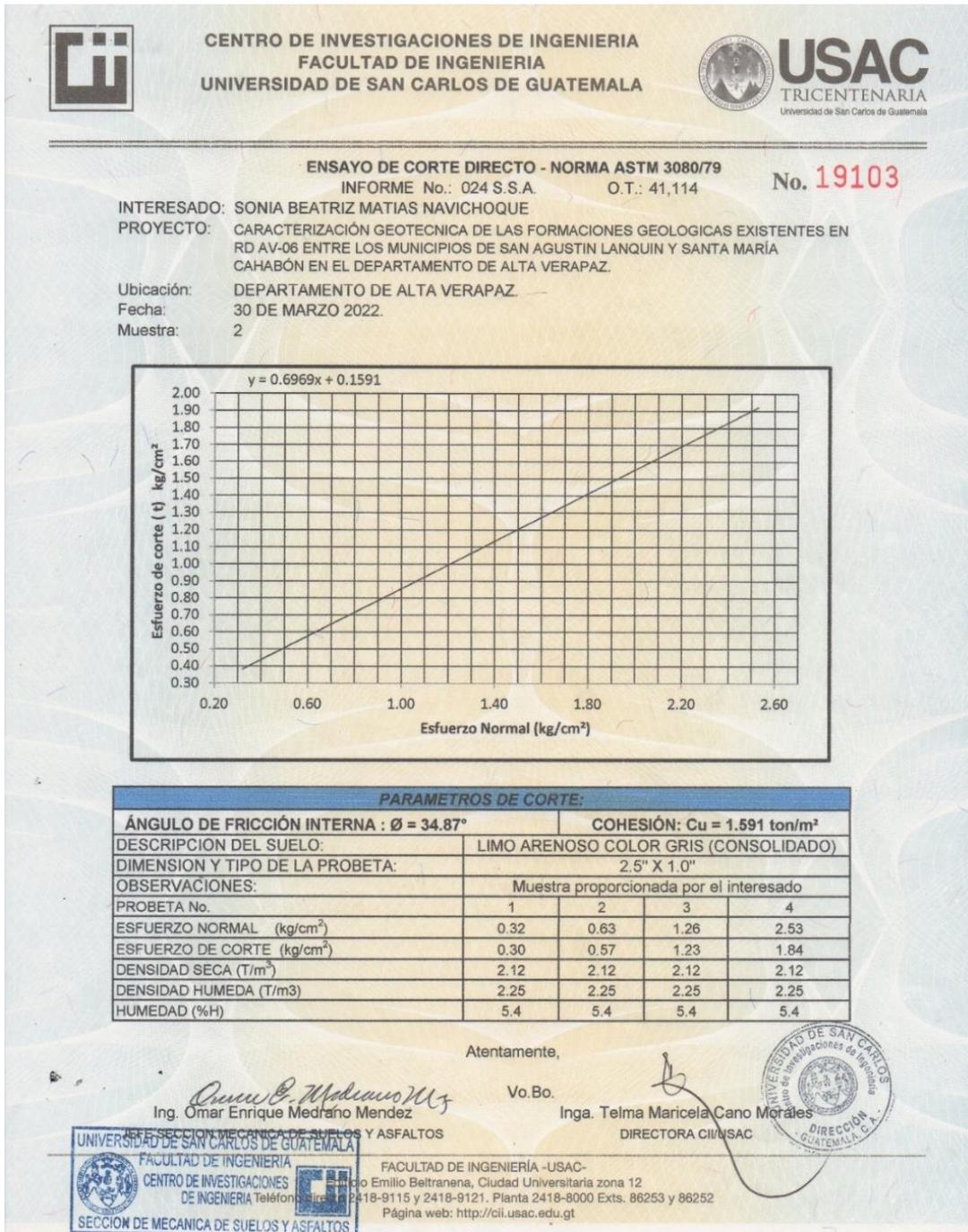
23. Instituto Mexicano del Transporte. (2003). *Geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería civil*. México: Autor.
24. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología e Hidrología. (2021a). *Atlas climatológico*. Guatemala: Autor.
25. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología e Hidrología. (2021b). *Registro sísmico*. Guatemala: Autor.
26. Krynine, D. y Judd, W. (1961). *Principios de geología y geotecnia para ingenieros*. Barcelona, España: Ediciones Omega, S.A.
27. Luna, J. y Gordillo, C. d. (2021). *Análisis petrográfico macroscópico*. Guatemala: Autor.
28. Micheo (2022). *La meteorización de los granitoides de Les Guilleries y su tratamiento en el mapa geológico de los procesos activos y recientes y de la actividad antrópica de Cataluña a escala 1:25000 (Mapa Geoantrópico)*. España: Autor.
29. Suarez Díaz, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Colombia: Publicaciones UIS.
30. Tarbuck, E. J. y Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la tierra, una introducción a la geología física*. Madrid, España: Pearson Educación S.A.

