



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Estudios de Postgrado

Maestría en Ciencias en Ingeniería Geotécnica

**CARTOGRAFIADO DE RIESGO GEOTÉCNICO DEL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO LA
UNIÓN, UBICADO EN EL DEPARTAMENTO DE ZACAPA, GUATEMALA, CENTROAMÉRICA**

Ing. Marlon Joaquín Coy Figueroa

Asesorado por el Mtro. Julio Roberto Luna Aroche

Guatemala, abril de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARTOGRAFIADO DE RIESGO GEOTÉCNICO DEL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO LA
UNIÓN, UBICADO EN EL DEPARTAMENTO DE ZACAPA, GUATEMALA, CENTROAMÉRICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. MARLON JOAQUÍN COY FIGUEROA
ASESORADO POR EL MTRO. JULIO ROBERTO LUNA AROCHE

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA GEOTÉCNICA

GUATEMALA, ABRIL DE 2023

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 Armando 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 Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Carlos Huberto Aguilar Tumax
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:

CARTOGRAFIADO DE RIESGO GEOTÉCNICO DEL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO LA UNIÓN, UBICADO EN EL DEPARTAMENTO DE ZACAPA, GUATEMALA, CENTROAMÉRICA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 03 de julio de 2021.

Ing. Marlon Joaquín Coy Figueroa

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.387.2023

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: **CARTOGRAFIADO DE RIESGO GEOTÉCNICO DEL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO LA UNIÓN, UBICADO EN EL DEPARTAMENTO DE ZACAPA, GUATEMALA, CENTROAMÉRICA**, presentado por: **Ing. Marlon Joaquín Coy Figueroa**, 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, abril de 2023

AACE/gaoc



Guatemala, abril de 2023

LNG.EEP.OI.387.2023

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:

“CARTOGRAFIADO DE RIESGO GEOTÉCNICO DEL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO LA UNIÓN, UBICADO EN EL DEPARTAMENTO DE ZACAPA, GUATEMALA, CENTROAMÉRICA”

presentado por **Ing. Marlon Joaquín Coy Figueroa** 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 Cotí
Director

**Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería**



Guatemala, 9 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: "CARTOGRAFIADO DE RIESGO GEOTÉCNICO DEL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO LA UNIÓN, UBICADO EN EL DEPARTAMENTO DE ZACAPA, GUATEMALA, CENTROAMÉRICA" del estudiante Marlon Joaquín Coy Figueroa, quien se identifica con número de carné 200840414, 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, 9 de octubre de 2021

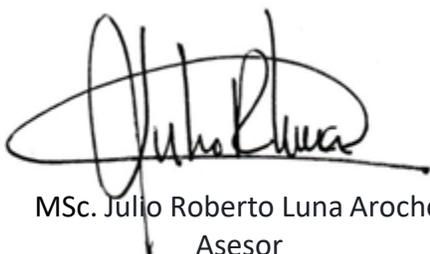
MSc. Ing. Edgar Álvarez Cotí
Director, Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Por este medio informo a usted, que, como ASESOR, he revisado y aprobado la siguiente **TESIS DE GRADUACIÓN** del alumno:

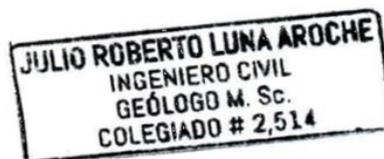
Carné: 200840414
Alumno: Marlon Joaquín Coy Figueroa
Maestría: Ingeniería Geotécnica
Título de la Investigación: "CARTOGRAFIADO DE RIESGO GEOTÉCNICO DEL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO LA UNIÓN, UBICADO EN EL DEPARTAMENTO DE ZACAPA, GUATEMALA, CENTROAMERICA"

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



MSc. Julio Roberto Luna Aroche
Asesor



ACTO QUE DEDICO A:

- Mi padre** Joaquín Israel Coy Ibarra (q. d. e. p.) por darme todo lo que estaba en sus manos, dándome el mejor empleo de integridad, respeto y dedicación.
- Mi madre** María Elizabet Figueroa Hernández por enseñarme a ser un mejor ser humano siempre, desde el inicio de mi vida escolar hasta llegar a este punto de obtener un postgrado. Su apoyo siempre ha sido incondicional.
- Mis hermanas** Julissa Coy, por apoyarme en cada momento.
Lisbeth Coy, por ser para ti un ejemplo a seguir.
- Mi sobrina** Larissa Adriana López Coy, por ser la niña que ilumina la vida de nuestra familia, tus sonrisas y gestos florecen nuestros días.
- Mi familia** Por las innumerables anécdotas que forjaron gran parte de mi vida.
- Mi novia** Viviana Chamam, usted que es la persona que me complementa, la que me insta y expone mi mejor versión.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por ser la fuente inagotable de energía, a la que aprendí a agradecer en todo momento.
- Mis padres** Quienes soñaron con verme como un ser humano intachable, por buscar mi bien común, no los defraudaré nunca.
- Mis hermanas** Por apoyarme en cada etapa de mi vida.
- Mis amigos** Por apoyarme directa e indirectamente, los nombres son muchos no me alcanzaría esta hoja de papel para nombrarlos y agradecer a cada uno.
- Mi novia** Por su apoyo incondicional, fue fundamental para conquistar este grado académico, gracias señorita intelectual.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
HIPÓTESIS.....	XXI
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXIII
INTRODUCCIÓN	XXV
1. CONCEPTOS GENERALES.....	1
1.1. Deslizamientos	1
1.2. Origen y formación de suelos	3
1.3. Clasificación del suelo	6
1.4. Distribución granulométrica	8
1.5. Plasticidad	9
1.6. Prospección geofísica en el sitio	12
1.7. Métodos eléctricos en geofísica	12
1.8. Sondeos eléctricos verticales (SEV).....	14
1.9. Sondeo de penetración estándar (SPT)	16
1.10. Mapa geotécnico	18
2. MARCO METODOLÓGICO	21
2.1. Descripción general de la localización geográfica	21
2.2. Accesos	24

2.3.	Recopilación de datos bibliográficos	26
2.3.1.	Estudios previos	26
2.4.	Análisis de mapas regionales.....	27
2.5.	Geología local	30
2.6.	Fotointerpretación y teledetección	31
2.7.	Sondeos geotécnicos	32
2.7.1.	Calicatas y extracción de muestras.....	33
2.8.	Sondeo eléctrico vertical (SEV).....	37
2.9.	Sondeo de penetración estándar (SPT).....	41
2.10.	Ensayos de laboratorio.....	43
2.11.	Granulometría y plasticidad.....	43
2.12.	Densidad	44
3.	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	47
3.1.	Distribución de suelos y sus propiedades geotécnicas	47
3.2.	Exploración geofísica del subsuelo de la zona urbana.....	55
3.3.	Lineamientos.....	61
3.4.	Geomorfología	63
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	71
4.1.	Relación de calicatas-SEV	71
4.2.	Resultados SPT	73
4.3.	Correlaciones SEV	75
4.4.	Geología estructural.....	78
4.5.	Mapa geotécnico.....	84
4.6.	Mapa de riesgo por deslizamientos.....	92
	CONCLUSIONES.....	95
	RECOMENDACIONES	97

REFERENCIAS 99

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ciclo de formación de suelos	6
2.	Distribución de partículas	9
3.	Instrumento de medición de Casagrande.....	10
4.	Carta de plasticidad de Casagrande	11
5.	Configuración Schlumberger	15
6.	Equipo SPT y operación en campo	17
7.	Localización de la zona de investigación	23
8.	Mapa regional de accesos a la zona de investigación	24
9.	Accesos locales a la zona de investigación	25
10.	Mapa geológico regional	28
11.	Mapa tectónico regional	29
12.	Mapa geológico local.....	31
13.	Elaboración de mapa de pendientes	32
14.	Excavación de calicatas	33
15.	Toma de muestras en calicatas	35
16.	Mapa de sondeos eléctricos verticales.....	38
17.	Ventana de ajuste, modelo y datos de campo de SEV1	40
18.	Ubicación de sondeos de penetración estándar	41
19.	Interpretación del SEV1	56
20.	Interpretación del SEV2	57
21.	Interpretación del SEV3	58
22.	Interpretación del SEV4	59
23.	Interpretación del SEV5	60

24.	Interpretación del SEV6	61
25.	Mapa de lineamientos estructurales	62
26.	Roseta de rumbos para lineamientos	63
27.	Fotografía panorámica del casco urbano.....	64
28.	Mapa de pendientes	65
29.	Fotografías de las grietas y subsidencias diferenciales	66
30.	Mapa geomorfológico	67
31.	Mapa de la red de drenaje	68
32.	Mapa de coronas de deslizamientos.....	69
33.	Localización de sondeos en Barrio El Centro	72
34.	Localización de sondeos en Barrio Nuevo	73
35.	Correlación de SPT.....	74
36.	Perfil 1, Barrio El Centro	75
37.	Perfil 1, correlación estratigráfica.....	76
38.	Perfil 2, Barrio Nuevo.....	77
39.	Perfil 2, correlación estratigráfica	78
40.	Elipse de deformación local	80
41.	Modelo teórico sistema de falla sinistral	81
42.	Roseta de rumbo sobrepuesta al modelo teórico de ZFM	83
43.	Mapa de riesgo geotécnico.....	86
44.	Mapa de riesgo por deslizamientos	93

TABLAS

I.	Perfil de meteorización	5
II.	Parámetros de resistividad de materiales	13
III.	Valores de resistividad de las formaciones geológicas.....	13
IV.	Vértices de la zona de investigación.....	22
V.	Datos de calicatas.....	36

VI.	Datos de campo de las muestras de campo	36
VII.	Datos de los sondeos eléctricos verticales.....	39
VIII.	Datos de los sondeos de penetración estándar	42
IX.	Datos de las muestras con granulometría y plasticidad	44
X.	Datos de las muestras con ensayo de densidad	45
XI.	Datos geotécnicos SPT1	48
XII.	Datos geotécnicos SPT2.....	49
XIII.	Datos geotécnicos calicata A	50
XIV.	Datos geotécnicos calicata C	51
XV.	Datos geotécnicos calicata D	51
XVI.	Sustrato de Barrio El Centro	53
XVII.	Sustrato de Barrio Nuevo	54
XVIII.	Datos de campo de los SEV	55
XIX.	Resumen unidades geotécnicas	84

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
ρ_w	Agua contenida en los poros
cm	Centímetro
IP	Índice de plasticidad
kJ	Kilojoule
kg	Kilogramo
km²	Kilómetros cuadrados
WL	Límite líquido
WP	Límite plástico
>	Mayor que
<	Menor que
m	Metros
msnm	Metros sobre el nivel del mar
mm	Milímetros
Ω	Ohm
P_i	Peso retenido por el tamiz
P	Peso seco total de la muestra
C_j	Porcentaje de material
ϕ	Porosidad
ρ	Resistividad
σ	Sigma (esfuerzo de deformación)
D_j	Tamiz de diámetro

GLOSARIO

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation</i> (Sociedad Americana de Oficiales Estatales de Carreteras y Transportes).
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedad Americana para Ensayos y Materiales).
Corona de deslizamiento	Es la parte más alta del deslizamiento, está formado de material que no se ha movido y se mantiene, adyacente al plano de movimiento.
Correlación	Es un procedimiento que permite establecer la correspondencia entre partes geográficamente separadas de unidades de suelo y roca.
Deslizamiento	Es un fenómeno natural que sufre una masa de suelo o roca, como consecuencia de movimientos muy lentos por acción de la gravedad y saturación por escorrentía.
Falla geológica	Es una estructura geológica formada por una fractura o conjunto de fracturas a lo largo de grandes bloques de la litosfera terrestre.

Geofísica	Ciencia derivada de la geología que trata del estudio de las propiedades físicas de la Tierra. Se utilizan desde un punto de vista aplicado los principios de la Física, midiendo de forma indirecta las variaciones de las magnitudes físicas en el espacio y tiempo.
IGN	Instituto Geográfico Nacional.
INFOM	Instituto de Fomento Municipal.
IPI2WIN	<i>Software</i> de código abierto desarrollado por Alexey Bocache de la Universidad Estatal de Moscú.
Lineamiento	Rasgo lineal o levemente curvo de gran longitud presente en la superficie de la Tierra, que indica la existencia de un contacto geológico o una estructura geológica mayor.
SEV	Método geofísico denominado Sondeo Eléctrico Vertical, determina la distribución vertical de resistividades en el subsuelo.
SIG	Sistemas de Información Geográfica.
Sigma	Son los esfuerzos de deformación de magnitud vectorial resultante de la aplicación de una fuerza, pueden ser de tipo 1 (principal), 2 (medio) y 3 (mínimo).

SPT	Ensayo geotécnico denominado Sondeo de Penetración Estándar, está relacionado con una penetración dinámica en el subsuelo, con el avance se hace un reconocimiento geotécnico a partir de la obtención de muestras.
SUCS	<i>Unified Soil Classification System</i> (sistema unificado de clasificación de suelos).
Talud	El término se refiere a la inclinación que se le da a una porción de tierra ya sea natural o diseñada topográficamente.
Tamiz	Cedazo con diferentes medidas por el que pasa una muestra de suelo seco.
Valor soporte	Capacidad de un suelo de soportar una carga, sin que se produzcan fallas dentro de su masa, se mide en unidades de fuerza por unidad de área.
WGS84	<i>World Geodetic System 1984</i> , Sistema geodésico de coordenadas geográficas.
ZFM	Zona de falla del Motagua.

RESUMEN

La presente investigación tuvo un énfasis en el análisis de estudios relacionados con el área de la ingeniería geotécnica, tipos de suelos, geología local, geología estructural y geomorfología.

Estos renglones fueron utilizados como la base para la interpretación realizada en las líneas de investigación de riesgos geológicos, geofísica aplicada y mecánica de suelos en el casco urbano del municipio de La Unión, del departamento de Zacapa.

Se realizó un análisis de los tipos de roca que son la unidad de coluvión, la unidad de granito y la unidad de filita. Para determinar los tipos de suelos se analizaron muestras de sondeos de penetración estándar y de calicatas, a las cuales se les efectuaron ensayos de granulometría, plasticidad y densidad.

La geología estructural fue fundamental para reconocer el sistema local que producen los deslizamientos locales en la zona urbana, los lineamientos estructurales fueron analizados mediante análisis de modelos digitales y trazas identificadas en fase de campo, mostrando una asociación a trazas de falla mayores.

El producto final de este trabajo dio a conocer el mapa de riesgo geotécnico, integrando cada uno de los elementos analizados empleando sistemas de información geográfica. Este mapa enmarca las unidades geotécnicas de la zona estudiada, así como la existencia de deslizamientos que

fueron identificados en las fases de campo y su posterior análisis en la fase de gabinete.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- Existen deslizamientos de tierra en el casco urbano del municipio de La Unión, que se activan al momento de las precipitaciones pluviales, lo que ocasiona un riesgo a la habitabilidad de la zona y sus accesos.

El municipio de La Unión presenta suelos derivado de rocas parentales, que han sido identificadas como ígneas y metamórficas, los que principalmente son suelos limo-arcillosos que han sido observados en deslizamientos cuando ocurren eventos de precipitación inusuales, lo cual nos hace cuestionar si los espesores tienen que ver con la generación de deslizamientos.

El nivel freático es somero, dadas las condiciones geomorfológicas donde se encuentra emplazado es casco urbano, aunado a esto el drenaje actual ha sido saturado dejando de realizar su función de drenar las aguas residuales. Estos problemas propician un escenario en donde ocurre un desplazamiento del macizo rocoso con la infraestructura de los pobladores en superficie.

Estos hechos inciden en los deslizamientos de tierra que afectan la zona urbana del municipio, bajo este contexto se hace la pregunta de investigación principal: ¿Podría ser un mapa geotécnico el instrumento para identificar las zonas de suelo y roca de esta localidad?

Los cortes del terreno para la construcción de viviendas, así como las ubicaciones se realizan sin planificación territorial y tampoco sin ningún plan del manejo de riesgo que sean funcionales.

La distribución espacial de los diferentes tipos de deslizamientos dificulta el acceso vial para la población, misma que desconoce las zonas susceptibles a eventos gravitacionales, planteando de esta forma las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Cómo es la incidencia del entorno geológico en la zona afectada por deslizamientos?
- ¿Cuáles son las zonas de los deslizamientos de tierra en el casco urbano del municipio?
- ¿Qué tipos de suelos se pueden diferenciar a partir de la toma de muestras superficiales?