ANEXOS

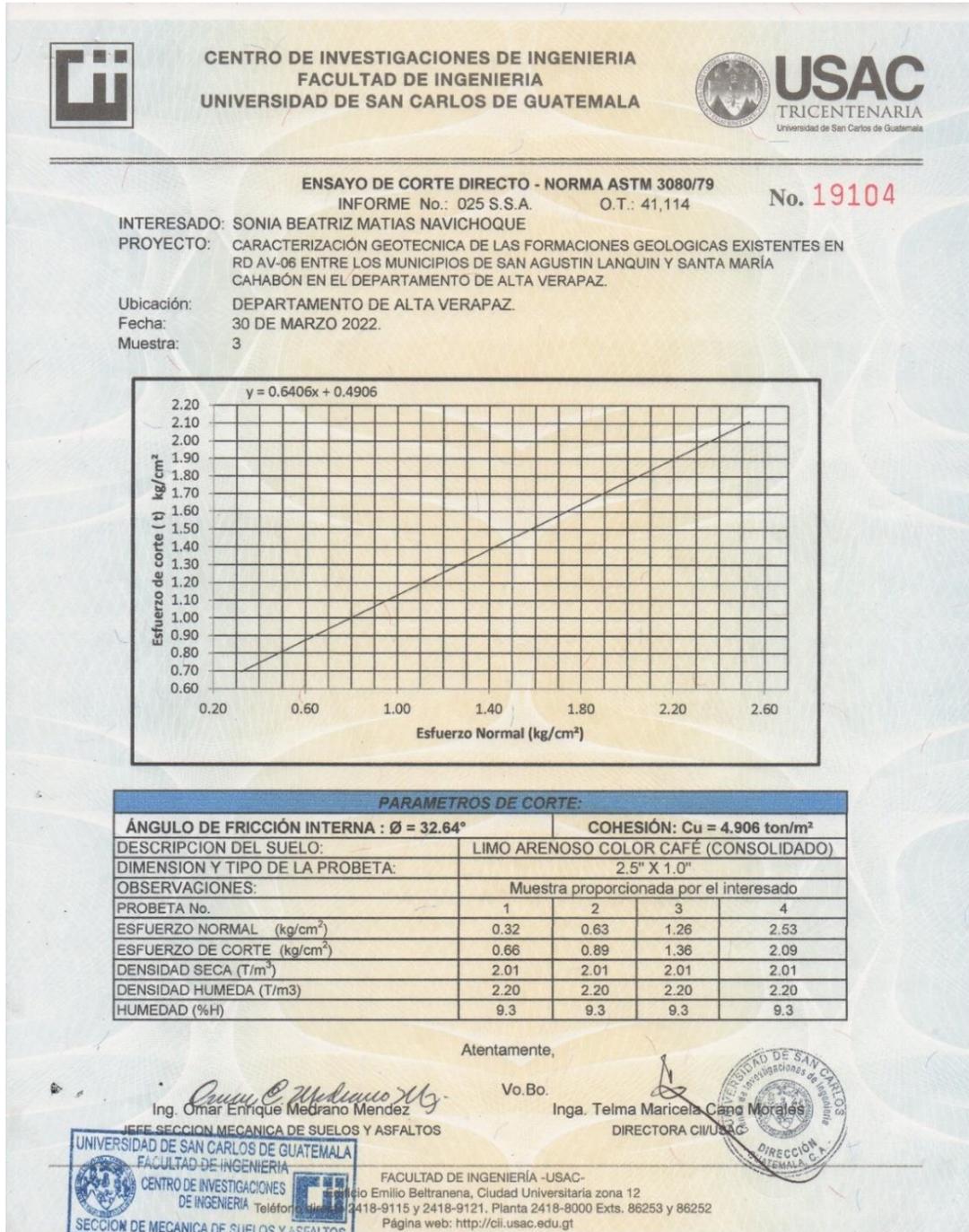
Anexo 1. Resultados de ensayos de corte directo realizados en el Laboratorio de Suelos del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería USAC



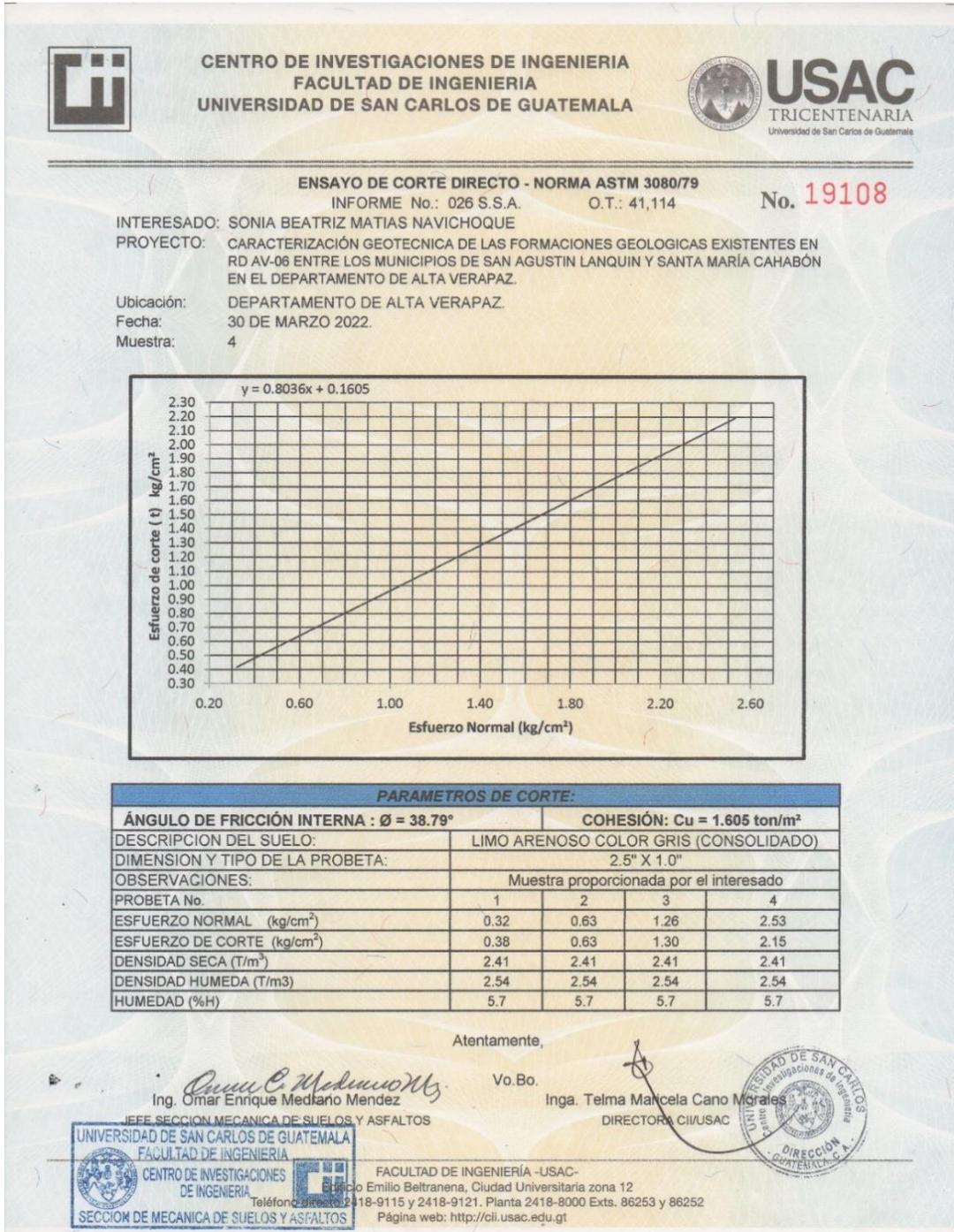
Continuación anexo 1.