OBJETIVOS

General

Realizar un mapa geotécnico que permita delimitar las zonas de riesgo en el área urbana del municipio La Unión, localizado en el departamento de Zacapa.

Específicos

1. Identificar mediante un análisis topográfico el área específica de la zona de influencia de los deslizamientos.
2. Clasificar los suelos superficiales con base a sus propiedades texturales, de plasticidad y capacidad soporte.
3. Interpretar la geología de superficie y la incidencia en la zona afectada por los deslizamientos.
4. Medir los horizontes de suelos limo-arcillosos para representar una correlación de la estratigrafía subsuperficial.
5. Establecer la distancia entre el subsuelo y el nivel freático que interactúan como un plano de fricción, propiciando los deslizamientos de tierra.

HIPÓTESIS

Los deslizamientos identificados en el área urbana y rural del municipio La Unión podrían ser provocados debido a que los suelos de tipo limo-arcillosos, son producto de la meteorización de rocas ígneas y metamórficas, los cuales se activan por efecto del agua superficial y subterránea.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

La investigación que a continuación se presenta, describe la realización del de riesgo geotécnico en el área urbana de la Unión, municipio del departamento de Zacapa. Como resultado de ello se desarrolló lo siguiente:

- Fase de investigación

Contiene la información que corresponde a los conceptos generales, recopilación bibliográfica y metodología de elaboración.

- Fase de análisis y discusión de resultados

Contiene la revisión de datos obtenidos mediante ensayos de campo, la interpretación y correlación de la información geológica-geotécnica dio como resultado las conclusiones y el mapa final del cartografiado.

INTRODUCCIÓN

A continuación, se presenta los resultados de los análisis de parámetros de mecánica de suelos, ensayos de laboratorio para la identificación de tipos de suelos, sondeos eléctricos verticales y el estudio de la geología, geomorfología y geología estructural del casco urbano de La Unión, municipio de Zacapa.

En el apartado de conceptos generales, se establece un marco teórico que permite establecer una base literaria comprendiendo así la configuración actual de los suelos, los métodos de prospección directa, como son los sondeos de penetración estándar y de exploración indirecta, que en este caso fueron de sondeos eléctricos verticales.

El marco metodológico delimita el acceso a la zona de estudio, la recopilación de estudios previos, así como sus tipos y localizaciones. Se abarcan estudios regionales y locales que ayudaron a comprender el contexto geotécnico del sector.

En el capítulo de análisis de la información se explica la distribución de suelos y sus propiedades, la exploración geofísica del subsuelo, los lineamientos estructurales empleando el estudio de imágenes satelitales y de la geomorfología local.

Por medio de la discusión de resultados desarrollada en el capítulo 4, se describieron las relaciones entre las calicatas, sondeos eléctricos verticales y sondeos de penetración estándar. Estos resultados muestran por sí mismos una relación entre cada uno, por el tipo de suelo y materiales en el subsuelo.

La geología estructural fue un eje fundamental para integrar el trabajo de campo y los lineamientos estructurales identificados luego del análisis de fotointerpretación. Estos elementos actúan como planos de movimiento y delimitan las zonas afectadas por estos fenómenos naturales.

Es así como se presenta el mapa de riesgo por deslizamientos para el casco urbano del municipio de La Unión, Zacapa.

1. CONCEPTOS GENERALES

1.1. Deslizamientos

“Los geólogos usan la expresión deslizamientos de tierra en sentido general para referirse a una amplia gama de movimientos de masas que llegan a causar pérdidas de vida, daños materiales o interrupciones de las actividades humanas” (Wicander y Monroe, 2000, p. 224).

Los factores condicionantes para los deslizamientos a diferencia de otros riesgos geológicos y climáticos naturales como son los sismos, huracanes, tsunamis, inundaciones y volcanismo están fuera de la intervención humana de acuerdo con Rivera (2005):

Es entonces de vital importancia conocer los siguientes ambientes:

- Topográficos, con referencia a características morfológicas del relieve terrestre.
- Climáticos, las variables como la temperatura, humedad, precipitación.
- Litológicos, la composición mineral, las propiedades físicas y químicas de las rocas.
- Estratigráficos, la forma de ocurrencia o modo en que yacen las rocas determinan la estabilidad o inestabilidad del terreno.

- Tectónica, la ubicación espacial en el territorio continental.

Los métodos y técnicas que refieren para identificar los deslizamientos para Gonzáles, Ferrer, Ortuño y Oteo (2002), que sean activos o antiguos y para el reconocimiento de zonas inestables consisten, básicamente, en la identificación de rasgos propios de estos procesos, evidencias de movimientos y otros signos asociados a su aparición como son:

- Formas erosivas y de acumulación (anomalías en la pendiente de las laderas).
- Depósitos deslizados.
- Grietas y escarpes.
- Daños en construcciones o estructuras, conducciones, obras lineales, entre otros.
- Tipos y características de la vegetación.
- Modelos de drenaje, zonas encharcadas, surgencias.
- Desvío de cauces, depósitos de masas deslizadas en llanuras de inundación, entre otros.

Estas tareas se realizan tanto en el campo como a partir de cartografías existentes, (mapas geomorfológicos, topográficos, geológicos, geotécnicos, entre otros.), fotografías aéreas e imágenes multiespectrales de sensores remotos, de mucha mayor resolución que las imágenes

convencionales, siempre en función de la escala de trabajo y de los objetivos del estudio. (González, Ferrer, Ortuño y Oteo, 2002, p. 641).

Los movimientos de masas o deslizamientos se clasifican según tres criterios principales según Rivera (2005), son la velocidad del movimiento (lento o rápido), el tipo de movimiento (principalmente, caída, deslizamiento o flujo) y del tipo de material que arrastra (roca, suelo o detritos).

Los riesgos por deslizamientos según el Ilustre Colegio Oficial de Geólogos (2008), son:

Su tipología y potencialidad de inestabilidad se obtendrán de la combinación de los factores que pueden intervenir para que se produzca esa inestabilidad, estos pueden ser: naturaleza de los materiales, relación estructura-ladera, pendiente topográfica y morfología de la ladera, vegetación, climatología, meteorización, agua, erosión fluvial, sismicidad de la zona y acciones antrópicas.

Dentro de los aspectos a tomar en cuenta para la elaboración de mapas que muestren los movimientos de ladera se consideran los trabajos de campo de manera primordial, entre los que destacan: la Identificación de procesos actuales y antiguos in situ, de rasgos de movimiento, como pueden ser grietas, escarpes, bloques caídos y daños en viviendas e infraestructuras. (p. 20)

1.2. Origen y formación de suelos

El origen de los suelos son las rocas, y su formación es producto del proceso en lo que el material que los conforma se transforma, es decir la

meteorización. En la meteorización la roca sufre desintegración y descomposición producto de factores como el agua, el clima, el aire o el tiempo. (Montúfar, 2017, pp. 5-6).

Según Gonzáles *et. al.* (2002):

La diagénesis de los suelos inicia con los macizos rocosos preexistentes que constituyen la roca madre, cuando es sometida a meteorización se produce la erosión en sus tres facetas:

- Física: es debido a los cambios térmicos y a la acción del agua. Estas acciones físicas tienden a romper la roca inicial y a dividirla en fragmentos de tamaño cada vez más pequeño, que pueden ser separados de la roca por agentes activos como el agua, el viento y la gravedad.
- Química: originada por fenómenos de hidratación, disolución, oxidación, cementación, entre otros. Esta acción tiende tanto a disgregar como a cementar las partículas, lo que quiere decir que puede ayudar a la acción física y posteriormente a cementar los productos formados, dando como resultado una unión (cementación) una y otra vez.
- Biológica: producida por actividad bacteriana, induciendo putrefacciones de materiales orgánicos y mezclando el producto con otras partículas de origen fisicoquímico, actuando de elemento catalizador. (p. 18)

Las clases de erosión dan lugar a los fenómenos de meteorización del macizo rocoso, estableciendo así el perfil de meteorización (tabla I), donde se clasifican los grados de este proceso con base a rocas sedimentarias, ígneas o metamórficas.

Según Gonzáles *et. al.* (2002):

En el perfil de meteorización la roca madre ocupa la parte inferior y alejada de la superficie, mientras que el suelo se sitúa en la parte más alta. El suelo puede ser denominado suelo residual cuando ha permanecido in situ, al contrario, cuando el suelo ha sido transportado por diversos agentes y por ende ha sido movilizado formando depósitos aluviales y coluviales se denomina suelo transportado. (p. 20)

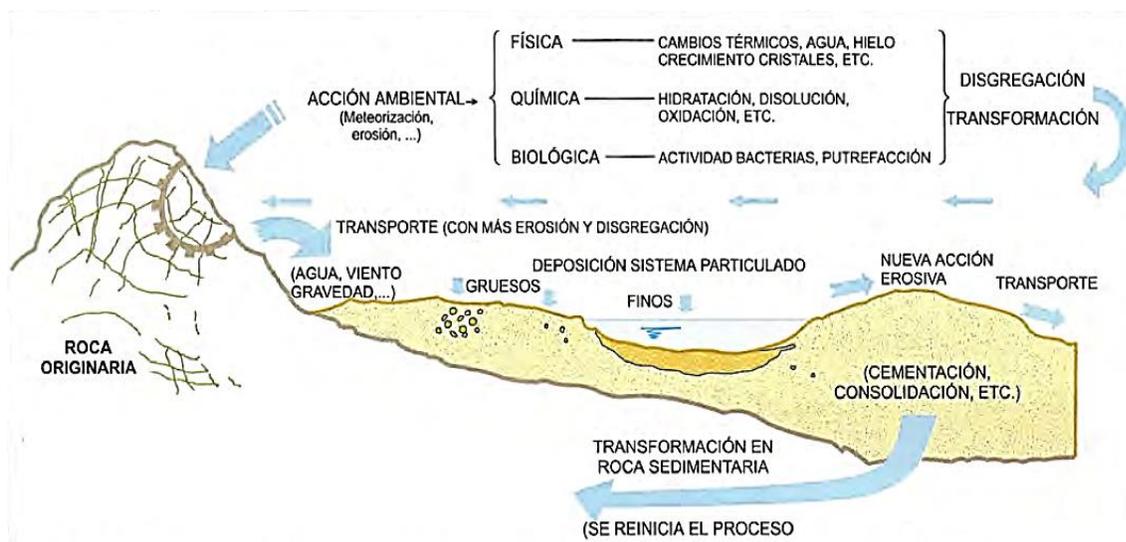
Tabla I. Perfil de meteorización

Perfil esquemático	Love (1951) Little (1961)	Vargas (1951)	Sowers (1954, 1963)	Chandler (1969)	Geological Soc. Eng. Group (1970)	
	Rocas ígneas	Ígneas, basálticas y areniscas	Ígneas y metamórficas	Margas y limolitas	Rocas ígneas	
	VI Suelo	Suelo Residual	Zona superior	IV Completamente alterada	VI Suelo residual	
	V Completamente alterada	Suelo residual joven	Zona intermedia	Parcialmente alterada	V Completamente alterada	
	IV Altamente alterada	Capas de rocas desintegradas	Zona parcialmente alterada		III	IV Altamente alterada
	III Moderadamente alterada				II	III Moderadamente alterada
	II Algo alterada				II	II Débilmente alterada
	I Roca sana	I Roca sana	I Roca sana	I Roca inalterada	I Roca inalterada	IB Muy poco alterada IA Roca sana

Fuente: Gonzáles *et. al.* (2002). *Ingeniería geológica*.

Para ejemplificar el ciclo idealizado de la formación de los suelos se ha propuesto en la figura 1, el ciclo en el cual intervienen distintos procesos entre los que destacan la meteorización, el transporte, la deposición, cementación y transformación entre rocas.

Figura 1. **Ciclo de formación de suelos**



Fuente: Gonzáles et. al. (2002). *Ingeniería geológica*.

Los parámetros de meteorización y el ciclo de formación de suelos es un proceso que se está llevando a cabo en la zona de estudio.

1.3. Clasificación del suelo

A lo largo de la historia de la mecánica de suelos se ha llegado al consenso de clasificar los suelos, por la granulométrica de cada uno según Crespo (2004) se describen los suelos más comunes con los nombres generalmente utilizados en ingeniería civil para su identificación como:

- Gravas: son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas y que tienen más de dos milímetros de diámetro. Dado el origen, cuando son acarreadas por las aguas las gravas sufren desgaste en sus aristas y son, por lo tanto, redondeadas.

Las gravas ocupan grandes extensiones, por sus características al ser transportadas, pero casi siempre se encuentran con mayor o menor proporción de cantos rodados. Sus partículas varían desde 7.623 cm (3") hasta 2.0 mm.

La forma de las partículas de las gravas y su relativa frescura mineralógica dependen de la historia de su formación, encontrándose variaciones desde elementos rodados a los poliédricos.

- Arenas: es el nombre que se le da a los materiales de granos finos procedentes de la denudación de las rocas o de su trituración artificial, y cuyas partículas varían entre 2 mm y 0.005 mm de diámetro.
- Limos: son suelos de granos finos con poca o ninguna plasticidad. El diámetro de las partículas de los limos está comprendido entre 0.05 mm y 0.005 mm.
- Arcillas: son partículas sólidas con diámetro menor de 0.005 mm y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica al ser mezclada con agua. Algunas entidades consideran como arcillas a las partículas menores a 0.002 mm.

1.4. Distribución granulométrica

Como forma de conocer cada tipo de material y el equilibrio entre las partículas que contiene un suelo González *et. al.* (2002) indica que:

Se realizan análisis granulométricos, utilizando la vía seca para las partículas de tamaños superior a 0.075 mm, y la granulometría por sedimentación mediante el hidrómetro (vía húmeda) para tamaños iguales o inferiores a 0.075 mm.

Los primeros se llevan a cabo tomando una muestra representativa del suelo, secándola y disgregando en seco el conjunto de partículas. A esta muestra se le hace pasar por un conjunto de tamices (cuyos tamaños suelen ir disminuyendo en progresión geométrica agitando el conjunto.

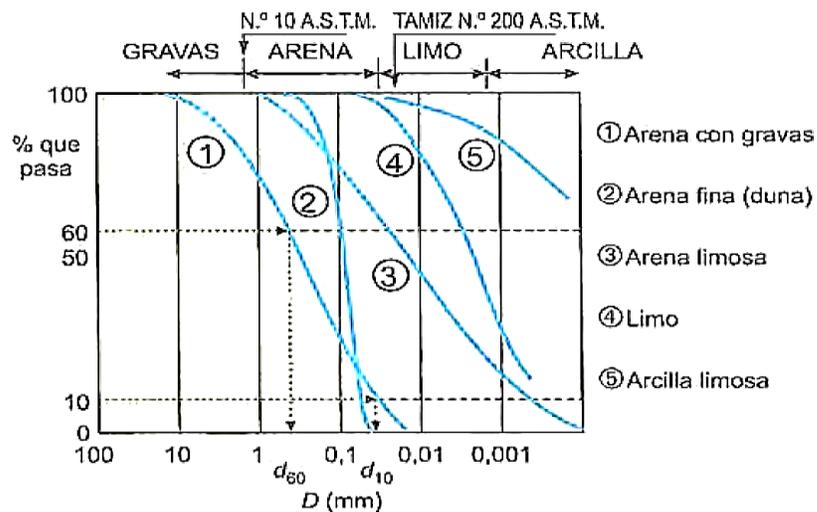
Después se pesa lo retenido en cada tamiz, con lo que, conocido el peso inicial de la muestra, se determina el porcentaje del material, C_j , que pasa por un tamiz de diámetro D_j : siendo P el peso seco total de la muestra y P_i el peso retenido por el tamiz de diámetro D . El peso P_{n+1} es retenido por la base ciega que se pone debajo de la columna de tamices.

$$C_j = \frac{\sum_{i=j+1}^{n+1} P_i}{P} \times 100 \quad P = \sum_{i=1}^{n+1} P_i \quad (\text{Ec. 1})$$

Con los datos de la ecuación 1 se producen las curvas granulométricas relacionando el porcentaje de material y el tamiz por el que pasa (gráfico) de la figura 2.

La curva 1 es una arena con gravas, la 2 es una arena fina, la número 3 es una arena limosa, la curva 4 un limo y por último la número 5 que es una arcilla limosa.

Figura 2. **Distribución de partículas**



Fuente: Gonzáles *et. al.* (2002). *Ingeniería geológica*.