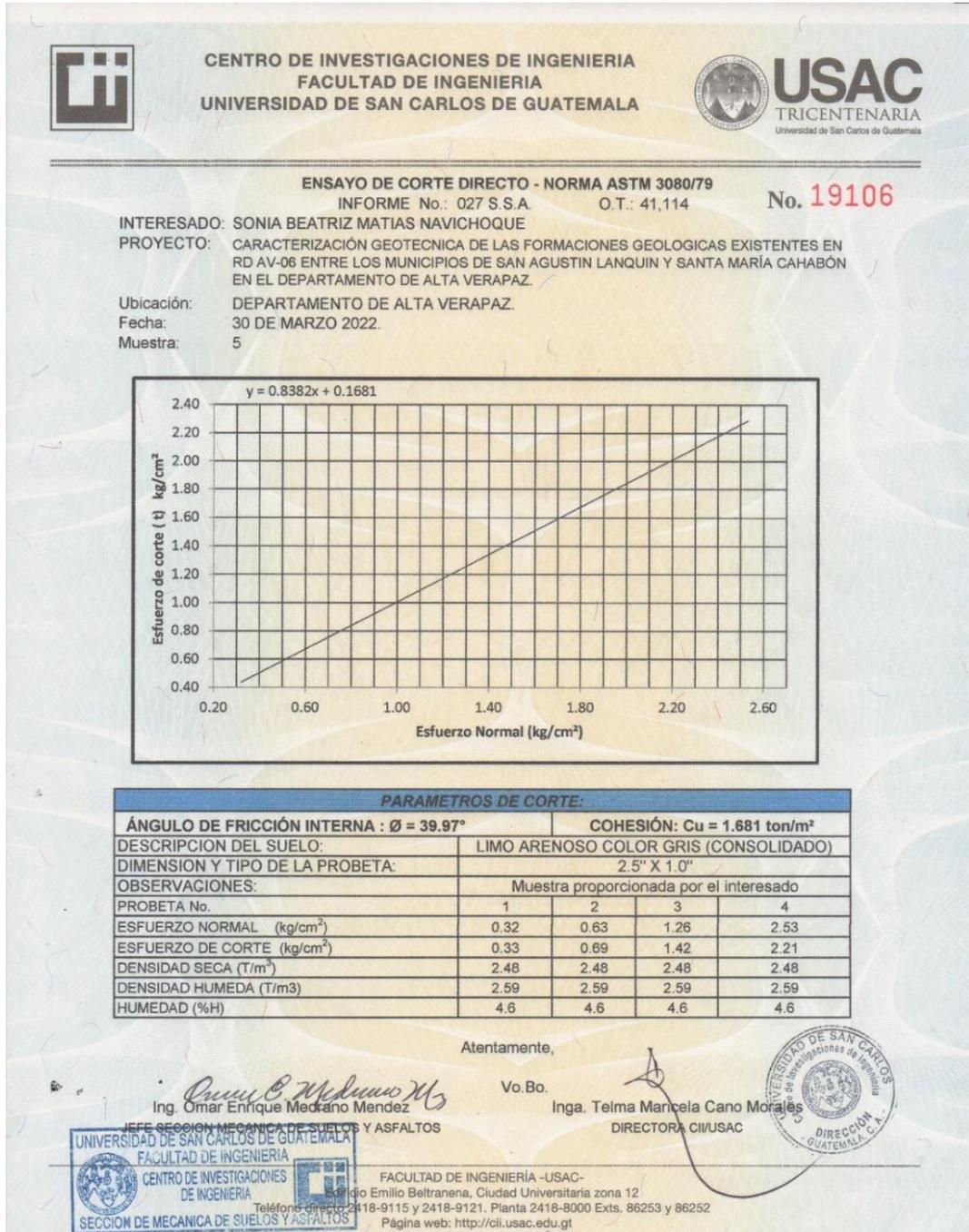
Continuación anexo 1.



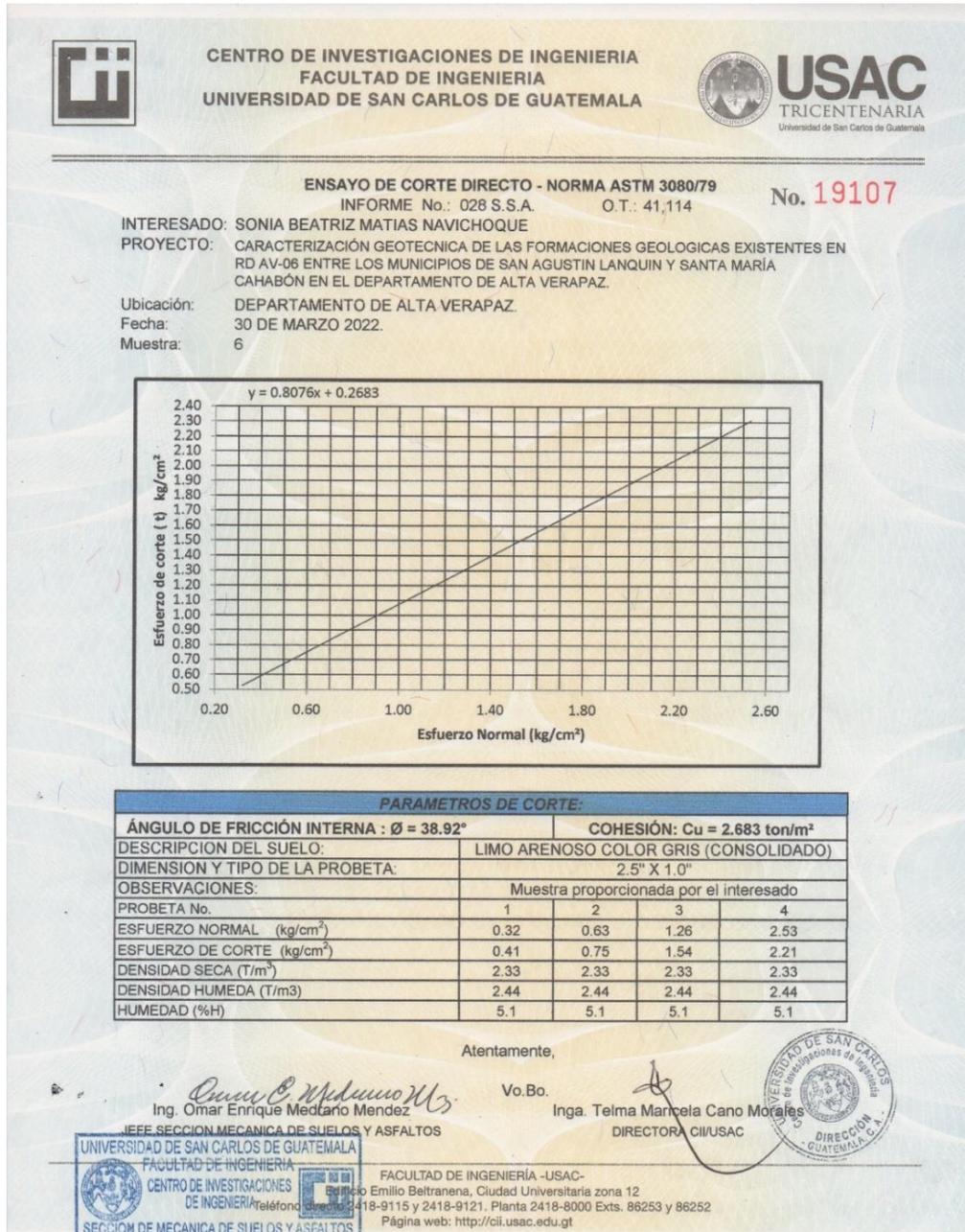
Continuación anexo 1.