1.5. Plasticidad

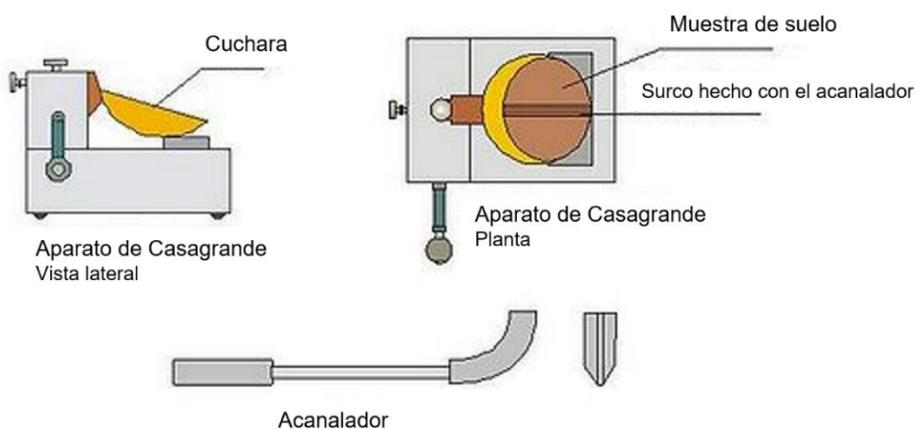
Como explica Crespo (2004), “la plasticidad es la propiedad que presentan los suelos de poder deformarse, hasta cierto límite, sin romperse. Por medio de ella se mide el comportamiento de los suelos en todas las épocas” (p. 69).

Al respecto Gonzáles *et. al.* (2002) explica que Atterberg definió tres límites en función del contenido de agua, a través de la determinación de la humedad. Estos tres límites son:

- El de retracción o consistencia que separa el estado de sólido seco y el semisólido.
- El límite plástico, WP, que separa el estado semisólido del plástico y,
- El límite líquido, WL, que separa el estado plástico del semilíquido; estos dos últimos límites se determinan con la fracción de suelo que pasa por el tamiz No. 40 A.S.T.M. (0.1 mm).

Determinando WL y WP se puede obtener un punto representativo de cada muestra de suelo en la carta de plasticidad de Casagrande (figura 3), representando la relación del límite líquido, WL, con el índice de plasticidad, IP ($IP = WL - WP$ representa el intervalo de humedades para pasar del estado semisólido al semilíquido).

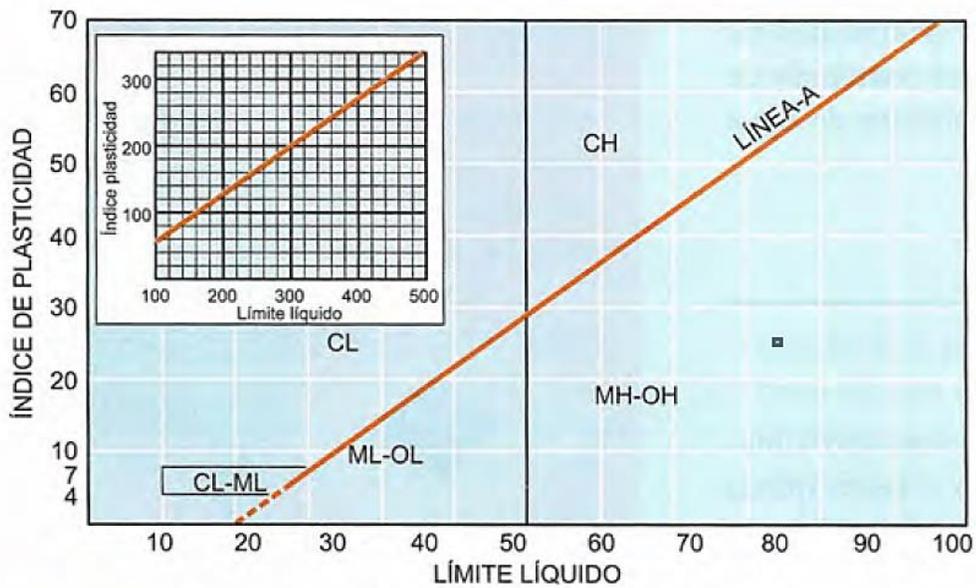
Figura 3. **Instrumento de medición de Casagrande**



Fuente: Construmática (2021). *Cuchara de Casagrande*. Consultado el 29 de marzo de 2023. Recuperado de <https://bit.ly/3eRWxRY>.

A partir de diversos estudios prácticos, Casagrande definió que los suelos con $WL > 50$ son de alta plasticidad (admiten mucha agua, pueden experimentar deformaciones plásticas grandes). También definió una línea A (figura 4) que resulta paralela a la dirección con que, en esta carta se ordenan las muestras de un mismo terreno.

Figura 4. **Carta de plasticidad de Casagrande**



Fuente: Gonzáles *et. al.* (2002). *Ingeniería geológica*.

Utilizando la línea A y el criterio de baja y alta plasticidad, en la carta de Casagrande se definen varias zonas, representadas en la figura 4, los suelos limosos y con apreciable contenido orgánico tienen un intervalo de humedad menor para pasar del estado semisólido a semilíquido, situándose por debajo de la línea A, mientras que las arcillas están por encima de dicha línea.

Se definen, así, varios tipos de suelos: arcillas de baja plasticidad (CL), arcillas de alta plasticidad (CH), limos y suelos orgánicos de baja plasticidad (ML-OL) y limos y suelos orgánicos de alta plasticidad (MH-OH).

1.6. Prospección geofísica en el sitio

Como lo define González *et. al.* (2002), “la prospección geofísica es el conjunto de técnicas que investiga el interior de la Tierra a partir de las variaciones detectadas en parámetros físicos significativos y de su correlación con las características geológicas” (p. 329).

Para López (2002):

En cambio, para los métodos indirectos: son aquellos que se realizan sin la necesidad de alterar el terreno. Por lo general se basan en medir desde la superficie alguna propiedad física de los materiales que constituyen el macizo. De forma general se considera que estas técnicas son de tipo no destructivo y son complementarias a los ensayos in situ.

Se emplean de forma habitual para determinar espesores de rellenos o recubrimientos, posición del nivel freático, localización de cavidades u otras heterogeneidades del subsuelo, estructuras del suelo, localización de fallas o superficies de deslizamiento, espesor de roca alterada, localización de conducciones subterráneas. (p. 433)

1.7. Métodos eléctricos en geofísica

Son aquellos que estudian la respuesta del terreno cuando se propagan a través de él corrientes eléctricas continuas (DC). El parámetro físico que

se encuentra es la resistividad (P) y la interpretación se hace en función de las características geológicas de la zona en que se aplican. (González *et. al.*, 2002, p. 329).

En la tabla II se presentan parámetros de resistividades de materiales más comunes, mientras que en la tabla III se indican los valores de los tipos de macizo rocoso con la presencia de agua meteórica.

Tabla II. **Parámetros de resistividad de materiales**

Materiales	Resistividad ρ (ohm.m)
Margas	50 – 5.000
Calizas	300 – 10.000
Pizarras	100 – 1.000
Granito	300 – 10.000
Arcillas	1 – 20
Arenas	50 – 500
Conglomerados	1.000 – 10.000
Areniscas	50 – 5.000
Aluviones	50 – 800<

Fuente: González *et. al.* (2002). *Ingeniería geológica*.

Tabla III. **Valores de resistividad de las formaciones geológicas**

Presencia de agua	Resistividad ρ (ohm.m)
Aguas superficiales con cloruros	0.03 – 0.10
Aguas manantiales (rocas sedimentarias)	1 – 10
Aguas manantiales (rocas intrusivas)	30 – 50
Aguas superficiales sin cloruros	0.01 – 50

Fuente: López (2002). *Geología aplicada a la Ingeniería Civil*.

Los métodos eléctricos son varios, pueden agruparse de la siguiente forma según López (2002), “utiliza fenómenos naturales como las corrientes telúricas y el potencial propio. También son considerados los fenómenos inducidos de tipo potencial, como líneas equipotenciales, resistivos, caídas de potencial y electromagnéticos” (p 435).

Para la zona de investigación los ensayos de SEV han sido los más utilizados, por su practicidad en el transporte de equipo y la rápida adquisición de datos en campo.

De acuerdo con González *et. al.* (2002), “la resistividad es una propiedad intrínseca de las rocas y depende de la litología, estructura interna y, sobre todo, de su contenido en agua, no siendo, por tanto, una propiedad isótropa en la masa rocosa” (p. 328).

La fórmula de Archie relaciona la resistividad de la roca, ρ , la del agua contenida en los poros, ρ_w , y la porosidad, φ :

$$\rho = a\varphi^{-m}S^{-n}\rho_w \quad (\text{Ec. 2})$$

Siendo S la saturación y los términos a, m, n coeficientes experimentales. Es frecuente utilizar la fórmula anterior con valores promedio:

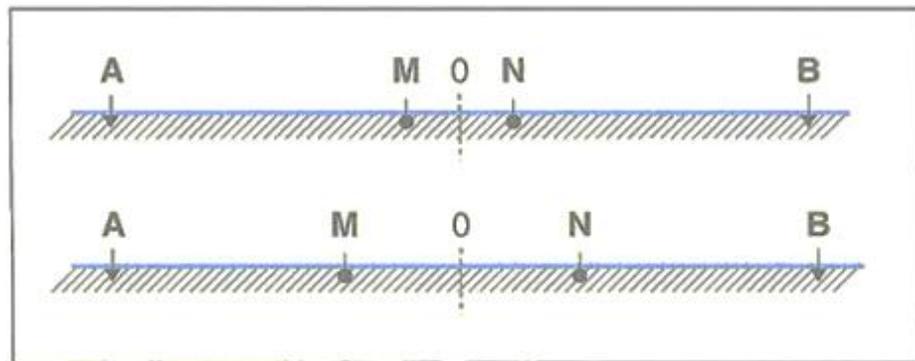
$$\rho = (\varphi S)^{-2}\rho_w \quad (\text{Ec. 3})$$

1.8. Sondeos eléctricos verticales (SEV)

Esta técnica consiste en separar los electrodos de corriente A y B del punto central (figura 5), siguiendo una línea recta, y medir la resistividad en cada

disposición. La resistividad aparente calculada será, por tanto, correspondiente a mayores espesores según se van separando los electrodos. Se emplea generalmente la configuración Schlumberger. El resultado que se obtiene del SEV es la variación de la resistividad ρ con la profundidad en el punto central del perfil investigado. (González *et. al.*, 2002, p. 330).

Figura 5. **Configuración Schlumberger**



Fuente: González *et. al.* (2002). *Ingeniería geológica*.

“Mediante un conjunto de SEV se define un perfil resistivo. Este perfil puede realizarse manteniendo fija la distancia entre los electrodos AB para cada sondeo o bien haciendo estos sondeos de profundidades variables” (López, 2002, p. 439).

Los SEV son utilizados en Guatemala para la exploración de aguas subterráneas, en la rama de la geotécnica define los límites de las formaciones in situ delimitando estratos de roca y suelos.

1.9. Sondeo de penetración estándar (SPT)

Este tipo de sondeo es considerado un ensayo *in situ*, “esta prueba de penetración dinámica se realiza con el interior de sondeos durante la perforación” (González *et. al.*, 2002, p. 431).

Según López (2002) “mide la resistencia a la penetración de un toma muestras de características determinadas, colocado en el fondo del taladro y golpeado con una maza también de dimensiones definidas” (p. 493).

“La masa tiene un peso de 63.5 ± 0.5 kg de masa y se deja caer sobre la cabeza del varillaje desde una altura de 760 ± 10 mm. El diámetro de la perforación debe estar comprendido entre 60 y 150 mm” (López, 2002, p. 494).

Por la practicidad del ensayo puede realizarse en todo tipo de suelos, arrojando parámetros geotécnicos como la densidad relativa, el ángulo de fricción interna, la carga portante del suelo, entre otros.

Según Devincenzi y Frank (2004) los lineamientos de forma resumida para la realización del ensayo son:

- Se ejecuta un taladro hasta la cota deseada y en el fondo del mismo se introduce un tomamuestras de dimensiones estándar que consta de tres elementos: zapata, tubo bipartido y cabeza de acoplamiento con el varillaje.
- Se hinca el tomamuestras o cuchara SPT en el terreno 60 cm, contando con número de golpes necesarios para hincar tramos de 15 centímetros. La hinca se realiza mediante un maza de 63.5 kg

(140 libras) que cae desde una altura de 76.2 cm (30 pulgadas) en un cabeza de golpeo o yunque, lo que corresponde a un trabajo teórico de 0.5 kJ por golpe.

La lectura del golpe del primer y último tramo no se tienen en cuenta, por posible alteración del suelo o derrumbes de las paredes del sondeo en el primer caso por posible comparación en el segundo. Los valores de golpeo de los tramos de 15 cm sumados conducen al parámetro N30SPT ó NSPT, denominado también resistencia a la penetración estándar. (p. 11)

Figura 6. **Equipo SPT y operación en campo**



Fuente: González *et. al.* (2002). *Ingeniería geológica.*

Luego de realizar el ensayo en el terreno con base a la norma ASTM D1586-84, Devincenzi y Frank (2004) indican que:

Cuando el terreno es muy resistente se detiene la prueba por rechazo, anotando la penetración realizada y el número de golpes correspondiente. La prueba se puede dar por finalizada cuando:

- Cuando se aplican 50 golpes para un tramo de 15 cm
- Cuando se aplican 100 golpes en total
- Cuando no se observa penetración alguna para 10 golpes. En estos casos resulta prudente insistir en el golpeo pues bien podría tratarse de un bolo o grava gruesa. (p. 11)

1.10. Mapa geotécnico

Constituyen un método en ingeniería geológica para presentar cartográficamente información geológico-geotécnica con fines de planificación y uso del territorio y para el proyecto, construcción y mantenimiento de obras de ingeniería, aportan datos sobre las características y propiedades del suelo y del subsuelo de una determinada zona para evaluar su comportamiento y prever los problemas geológicos y geotécnicos. (González et al., 2002, p. 376).

Un mapa geológico incluye información superficial del entorno, en el que se incluyen fallas, discontinuidades, tipos de roca, grados de meteorización, mientras que los mapas geotécnicos consideran la descripción y clasificación geotécnica de suelos, propiedades físicas y mecánica de los materiales, condiciones geomorfológicas, e incluso resistividades de los materiales.

El contenido de los mapas geotécnicos, según González *et. al.* (2002) deben incluir la siguiente información básica:

- Distribución y descripción litológicas de las unidades geológicas
- Espesor de suelos, formaciones superficiales y rocas alteradas
- Clasificación geotécnica de suelos
- Condiciones hidrogeológicas
- Condiciones geomorfológicas
- Procesos dinámicos
- Investigaciones previas existentes
- Riesgos geológicos.

2. MARCO METODOLÓGICO

Para el desarrollo de este apartado se realizaron visitas de campo con personal de la Municipalidad y vecinos que tienen el conocimiento de los problemas de asentamientos y deslizamientos dentro de la zona estudiada.

Con las visitas de campo se coordinaron las observaciones de los ensayos que se realizaron de forma previa. La ubicación de los sondeos eléctricos verticales tomó en cuenta las coordenadas de los puntos evaluados, así como la topografía del lugar.

Las calicatas fueron realizadas con el objetivo de establecer una relación con los sondeos eléctricos y el material *in situ*. Con ello se realizó una correlación de los datos indirectos obtenidos con el arreglo geofísico y los materiales observados en los horizontes excavados.

La localización de grietas y fisuras se realizó mediante caminamientos en la zona urbana, registrando en un mapa base estos elementos muy característicos y que llaman la atención de los vecinos, por las deformidades en construcciones y carreteras en donde son más evidentes.

2.1. Descripción general de la localización geográfica

La zona de investigación se ubica en el departamento de Zacapa en la zona oriente de Guatemala. Específicamente en la hoja topográfica: La Unión (2360 IV) editada por el IGN. En los vértices de la tabla IV se delimitan los límites espaciales en coordenadas geográficas.

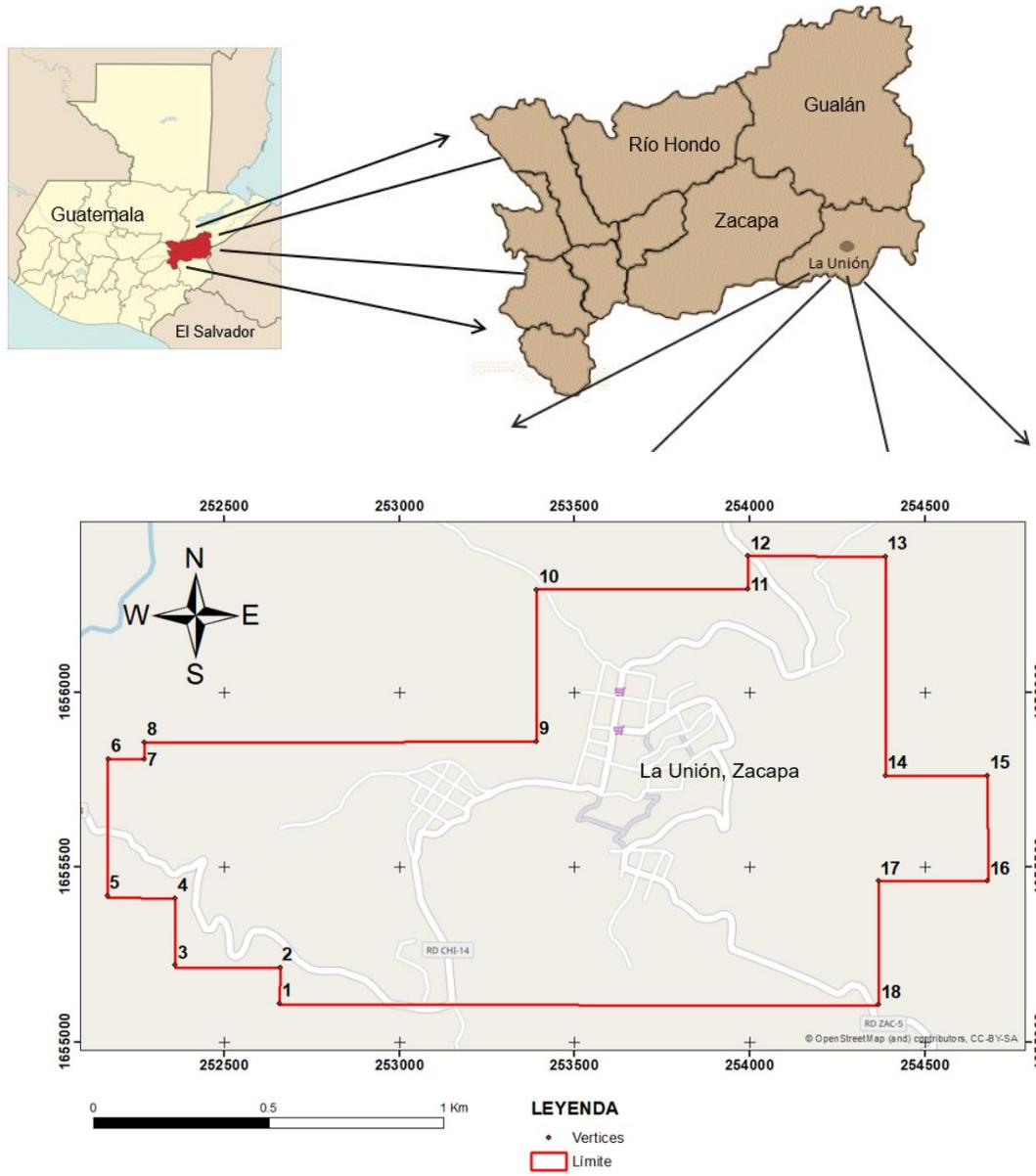
Tabla IV. **Vértices de la zona de investigación**

Coordenadas: UTM		
Datum: WGS84 Zona 16 Norte		
Vértice	Este	Norte
1	252658.32	1655111.43
2	252659.94	1655213.89
3	252360.22	1655219.41
4	252360.22	1655412.01
5	252167.20	1655418.36
6	252171.63	1655809.86
7	252273.35	1655809.69
8	252273.35	1655856.77
9	253391.92	1655858.38
10	253391.92	1656292.56
11	253994.96	1656295.05
12	253994.96	1656388.18
13	254386.55	1656387.12
14	254386.55	1655761.27
15	254678.65	1655761.65
16	254678.10	1655460.02
17	254366.44	1655460.02
18	254367.49	1655107.17

Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

El área del polígono delimitado por los vértices es de 2.12 Km². En la figura 7 se observa la localización de la zona, en un contexto de lo general a lo particular.

Figura 7. Localización de la zona de investigación



Fuente: elaboración propia, empleado ArcMap.

2.2. Accesos

Para el acceso al casco urbano del Municipio La Unión, se inicia el recorrido desde la Ciudad de Guatemala tomando la ruta CA-9 Norte con destino a El Rancho ubicado en el kilómetro 84+500 (Ruta al Atlántico). A partir de este punto se continúa el avance a oriente hasta Gualán en el kilómetro 166+300 aproximadamente. Por último, se toma la ruta departamental RD-ZAC-05 unos 32 kilómetros en ascenso hasta la zona poblada (figura 8).

Las carreteras mencionadas son transitables en cualquier época del año, en su mayoría están asfaltadas y cuentan con programas de mantenimiento permanente.

Figura 8. Mapa regional de accesos a la zona de investigación

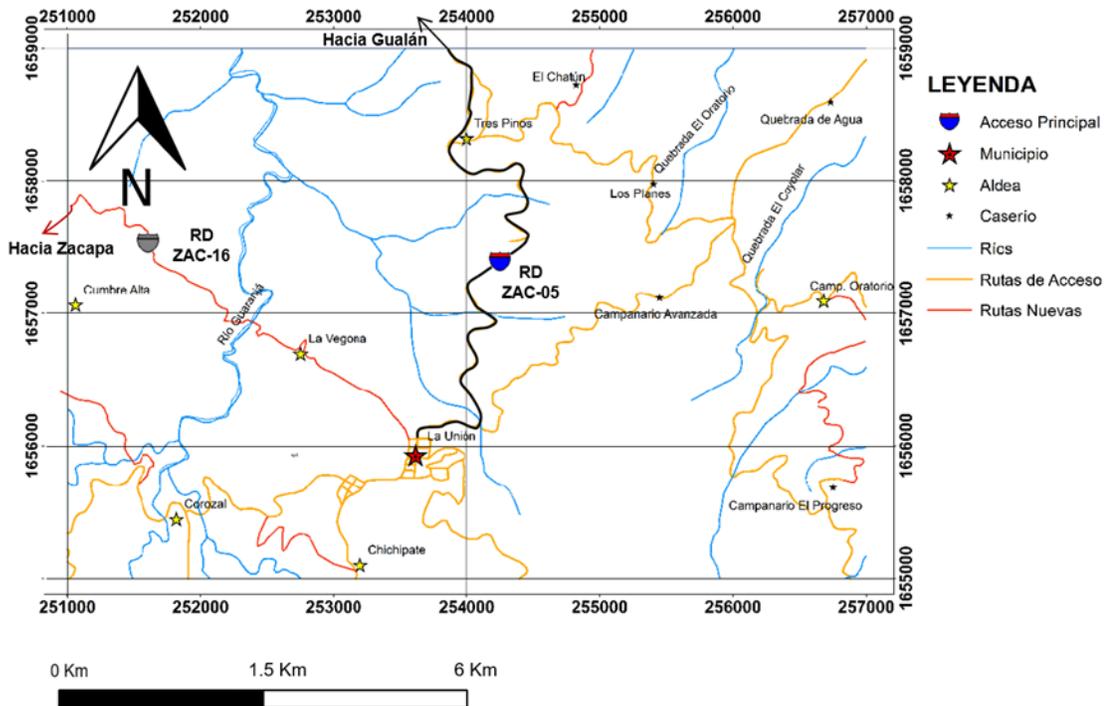


Fuente: Google Maps (2021). *Mapa de acceso*. Consultado el 29 de marzo de 2023.

Recuperado de <https://bit.ly/3srGL58>.

En el mapa de la figura 9 se muestran los accesos locales del casco urbano, así como las aldeas y caseríos más cercanos.

Figura 9. **Accesos locales a la zona de investigación**



Fuente: Salguero (2015). *Modelo petrológico del Plutón La Unión, en 24 kilómetros cuadrados a escala 1:25000.*

Los accesos locales del municipio cuentan con carreteras de asfalto y terracería. Entre las comunidades cercanas se tienen Chichipate, Corozal, La Vegona, Tres Pinos, Los Planes, Campanario Avanzada.

Estas comunidades tienen como centro económico de intercambio la zona urbanizada de La Unión, que cumple el rol de intermediario para la comercialización de productos.

2.3. Recopilación de datos bibliográficos

A continuación, se desarrollará las recopilaciones de datos bibliográficos en base a estudio previos.

2.3.1. Estudios previos

Consistió en recolectar y evaluar los registros de estudios relacionados a la investigación, tales como: Informes técnicos de instituciones del gobierno, artículos y tesis publicadas por universidades. Esta recopilación tuvo un enfoque geotécnico, tomando en cuenta los ensayos ejecutados y buscar así información en zonas no exploradas.

Diferentes estudios de exploración geotécnica han sido realizados en la zona de estudio, con el objetivo de conocer las características del subsuelo en la urbanización, donde se pueden mencionar sondeos eléctricos verticales y de penetración estándar.

La geología del área fue descrita por Salguero (2015), como unidades informales con base a su estudio de campo y análisis petrográfico, en donde se definió la unidad de filita (Fi) como el basamento de la localidad, un cuerpo intrusivo de granito (Gr) y unidades recientes de aluvión (Qal) y coluvión (Qco) al techo de la columna litológica local.

La unidad de coluvión es muy característica en el casco urbano, debido a sus condiciones geomorfológicas (pendientes abruptas) y del material depositado producto de deslizamientos de ladera antiguos a partir de los movimientos gravitacionales.

2.4. Análisis de mapas regionales

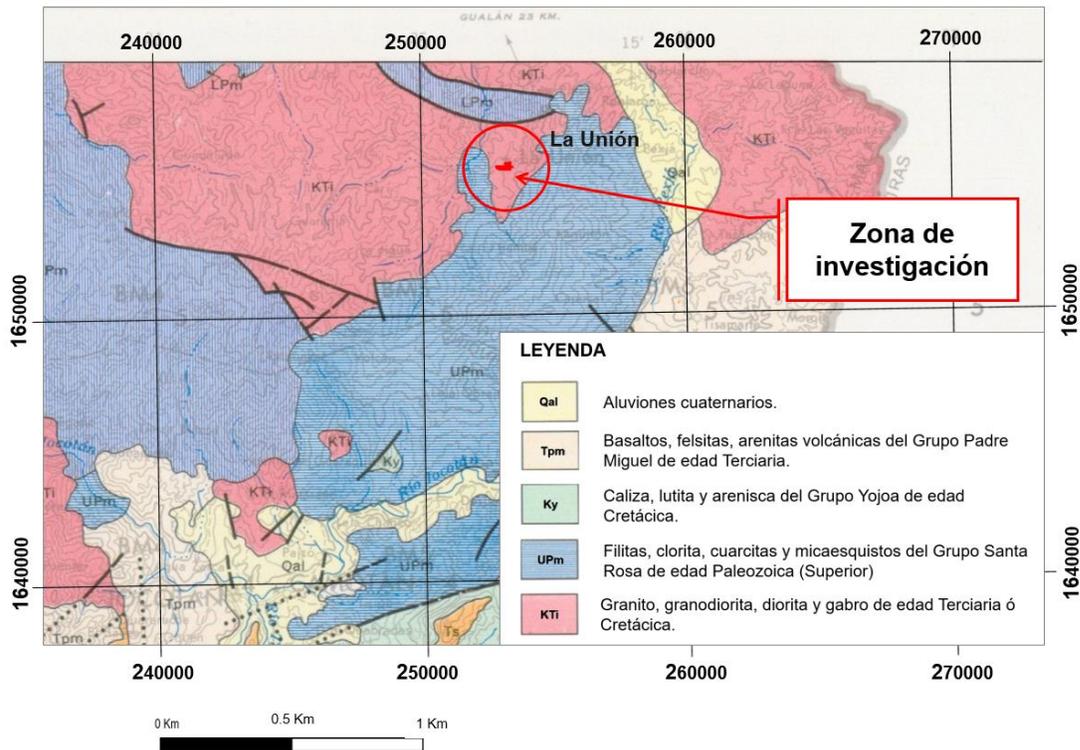
La geología regional donde se ubica La Unión ha sido definida con la presencia de rocas metamórficas de edad Paleozoica, entre las que el autor definió filitas, esquistos cloríticos/granatíferos, mármol y migmatitas.

Por la escala del trabajo publicado por el IGN (Instituto Geográfico Nacional) se cuenta con un contexto geológico regional del municipio, en el que se han estudiado rocas del tipo ígneo intrusivo, metamórfico y sedimentario, con fallas regionales de la zona de falla del Motagua (ZFM) al norte.

Se describe lo reportado en la literatura de las formaciones que se distribuyen en la región y específicamente en la zona de estudio por donde discurre el casco urbano. Se citaron solamente aquellas formaciones que se han identificado en la localidad o muy cerca de esta, luego en la geología local se describe lo observado con los recorridos de campo sobre el cartografiado propiamente dicho.

En la figura 10 se ubica la zona estudiada, dentro del mapa geológico regional en el cual se representan las unidades de rocas con edades recientes del cuaternario y las más antiguas de edad Paleozoica.

Figura 10. Mapa geológico regional



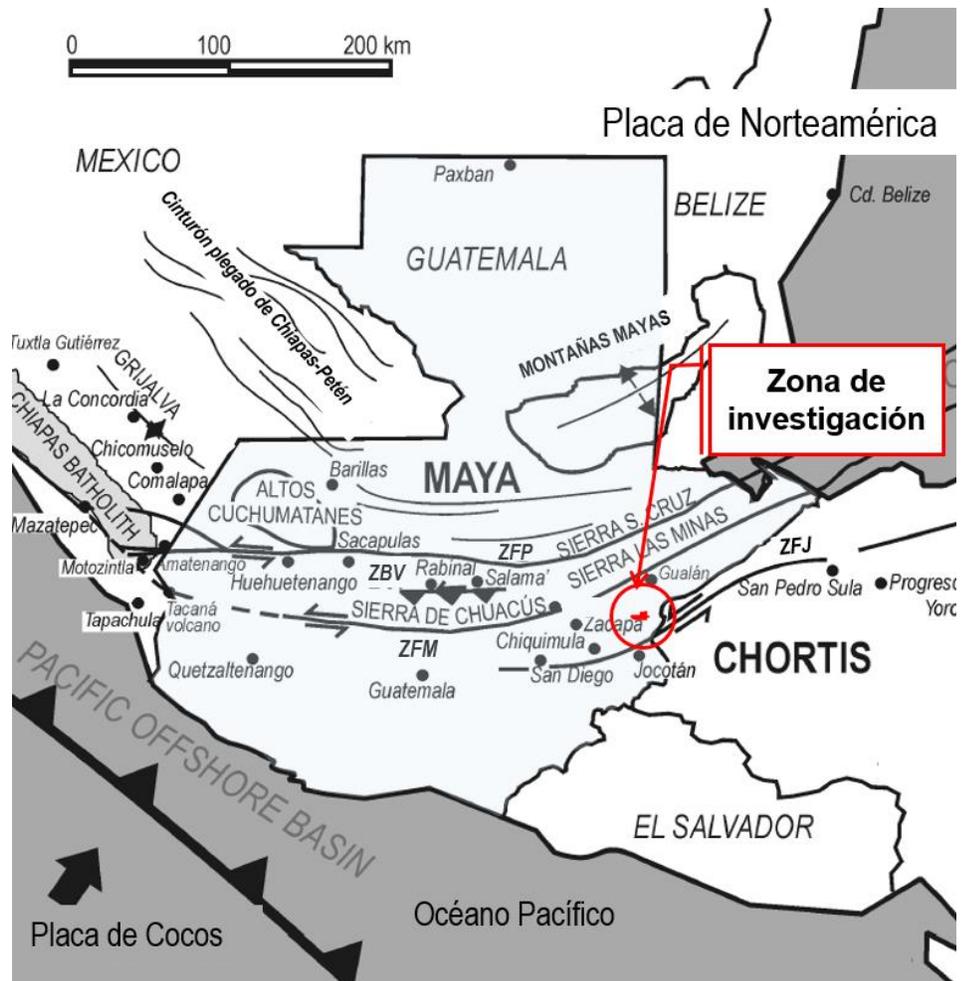
Fuente: Instituto Geográfico Nacional (1961). *Mapa Geológico General de Guatemala, Hoja Chiquimula.*

En la zona en donde se localiza el área de interés para este estudio, se tienen 3 unidades litológicas de mayor presencia en la zona de influencia. Entre ellas se pueden mencionar las rocas de edad Paleozoica, rocas intrusivas de edad Cretácica y aluviones cuaternarios.