Continuación anexo 1.



Continuación anexo 1.



Fuente: Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería (2022). *Ensayo de corte directo.*

Anexo 2. **Informe del análisis macroscópico realizado a las rocas del área de estudio por el Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas de la USAC**



Guatemala, 01 de septiembre 2021

Estudiante
Sonia Beatriz Matías Navichoque
Carné 100011172
Maestría en Ingeniería Geotécnica

Srita. Matías:

Por este medio me es grato saludarle y desearle éxitos en sus actividades cotidianas, al mismo tiempo se elabora y presenta Informe de "Análisis petrográfico macroscópico" de las siete (7) muestras de roca que fueron solicitadas a este Centro, para los fines de aportar al trabajo de graduación "Caracterización geotécnica de las formaciones geológicas existentes en RD-06 entre los municipios de San Agustín Lanquín y Santa María Cahabón, en el Departamento de Alta Verapaz".

Las muestras fueron recolectadas el 11 de agosto 2021 y provienen del Departamento de Alta Verapaz, según indica la interesada. Dichas muestras fueron debidamente analizadas de forma detallada e individual.

Informe: de "Análisis petrográfico macroscópico"

No bolsa	No ID	Estación	Descripción de la muestra
1	5	14+845	Caliza compacta, alteración escasa, gris/ceca.
2	3	10+615	Caliza compacta, gris oscuro, presenta vetillas de calcita.
3	1	1+970	Calco-arenisca, fuerte alteración, pardo-rojiza
4	6	19+600	Caliza compacta, alteración escasa, beige
5	s/n	1+970	Material particulado, fuerte alteración, calcáreo y presencia de óxidos de Fe
6	4	13+245	Arenisca gris oscuro, compacta, alteración escasa
7	2	4+430	Conglomerado, partículas sub-redondeadas, 1 a 4 mm, pardo oscuro

Continuación anexo 2.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



CENTRO DE ESTUDIOS SUPERIORES
DE ENERGÍA Y MINAS
- CESEM -
Tel: 24 18 91 39

Recopilación fotográfica



Fotografía No 1



Fotografía No 2



Fotografía 3



Fotografía 4

Continuación anexo 2.



Fotografía 5



Fotografía 6

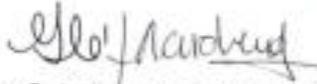


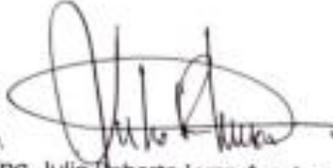
Fotografía 7

Sin otro particular, me suscribo.

Respetuosamente,

Respetuosamente,


Ing. Carla Gordillo de Marchena
Profesor e Investigador CESEM


Vo. Bo.
Ing. Julio Roberto Luna Arcoche
Director CESEM



cc. MSc. Ing. Edgar Dario Alvarez Coti - Escuela de Estudios de Postgrado, FIUSAC
Archivo

Fuente: Luna y Gordillo (2001). *Análisis petrográfico macroscópico.*