El mapa de la figura 10 fue realizado a escala 1: 250,000 y es una referencia regional de la litología existente.

Respecto a la geología estructural regional de la zona de investigación, este casco urbano se encuentra al sur de la zona de falla del Motagua (ZFM).

Figura 11. Mapa tectónico regional



Fuente: Ortega-Gutierrez, Solari, Ortega-Obregon, y Elías-Herrera (2007). *The Maya-Chortís Boundary: A Tectonostratigraphic Approach*.

Tectónicamente Guatemala se ubica entre el límite entre la placa de Norteamérica (norte), la placa de Cocos (sur) y la placa del Caribe (este). En el mapa regional de la figura 11 se identifica la localización de esta investigación.

De la misma forma el municipio de La Unión se ubica dentro de dos sistemas de fallas dextrales de gran extensión lateral. Estas son al norte la Zona de Falla del Motagua y la Zona de Falla Jocotán-Chamelecón (ZFJ).

2.5. Geología local

De acuerdo con Salguero (2015), en su trabajo de cartografiado a escala 1:25,000 en los alrededores del municipio La Unión, Zacapa, identificó como unidades litológicas informales la unidad de filita (Fi) como basamento y un cuerpo intrusivo denominado unidad de granito (Gr) con un contacto inconforme.

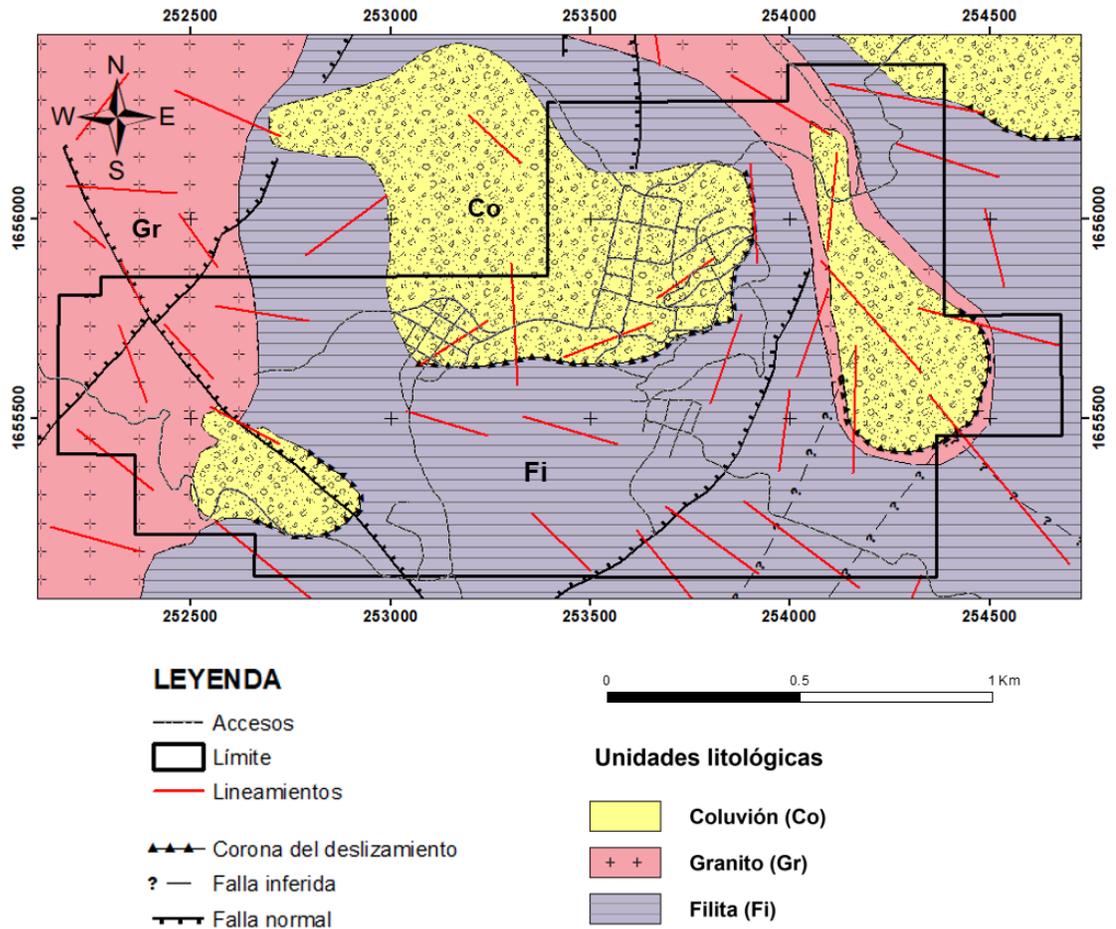
Como unidades de edad reciente fueron identificadas la unidad de aluvión y coluvión (Co). Los contactos entre las unidades presentan un alto grado de tectonismo y meteorización, combinado con procesos de alteración e intemperismo que dificultan sus diferenciaciones.

En el mapa de la figura 12 se puede observar la distribución de las unidades dentro de la zona delimitada para esta investigación.

En el mapa geológico local se pueden identificar también los elementos estructurales de lineamientos (también llamados lineaciones), fallas y coronas de deslizamientos que se llegaron a identificar en la fase de campo.

Es importante mencionar que, al tener las pendientes con dirección sur-norte la unidad de coluvión tiene un contacto de movimiento, que es la corona de deslizamientos identificados a partir de subsidencias y escalones de asentamiento diferencial.

Figura 12. Mapa geológico local



Fuente: Salguero (2015). *Modelo petrológico del Plutón La Unión, en 24 kilómetros cuadrados a escala 1:25,000.*

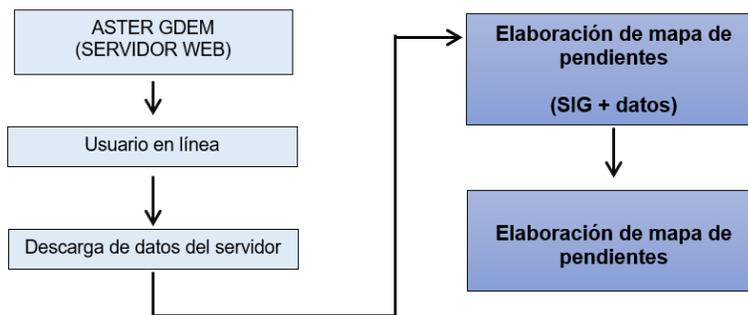
2.6. Fotointerpretación y teledetección

Para la realización de la fotointerpretación se utilizaron recursos disponibles en la *web*, mediante el uso de sistemas de información geográfica que facilitaron la creación de polígonos y líneas que representan estructuras geológicas y ubicaciones georreferenciadas.

Para la realización del mapa de pendientes se utilizaron imágenes satelitales obtenidas del satélite ASTER GDEM (*Global Digital Elevation Map*) por sus siglas en inglés, lanzado en el año 2009 por la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) de la agencia espacial de Estados Unidos en colaboración con el Ministerio de Economía de Japón.

En la figura 13 se sintetiza el proceso de obtención de datos del satélite y el procesamiento con el uso de SIG. En el proceso se descargaron datos del servidor web y se procesaron mediante el uso de programas de computadora creando así el modelo de pendientes y el modelo de elevación digital.

Figura 13. **Elaboración de mapa de pendientes**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Microsoft Word.

2.7. Sondeos geotécnicos

Los sondeos fueron realizados mediante una prospección manual y mecánica. En el caso de las calicatas se realizaron manualmente, mientras que los sondeos eléctricos verticales se realizaron mediante instrumentos especializados.

Los sondeos de penetración estándar se realizaron de forma mecánica.

2.7.1. Calicatas y extracción de muestras

Se realizó un total de 4 calicatas en el casco urbano, contando con el apoyo del personal de la Municipalidad para la excavación de estos sondeos de exploración directa. Vecinos del área facilitaron sus propiedades para la ejecución.

Figura 14. **Excavación de calicatas**



Fuente: [Fotografía de Marlon Joaquín Coy Figueroa]. (La Unión, Zacapa. 2022). Colección particular. Guatemala.

Para la ejecución de los sondeos se utilizaron herramientas entre las que se pueden mencionar: piochas, palas, macanas, cubetas, lazos y nylon para cubrir las calicatas, evitando de esta forma que la escorrentía y precipitación durante las noches produjeran una saturación como se puede observar en la figura 14.

Con el avance de las excavaciones se determinaron los horizontes del suelo, realizando la toma de muestras *in situ* para los ensayos de granulometría, plasticidad y densidad.

Para la toma de las muestras inalteradas se utilizó un procedimiento de parafinado realizado por el maestrante, como ente regulador del proceso y la calidad.

En el inciso A de la figura 15 se evidencia el proceso de excavación de la calicata B, seguidamente se observa el proceso de parafinado de la muestra adquirida (inciso B), por último, se observa el proceso de tallado para la extracción de la muestra inalterada C.

Figura 15. Toma de muestras en calicatas



Fuente: [Fotografía de Marlon Joaquín Coy Figueroa]. (La Unión, Zacapa. 2022). Colección particular. Guatemala.

Se determinaron los horizontes de suelo en cada una de las calicatas, la ubicación de estos elementos de exploración se realizó en función de la cercanía a los sondeos eléctricos verticales para luego realizar una correlación con la geología local.

En la tabla V se muestran los detalles de ubicación y otros aspectos relevantes de las calicatas realizadas.

Tabla V. **Datos de calicatas**

Nombre	Fecha de adquisición	Ubicación (Barrio)	WGS84 Z16 N		Altitud (msnm)	Profundidad (m)
			Este	Norte		
A	10/06/2021	El Centro	253606	1655964	872	3.40
B	11/06/2021	El Centro	253595	1655780	896	3.60
C	12/06/2021	El Centro	253678	1655944	888	3.10
D	12/06/2021	Nuevo	253107	1655722	870	2.10

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Del resultado de la excavación de las calicatas se obtuvieron 9 muestras, en la tabla VI se indican las características generales, entre las que se pueden mencionar la ubicación, el tipo de muestra y la profundidad.

Tabla VI. **Datos de campo de las muestras de campo**

Calicata	Ubicación (Barrio)	Nomenclatura	Tipo de muestra	Profundidad (m)
A	El Centro	C1M1	No alterada	1.45
A	El Centro	C1M2	Alterada	1.45
A	El Centro	C1M3	Alterada	3.40
C	El Centro	C2M1	No alterada	0.85
C	El Centro	C2M2	Alterada	0.85
C	El Centro	C2M3	No alterada	1.90
C	El Centro	C2M4	Alterada	1.90
D	Nuevo	C4M1	No alterada	2.10
D	Nuevo	C4M2	Alterada	2.10

Fuente: elaboración propia, empleando programa Microsoft Word.

En la calicata B no se extrajo ninguna muestra debido a que el material es parte del Coluvión, se observó un material poco consolidado con fragmentos de roca muy angulosos de tamaño variable (0.5 cm a 5 cm).

2.8. Sondeo eléctrico vertical (SEV)

Estos ensayos de exploración del subsuelo fueron desarrollados por parte del Instituto de Fomento Municipal en el año 2008. La ejecución del estudio geotécnico se debió a una serie de deslizamientos que ocurrieron en el municipio de La Unión luego del azote de tormentas inusuales en la región.

Para la realización de los sondeos eléctricos se realizó un reconocimiento a nivel local en los distintos sectores que componen el casco urbano del municipio, en esta evaluación se determinó la presencia de surgencias que según los habitantes han existido desde la fundación de la localidad.

La finalidad de los SEV fue determinar la distribución vertical de las resistividades aparentes en el punto evaluado, a partir de las medidas de diferencia de potencial en la superficie. De esta forma se realizaron los sondeos que determinaron las profundidades de los diferentes estratos, diferenciados a su vez por sus valores de resistividad aparente.

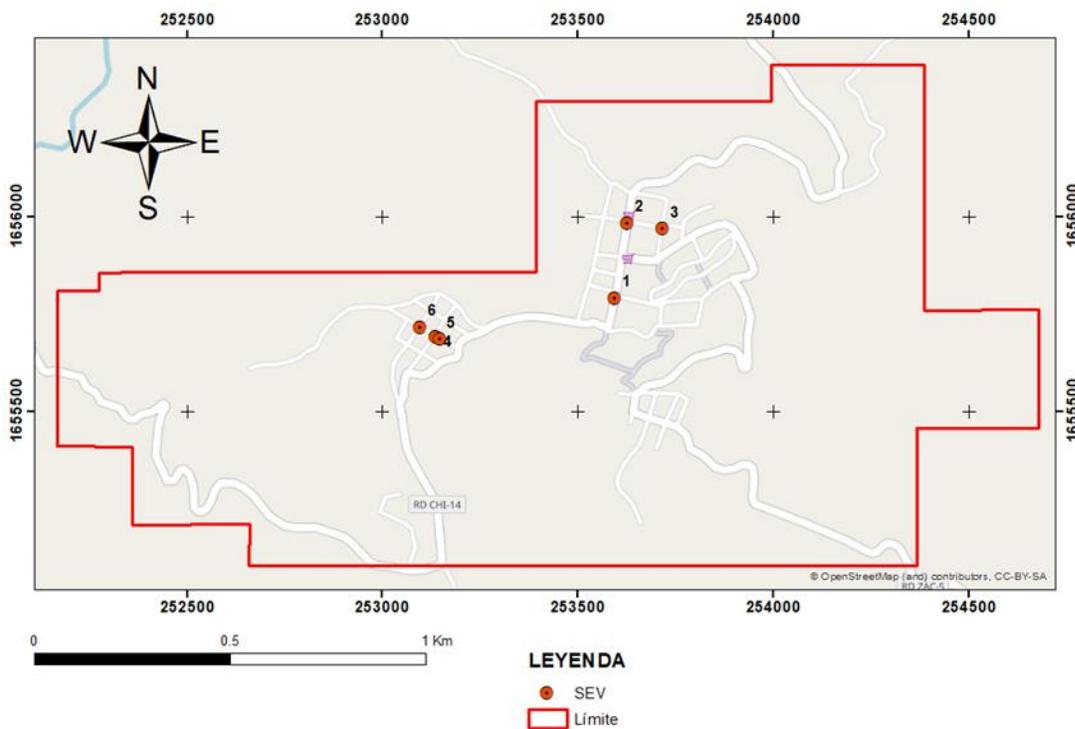
Cabe mencionar que la resistividad de las formaciones o estratos que yacen debajo de la superficie varían entre amplios límites, no sólo de una zona a otra, sino incluso dentro de una misma zona.

Estas características son parte de la conducción eléctrica de las rocas, debido a que los macizos rocosos y sus materiales cementantes poseen diferentes porosidades entre los granos más finos (intersticios) que normalmente

tienen un mayor o menor grado de sales disueltas que propician la conducción del voltaje inducido.

Como se indicó, en el estudio geofísico de INFOM (2008), se realizaron un total de 6 sondeos eléctricos verticales, utilizando el método de Schlumberger alcanzando profundidades en el subsuelo de hasta 15 metros. En el mapa de la figura 16 se indica la ubicación de estos ensayos de exploración geofísica.

Figura 16. **Mapa de sondeos eléctricos verticales**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

Para el arreglo Schlumberger se mantienen fijos los electrodos de potencial (MN), mientras los electrodos de corriente (AB) se alejan. De forma

regular este dispositivo es el más adecuado para la realización de sondeos, dada la facilidad de interpretación.

Los datos de cada SEV se indican en la tabla VII, entre ellos se indican las generalidades de ubicación y el alcance de profundidad alcanzada en el subsuelo. Con el conocimiento de la geología local del casco urbano se hizo una distinción de hasta 2 estratos en cada sondeo.

Tabla VII. **Datos de los sondeos eléctricos verticales**

No. SEV	Fecha de adquisición	Ubicación (Barrio)	WGS84 Z16 N		Profundidad aproximada	
			Este	Norte	Altitud (msnm)	(m)
1	1/08/2008	El Centro	253594.68	1655792.1	880.07	11.2
2	1/08/2008	El Centro	253626.64	16555984	868.89	15.8
3	31/07/2008	El Centro	253717.14	1655969.8	875.26	13
4	2/08/2008	Nuevo	253137.43	1655692.9	862.63	9.67
5	2/08/2008	Nuevo	253146.48	1655686.6	862.63	13.4
6	3/08/2008	Nuevo	253098	1655717	861.33	13.1

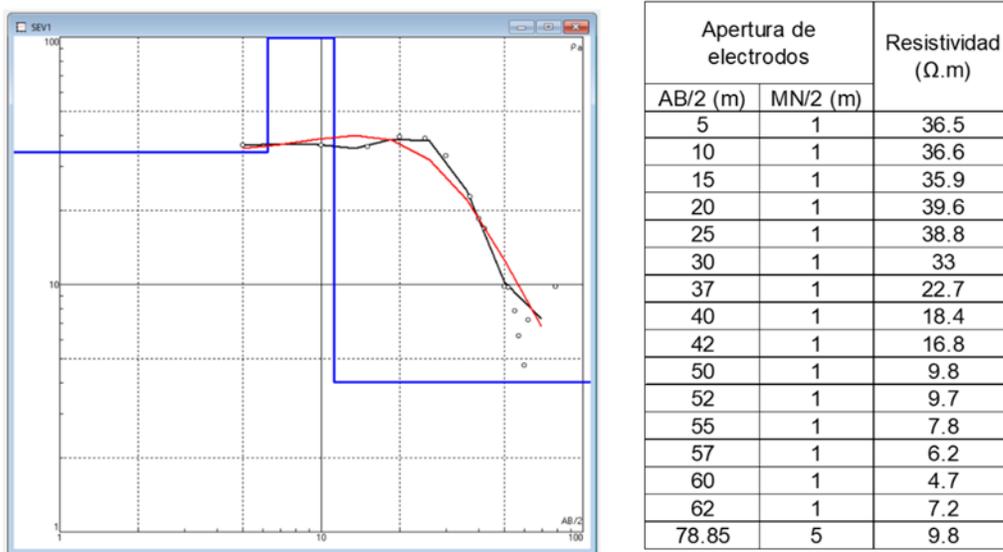
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Para la revisión de los sondeos eléctricos verticales se analizaron los datos obtenidos por el Instituto de Fomento Municipal (2008) utilizando el software IPI2WIN desarrollado por Alexey Bocache, de la Universidad Estatal de Moscú, Rusia.

El *software* IPI2WIN es de código abierto con una gran facilidad en la interfaz de usuario para ingresar datos obtenidos en campo, utilizando los distintos métodos y arreglos geofísicos.

En la figura 17 se puede observar el ejemplo del ajuste para el SEV1, la curva roja es la interpretada a partir de la curva de los datos de campo (color negro). La línea azul es el modelo geoestratigráfico que puede interpretarse como las capas o estratos del subsuelo explorado.

Figura 17. Ventana de ajuste, modelo y datos de campo de SEV1



Fuente: elaboración propia, empleando IPI2WIN.

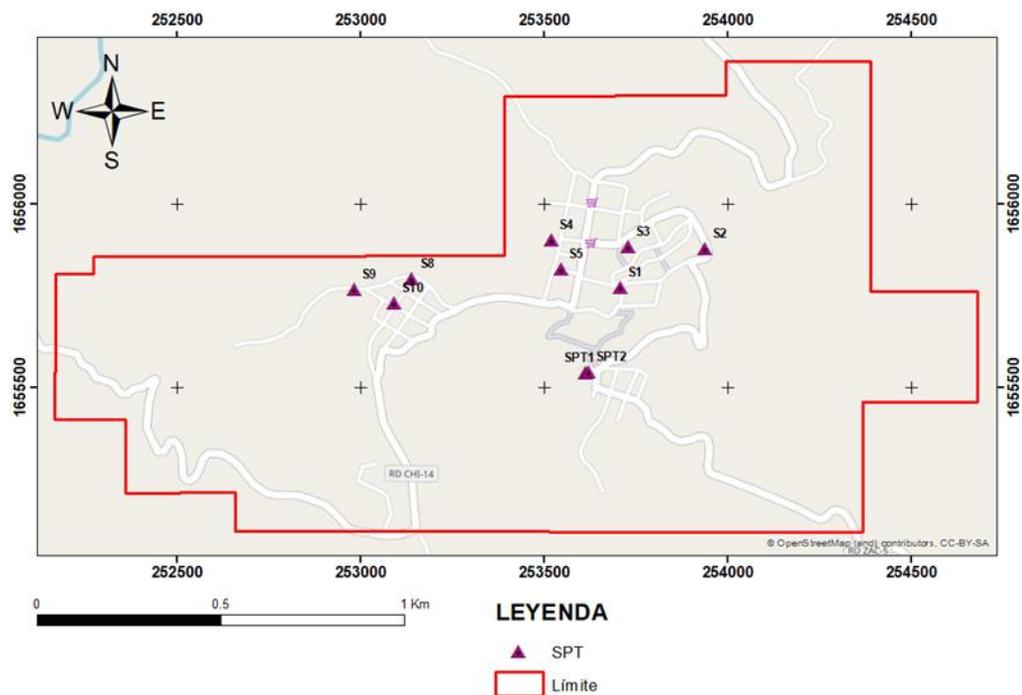
La relación de los datos adquiridos, la interpretación de las resistividades aparentes y el conocimiento de la geología local de las observaciones de campo durante la excavación de las calicatas, definieron los perfiles en el subsuelo que se presentan en el capítulo 3.

2.9. Sondeo de penetración estándar (SPT)

Los sondeos de penetración estándar forman parte de los estudios de exploración geotécnica de forma directa, con este procedimiento se obtuvieron muestras de suelos con el avance de la herramienta en el subsuelo.

De la revisión bibliográfica se ubicaron 10 SPT, ejecutados en la zona urbana del municipio. Estos ensayos fueron realizados con la finalidad de reconocer el sustrato para la realización de cimentaciones especiales y como parte de estudios de exploración geotécnica.

Figura 18. **Ubicación de sondeos de penetración estándar**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

En el mapa de la figura 18 se tiene la ubicación de los SPT, localizando los sondeos en la zona urbana, específicamente en el Barrio Centro y el Barrio Nuevo, así como en la parte alta de la zona (sur) en donde las condiciones geomorfológicas tienen una altitud mayor.

En la tabla VIII se tienen detalles de las perforaciones. En cada una de las perforaciones se alcanzaron entre 8 y 36 pies de profundidad.

Tabla VIII. **Datos de los sondeos de penetración estándar**

Nombre	Fecha de adquisición	Ubicación (Barrio)	WGS84 Z16 N		Altitud (msnm)	Profundidad (pies)
			Este	Norte		
SPT1	04/03/2006	El Centro	253612	1655538	1000	30
SPT2	10/07/2008	El Centro	253622	1655541	1005	30
S1	03/08/2008	El Centro	253709	1655773	956	30
S2	03/08/2008	El Centro	253938	1655879	955	08
S3	03/08/2008	El Centro	253730	1655882	929	14
S4	03/08/2008	El Centro	253520	1655902	890	26
S5	03/08/2008	El Centro	253546	1655823	912	28
S8	03/08/2008	Nuevo	253141	1655795	877	20
S9	03/08/2008	Nuevo	252984	1655767	861	36
S10	03/08/2008	Nuevo	253092	1655729	880	36

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

En ninguno de los sondeos se alcanzó el manto rocoso, perforando únicamente estratos de suelo; se obtuvieron muestras de este material, a las cuales se les realizaron ensayos de granulometría y plasticidad. El nivel freático no fue establecido en ninguno de los sondeos.

2.10. Ensayos de laboratorio

Los ensayos de laboratorio fueron utilizados para reconocer las características físicas del suelo. El tamaño de las partículas (granulometría) es diferente en cada estrato de suelo a partir de su génesis; así como la susceptibilidad al contenido de humedad de los materiales (plasticidad).

El reconocimiento del parámetro de densidad también fue determinado y nos indica la configuración de las partículas sólidas, agua y aire presentes en la muestra.

2.11. Granulometría y plasticidad

Los ensayos geotécnicos de granulometría y plasticidad permitieron definir los parámetros del suelo de acuerdo con normas y clasificaciones específicas, como es el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) con el cual se describieron las texturas y los tamaños de las partículas.

Las normas de la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales, por sus siglas en inglés (ASTM) indican los procedimientos estandarizados que unifican los resultados de los ensayos en las investigaciones científicas alrededor del mundo.

Las muestras evaluadas se indican en la tabla IX, se detallan las fechas de adquisición, ubicaciones y algunos otros datos relevantes.

Tabla IX. **Datos de las muestras con granulometría y plasticidad**

No. Muestra	Tipo de muestra	Fecha de adquisición	Ubicación (Barrio)	WGS84 Z16 N		Altitud (msnm)	Profundidad (m)
				Este	Norte		
1	Calicata	10/06/2021	El Centro	253606	1655964	872	2.45
2	Calicata	10/06/2021	El Centro	253606	1655964	872	3.40
3	Calicata	12/06/2021	El Centro	253678	1655944	888	0.85
4	Calicata	12/06/2021	El Centro	253678	1655944	888	1.90
5	Calicata	12/06/2021	Nuevo	253107	1655722	870	2.10
6	SPT	10/07/2008	El Centro	253622	1655541	1005	2.43
7	SPT	10/07/2008	El Centro	253622	1655541	1005	6.00
8	SPT	10/07/2008	El Centro	253622	1655541	1005	7.90
9	SPT	04/03/2006	El Centro	253612	1655538	1000	5.18
10	SPT	04/03/2006	El Centro	253612	1655538	1000	6.09

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

2.12. Densidad

Para la determinación de las partículas sólidas del suelo se realizó la determinación de la densidad. La realización de este ensayo tuvo la finalidad de identificar los suelos in situ y correlacionar los ensayos de exploración indirecta.

Por ser el coluvión la unidad geológica de mayor presencia en la zona de investigación y por sus características de ser un material removilizado (remanente), que visto en muestra de mano consta de un material con poca consolidación con fragmentos de roca de aristas angulosas.

Las muestras inalteradas se extrajeron de horizontes de suelo, que son producto del halo de meteorización del manto rocoso más profundo.

Tabla X. **Datos de las muestras con ensayo de densidad**

Nombre	Fecha de adquisición	Ubicación (Barrio)	WGS84 Z16 N		Altitud (msnm)	Alcance (m)
			Este	Norte		
1	10/06/2021	El Centro	253606	1655964	872	1.45
2	12/06/2021	El Centro	253678	1655944	888	0.85
3	12/06/2021	El Centro	253678	1655944	888	1.9
4	12/06/2021	Nuevo	253107	1655722	870	2.1

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

3. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

3.1. Distribución de suelos y sus propiedades geotécnicas

En los informes geotécnicos de las empresas de telecomunicaciones se delimitaron los estratos de suelo, mientras que un tercer estudio se evaluó la estabilidad por efecto de deslizamientos en el municipio.

De acuerdo con la caracterización de CP-Ingeniería de Materiales (2008), el sustrato del casco urbano y Barrio Nuevo son los elementos de mayor asentamiento poblacional.

Los suelos identificados mediante la realización de los ensayos de laboratorio fueron: arcillas, limos con arenas, limos arcillosos y arenas limosas. De esta forma se identificaron los estratos en el subsuelo y se midió la profundidad de cada uno.

En la tabla XI se tienen los resultados de las muestras obtenidas del SPT1 ejecutado por Servicios unificados de ingeniería en el 2006 que fue realizado al sur de la zona urbana, donde se realizó la exploración del subsuelo para la construcción de una antena de telefonía celular.

Tabla XI. **Datos geotécnicos SPT1**

Propiedades geotécnicas							
Estrato	Profundidad (pies)	Pasa tamiz 200 (%)	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Clasificación AASHTO	Clasificación SUCS
A	0 - 17	73	50	36	14	A-7-5	MH
B	17 - 20	25	36	28	8	A-2-4	SM
Características de los estratos							
A	Limo de alta plasticidad con arena (MH), suelo de partículas finas de color rojizo a amarillento.						
B	Arena limosa con grava (SM), suelo de partículas gruesas dispersas de color rojizo óxido.						

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Los ensayos de granulometría y plasticidad en el SPT2 arrojaron datos de suelos limosos y de arena arcillosa, se identificaron 3 estratos alcanzando hasta 26 pies de profundidad como se observa en la tabla XII.

La exploración directa del SPT2 guarda una relación directa con el SPT1, definiendo los mismos estratos de limo arcilloso y limos. Uno de los objetivos de Grupo Serex (2008) fue conocer los diferentes estratos de materiales, cumpliendo a cabalidad este propósito, realizando una caracterización de las propiedades geotécnicas.

Tabla XII. **Datos geotécnicos SPT2**

Propiedades geotécnicas							
Estrato	Profundidad (pies)	Pasa tamiz 200 (%)	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Clasificación AASHTO	Clasificación SUCS
A	0 - 8	35.62	28	20	8	A-4	SC
B	ago-20	94.23	49	36	13	A-7-5	ML
C	20-26	42.49	27	20	7	A-4	SC

Características de los estratos	
A	Arena arcillosa (SC), suelo de partículas gruesas con finos de color beige.
B	Limo de baja plasticidad (ML), suelo de partículas finas de color rojizo.
C	Arena arcilloso-limosa (SC), suelo de partículas gruesas con finos de color beige y rojizo.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

En las tablas XIII, XIV, XV se tienen los resultados de los ensayos de laboratorio de las calicatas realizadas en el casco urbano del municipio La Unión. Se identificaron estratos de suelo firme, así como suelos transportados.

En ninguna de las calicatas se alcanzó el nivel freático. Entre las ubicaciones de las excavaciones se pueden mencionar viviendas privadas y calles del casco urbano.

En la excavación de la calicata A, se identificó un suelo transportado sin cohesión que es posiblemente un material remanente del coluvión identificado en la zona. Luego se observó en el perfil dos unidades de arcilla con arena con diferencias únicamente en el color.

Los datos obtenidos de las muestras de laboratorio se muestran en la tabla XIII, este sondeo de exploración tuvo una profundidad final de 3.40 m. La continuidad en la excavación fue detenida por observar la continuidad del suelo y las condiciones de seguridad que disminuían con el avance, y podrían haber afectado la integridad del personal municipal.

Tabla XIII. **Datos geotécnicos calicata A**

Propiedades geotécnicas							
Estrato	Profundidad (m)	Pasa	Límite	Límite	Índice de	Clasificación	Clasificación
		tamiz 200 (%)	líquido	plástico	plasticidad	AASHTO	SUCS
A	0.00 - 2.35	80.37	36.50	23.60	12.90	A-6	CL
B	2.35 - 3.40	83.21	36.50	23.60	12.90	A-6	CL

Características de los estratos	
A	Arcilla de media plasticidad con arena (CL), suelo de partículas finas de color pardo-oscuro. Fragmentos dispersos de granito meteorizado III-IV, no mayores a 1 cm.
B	Arcilla de media plasticidad con arena (CL), suelo de partículas finas de color pardo-anaranjado, fragmentos muy esporádicos de roca.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Los datos de la calicata C se muestran en la tabla XIV, la toma de muestras se realizó en 2 estratos que fueron definidos como limos de baja plasticidad. Este sondeo tuvo una profundidad final de 3 m, el avance se dificultó por encontrar un material de poca humedad dificultando la excavación.

Tabla XIV. **Datos geotécnicos calicata C**

Propiedades geotécnicas							
Estrato	Profundidad (m)	Pasa tamiz 200 (%)	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Clasificación AASHTO	Clasificación SUCS
A	0 - 1.90	57.9	49	30.11	18.89	A-7-5	ML
B	1.90 – 3.00	88.5	35	24.34	10.66	A-6	ML
Características de los estratos							
A	Limo de baja plasticidad arenoso (ML), suelo de partículas finas y fragmentos dispersos de granito con meteorización II-III.						
B	Limo de baja plasticidad (ML), suelo de partículas finas y fragmentos de dispersos de granito con meteorización II-IV con un tamaño desde 5 a 2 cm.						

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

La calicata D fue realizada sobre un acceso vial del Barrio Nuevo, un primer estrato de suelo fue identificado hasta 1.90 m de profundidad, luego se extrajo la primera muestra inalterada a 2.10 m. El suelo identificado es un limo de baja plasticidad con arena, en la tabla XV se tienen los parámetros de granulometría y plasticidad de los ensayos realizados.

Tabla XV. **Datos geotécnicos calicata D**

Propiedades geotécnicas							
Estrato	Profundidad (m)	Pasa tamiz 200 (%)	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Clasificación AASHTO	Clasificación SUCS
A	1.90 - 2.10	82.42	39.60	27.25	12.35	A-6	ML
Características de los estratos							
A	Limo de baja plasticidad con arena (ML), suelo de partículas finas de coloración rojiza.						

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

Luego del análisis de los resultados de los 10 ensayos SPT realizados por CP-Ingeniería de Materiales (2008) dentro de la zona delimitada en esta investigación, se obtuvieron datos que permitieron hacer una caracterización del sustrato, dividida de forma generalizada en dos partes, una que corresponde a Barrio El Centro y la otra a Barrio Nuevo.

Los sondeos de penetración estándar alcanzaron una profundidad de 11 m, que desde un punto de vista geotécnico fueron lo apropiado.

El sustrato de Barrio El Centro (tabla XVI) está constituido por tres capas con una forma irregular, de amplia extensión y un espesor variable. Para mostrar los resultados la consultora CP-Ingeniería de Materiales (2008) realizó una descripción de cada unidad de suelo, así como una columna estratigráfica geotécnica.

Tabla XVI. **Sustrato de Barrio El Centro**

Unidad	Descripción	Columna estratigráfica geotécnica
Suelo transportado	<p>Es la más somera, con un espesor de 1 m a 2.5 m está formada por un suelo limoso de alta plasticidad, arenoso s(MH), de color café rojizo. Es de consistencia media, tiene un LL = 60.4%, con IP = 24.96 % y una humedad que oscila entre 17 al 27 %.</p> <p>La capacidad soporta es de 7.2 - 7.5 T/m² para un asentamiento de 2.5 cm con un Factor de Seguridad: 3.</p>	
Suelo arenoso	<p>Representa un horizonte uniformizado, con un espesor de 1 m a 3 m, está formado por un suelo arenoso de color gris. Es una arena de grano medio y consistencia media, con un contenido de humedad de 10- 26 %.</p>	
Suelo detrítico	<p>Se encuentra en la base de la columna estratigráfica geotécnica, es de amplia extensión lateral y espesor no determinado; está formada por grava media a gruesa, en una matriz arenosa a areno-limosa, plástica de color rojizo, es de consistencia media a alta, con un contenido de humedad de 20 %.</p> <p>La capacidad soporta es de 20.0- 21.2 T/m² con un asentamiento de 2.5 cm y un Factor de seguridad de 3.</p>	

LEYENDA

- Suelo transportado
- Suelo arenoso
- Suelo detrítico

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

De forma muy similar para el caso del sustrato identificado en Barrio Nuevo, se encuentra formado por tres unidades geotécnicas, siendo estas la Unidad de Suelo Transportado, Unidad de Suelo detrítico y la Unidad de Roca Alterada (CP-Ingeniería de Materiales, 2008).

En la tabla XVII se hace una tabla-resumen de las propiedades de estas unidades, así como la columna estratigráfica geotécnica del sector de Barrio Nuevo, al W de la zona de estudio.

Tabla XVII. **Sustrato de Barrio Nuevo**

Unidad	Descripción	Columna estratigráfica geotécnica
Suelo transportado	<p>Es la más superficial, sosteniendo la mayoría de las cimentaciones del sector, está formada por un limo de alta plasticidad, con arena (MH)s de color café rojizo. De consistencia medianamente firme con un LL = 65.4 %, IP = 29.1 %, La humedad varía hasta un 21 %.</p> <p>La capacidad soporte es de 7.2 - 7.5 T/m² para un asentamiento de 2.5 cm con un Factor de seguridad de 3.</p>	<p>0.0 m — 2.5 m — 6.0 m — 11 m —</p> <p>LEYENDA</p> <ul style="list-style-type: none"> Suelo transportado Suelo detrítico Roca alterada
Suelo detrítico	<p>Es de forma irregular, de amplia extensión lateral y espesor, esta unidad está formada por un suelo gravo-arenoso, de color café rojizo a café. Es de consistencia suelta a densa con contenido de humedad de 20 a 30 %.</p> <p>La capacidad soporte es de 20.0 - 21.2 T/m² con un asentamiento de 2.5 cm y un Factor de seguridad de 3.</p>	
Roca alterada	<p>Consiste en una roca completamente meteorizada, probable gneis de color café, con tonalidades a verde moteada. El suelo derivado es limoso de alta plasticidad con arena. La plasticidad es con un LL = 51.5 %, con IP = 19.78 % con una humedad de 50 %.</p>	

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

3.2. Exploración geofísica del subsuelo de la zona urbana

Los datos obtenidos de los sondeos eléctricos verticales fueron analizados en el software IPI2WIN. La adquisición de los datos se realizó por parte del INFOM con el apoyo de un investigador de aguas subterráneas y técnicos auxiliares.

En la tabla XVIII se indican los datos generales de los SEV, entre los que destacan la separación de los electrodos A, B que indican el espaciamiento inter-electrónico y que sirven en el arreglo como los electrodos de corriente.

Tabla XVIII. Datos de campo de los SEV

No. SEV	Ubicación (Barrio)	Altitud (msnm)	AB/2 (m)	Profundidad (m)	Nivel freático (m)
1	El Centro	880.07	78.85	52	6.22
2	El Centro	868.89	61	40	3.19
3	El Centro	875.26	78.85	52	9.13
4	Nuevo	862.63	52	35	3.6
5	Nuevo	862.63	70	47	2.5
6	Nuevo	861.33	70	47	4.17

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

La interpretación se hizo relacionando las curvas del modelo geoestratigráfico, la curva interpretada y los datos de campo de INFOM de cada punto evaluado en el casco urbano.

Las interpretaciones de los seis sondeos eléctricos verticales se presentan a continuación y se han representado en las figuras 19 a la 24. En cada figura se

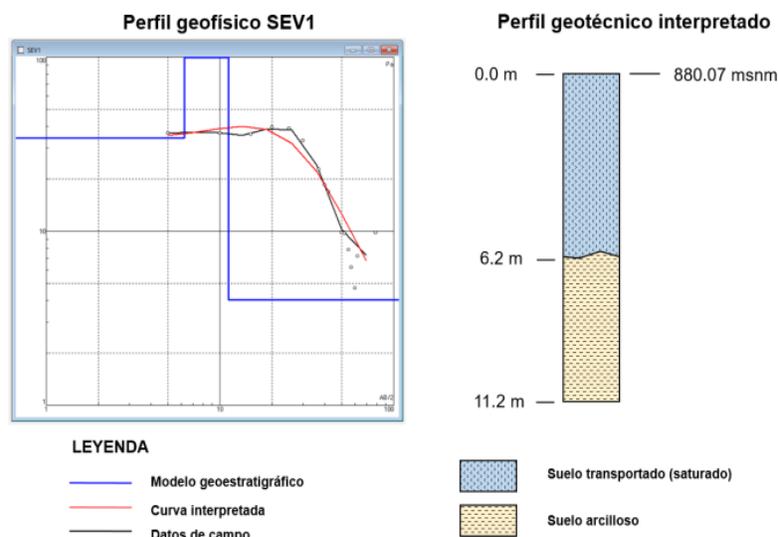
muestran los datos analizados en IPI2WIN y el perfil geológico interpretado a partir de los datos obtenidos.

Existe una relación entre los sondeos 1, 2 y 3 (Barrio El Centro) y los sondeos 4, 5 y 6 (Barrio Nuevo) debido a que en estos dos grupos los sondeos están agrupados por sectores.

En el SEV1 se encontraron dos estratos de materiales con diferente resistividad ante la diferencia de potencial inducido, como se puede apreciar en la figura 19. El primero tiene una profundidad aproximada de 6.2 m con un valor de $30.92 \Omega.m$, que posiblemente es un suelo transportado con una saturación alta.

El segundo estrato es un material arcilloso con un valor promedio de resistividad de $7.88 \Omega.m$, este fue interpretado hasta una profundidad de 11.2 m.

Figura 19. Interpretación del SEV1

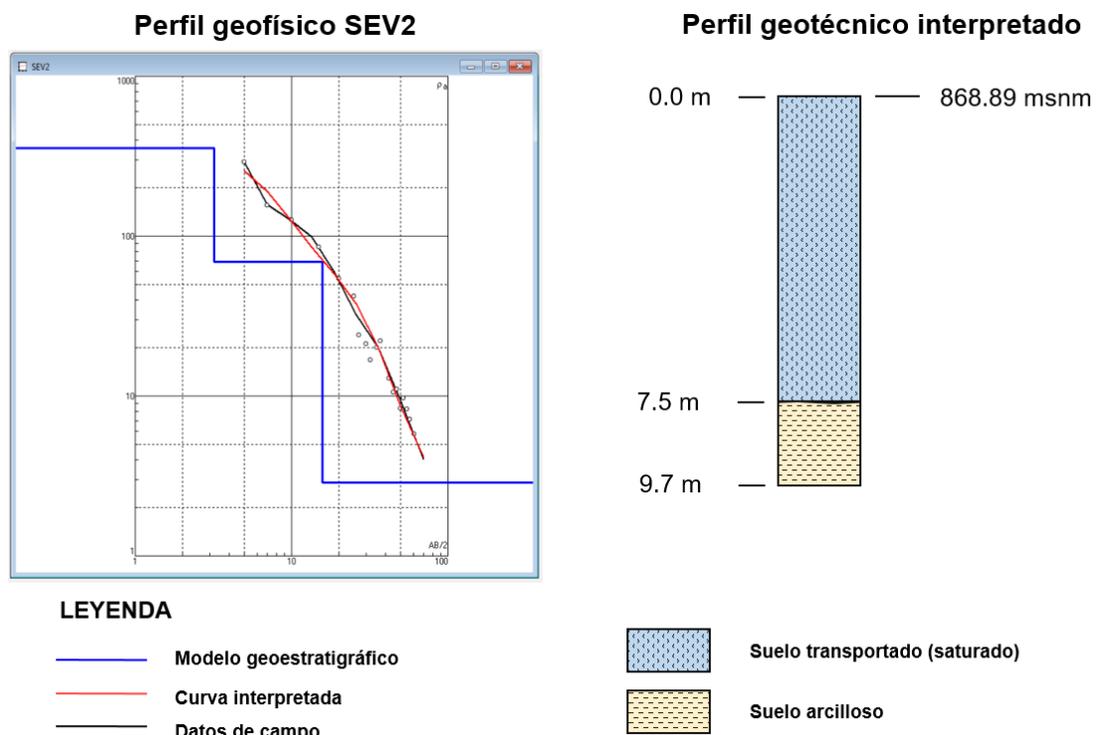


Fuente: elaboración propia, empleando IPI2WIN.

En la interpretación del SEV2 se definieron dos estratos, el primero con un valor promedio de resistividad de $56.75 \Omega.m$, así como un segundo estrato con una media de $9.21 \Omega.m$ como se muestra en la figura 20.

Este sondeo es similar a la geotecnia definida en el SEV1, con diferencias únicamente en los espesores de los estratos. La relación entre ellos es con una orientación N-S.

Figura 20. Interpretación del SEV2



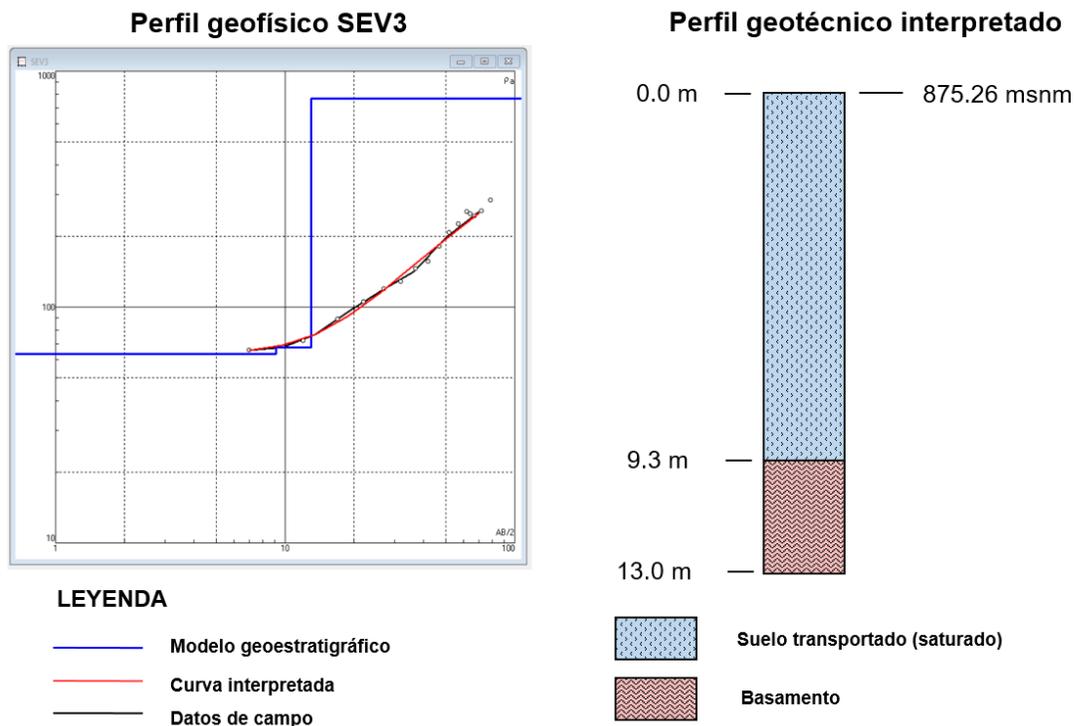
Fuente: elaboración propia, empleando IPI2WIN.

Con la interpretación de los datos del SEV3, personal a cargo del informe final del INFOM indicaron haber explorado el basamento de la zona urbanizada

(figura 21). Se definieron dos estratos con resistividades con una media de 109.95 Ω .m y 236.87 Ω .m respectivamente.

La variación de la resistividad respecto a todos los sondeos, efectivamente difieren en la unidad de basamento identificada. La ubicación del sondeo es en la zona este del Barrio El Centro.

Figura 21. Interpretación del SEV3

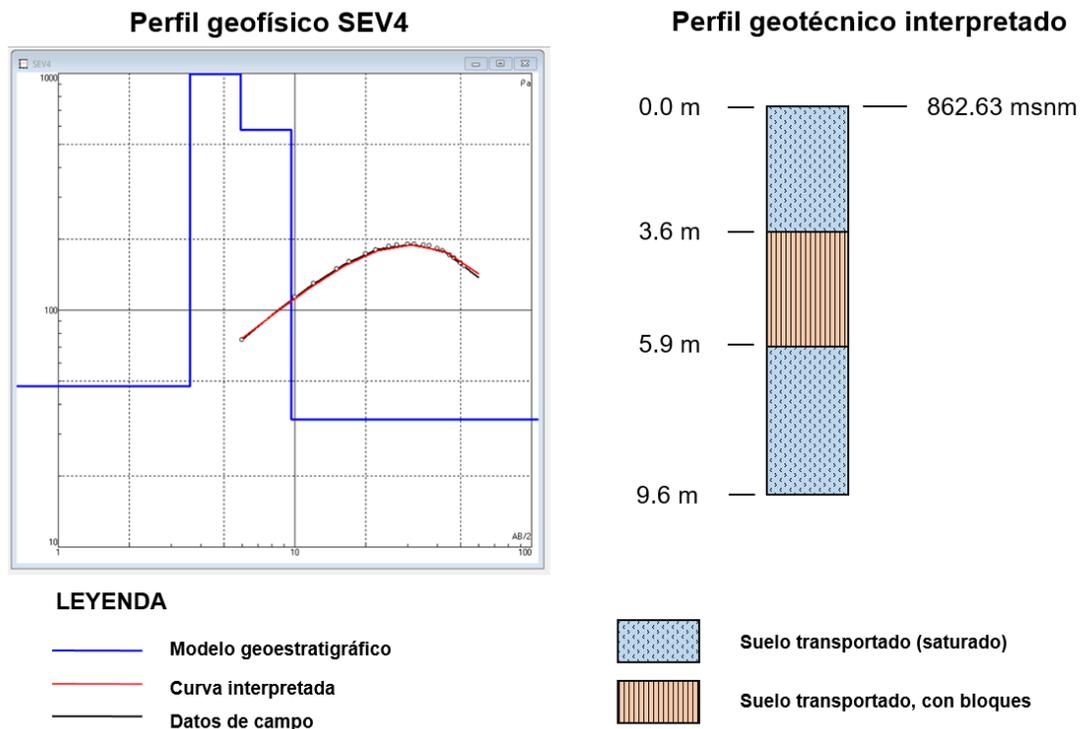


Fuente: elaboración propia, empleando IPI2WIN.

En el caso de la interpretación del SEV4 se identificaron tres estratos de materiales con valores promedios de resistividad, que son en orden de profundidad son los siguientes: el primero de 110.62 Ω .m, un segundo estrato de 288.08 Ω .m y el tercero de 133.98 Ω .m.

En el perfil geológico de la figura 22 se puede observar los estratos identificados, en la zona central de la columna geotécnica se tiene un estrato con material arcilloso y fragmentos rocosos de mucha variación resistiva que puede ser atribuida a bloques de roca con un suelo variable (unidad de suelo transportado).

Figura 22. Interpretación del SEV4

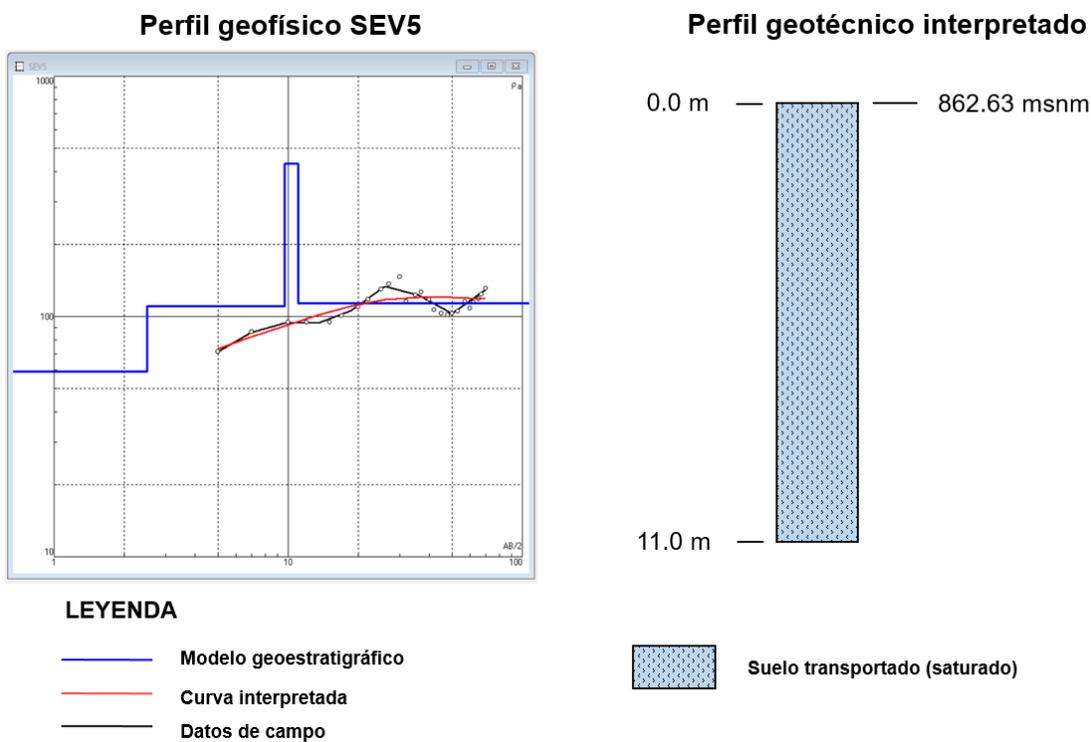


Fuente: elaboración propia, empleando IPI2WIN.

El sondeo eléctrico SEV5 muestra un comportamiento uniformizado, compuesto por un estrato de resistividad promedio de unos 111.18 Ω .m.

Analizando los datos de campo del SEV5 no muestra variación en la exploración subsuperficial (figura 23). Esta es una zona compuesta de suelo transportado, con una saturación alta. La ubicación del sondeo es en la zona centro del Barrio Nuevo.

Figura 23. Interpretación del SEV5

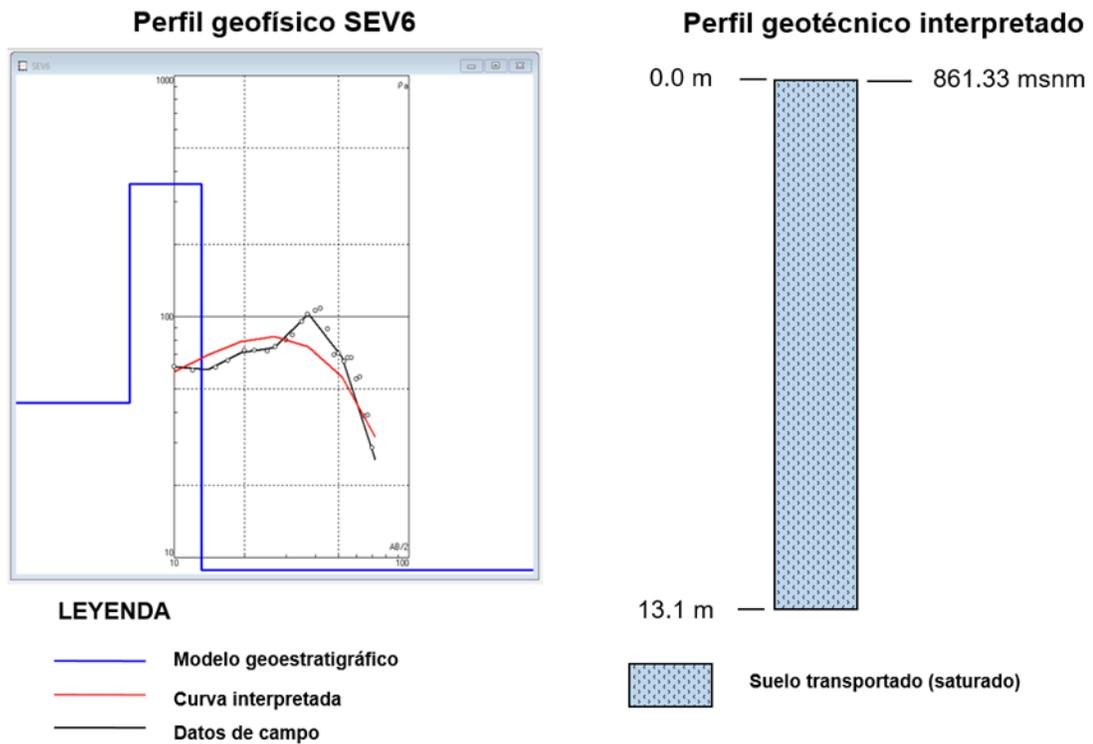


Fuente: elaboración propia, empleando IPI2WIN.

De forma similar al sondeo número 5, el sondeo SEV6 muestra una zona uniformizada de estrato con un valor promedio de resistividad de 70.41 Ω .m este suelo transportado alcanza hasta los 13.10 m aproximadamente, como se muestra en la figura 24.

Los sondeos SEV4, SEV5 y SEV6 fueron dispuestos con una orientación NW-SE en el sector de Barrio Nuevo.

Figura 24. Interpretación del SEV6

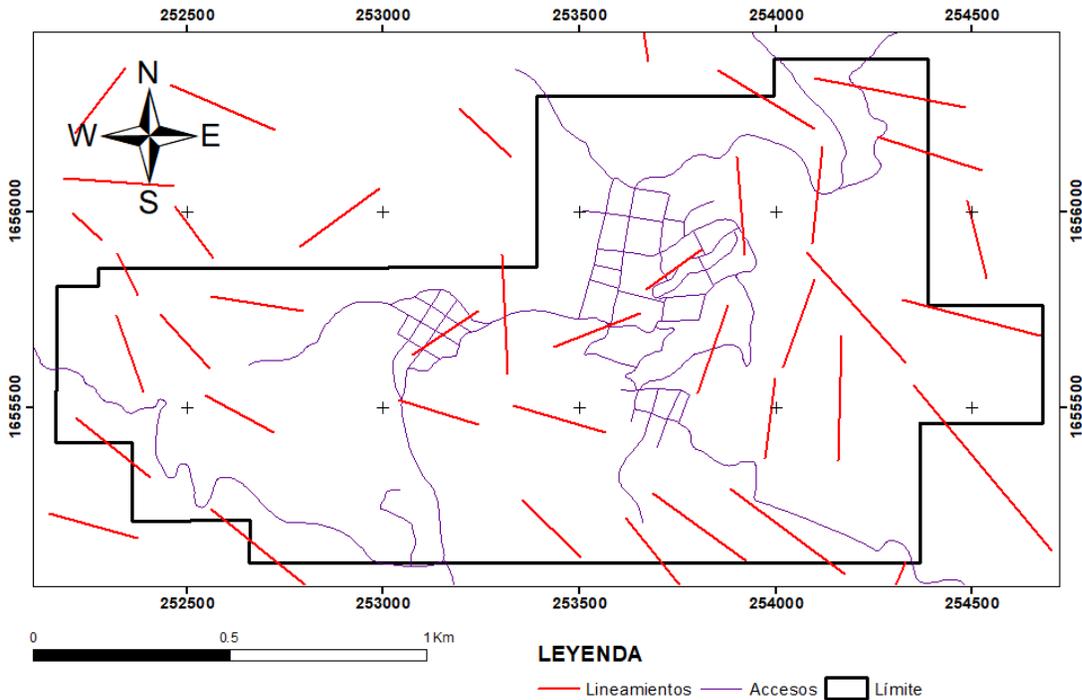


Fuente: elaboración propia, empleando IPI2WIN.

3.3. Lineamientos

Con el análisis de imágenes de satélite y modelos de elevación digital generados a partir de curvas de nivel se realizó el cartografiado de los lineamientos estructurales (figura 25), estos elementos geológicos muestran una tendencia lineal de un origen geométrico que tienen una relación directa con la tectónica regional que es de tipo sinistral.

Figura 25. Mapa de lineamientos estructurales



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

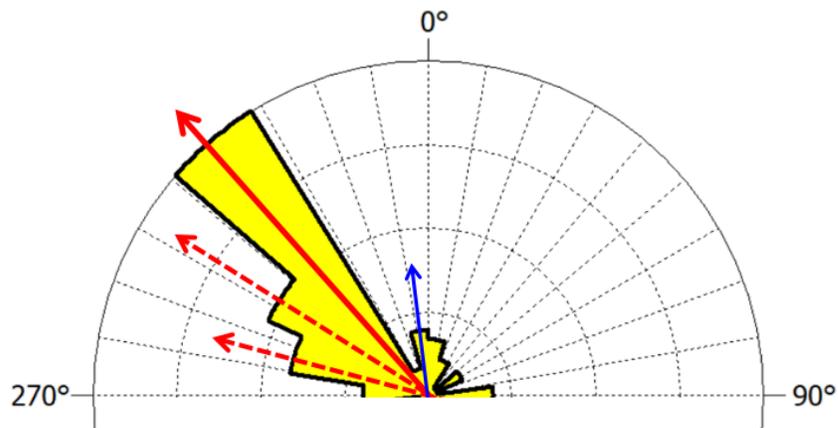
Los patrones estructurales cartografiados poseen en términos generales una dirección con tendencia principal $N319^\circ$, esto se afina con la roseta de rumbos para lineamientos. Estos rasgos morfo-estructurales pueden corresponder a patrones de fracturamiento o foliación, que afecten a las unidades de Granito o Filita respectivamente.

A partir de este análisis se elaboró una roseta de rumbos para hacer el procesamiento estadístico de los datos de las lineaciones (figura 26), donde se muestran las orientaciones preferenciales de estos rasgos estructurales (flechas de color rojo y azul).

El comportamiento es trimodal, con una moda dominante y dos tendencias subsecuentes por orden de ponderación. Asimismo, se considera una cuarta tendencia que es de tipo regional N-S

La moda principal se orienta N319-139, la segunda de N303-123 y una tercera de N286-106. La moda secundaria se muestra con una orientación preferencial de N354-174.

Figura 26. **Roseta de rumbos para lineamientos**



Fuente: elaboración propia, empleando RockScience.

3.4. Geomorfología

La geomorfología de la zona de estudio ha sido producto de procesos erosivos ligados a las condiciones geológicas, atmosféricas y tectónicas. El casco urbano está localizado en una zona de pendiente con orientación al sur del sector (figura 27).

De acuerdo con Rivera (2005) la zona urbanizada “es posible que sea producto de un deslizamiento muy antiguo y que esta sea la zona de

acumulación” (p. 2). Esta afirmación se puede evidenciar en la figura 27, en donde la zona urbana se encuentra asentada en las laderas del Cerro Pelón. La toma de la fotografía fue con vistas al noroeste.

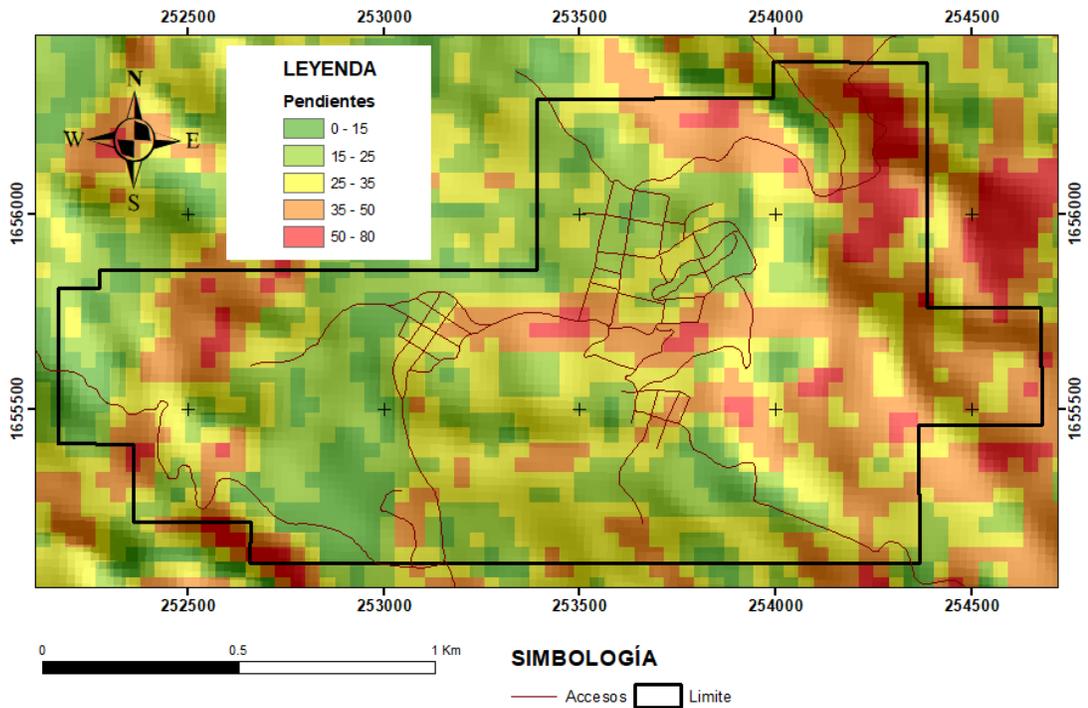
Figura 27. **Fotografía panorámica del casco urbano**



Fuente: [Fotografía de Marlon Joaquín Coy Figueroa]. (La Unión, Zacapa. 2018). Colección particular. Guatemala.

Como se puede observar en la figura 28 se muestra el mapa de pendientes, geomorfológicamente la zona cuenta con pendientes que oscilan de 0 ° a 80 °. Las pendientes más bajas se representan con pixeles de color verdoso y las más abruptas de color naranja-rojo.

Figura 28. Mapa de pendientes



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

En la figura 29 se pueden observar los asentamientos diferenciales (grietas) dentro de la zona urbana. En la figura (superior) se observa la subsidencia en el medio de la calle. Las flechas de color rojo muestran la dirección del movimiento.

La serie de grietas en la gasolinera del municipio, figura 29 (inferior) son particulares en el Barrio Nuevo, en esta obra civil se han realizado una serie de reparaciones debido a los movimientos rotacionales que han sido mitigados con muros de contención.

Figura 29. **Fotografías de las grietas y subsidencias diferenciales**



Fuente: [Fotografía de Marlon Joaquín Coy Figueroa]. (La Unión, Zacapa. 2018). Colección particular. Guatemala.

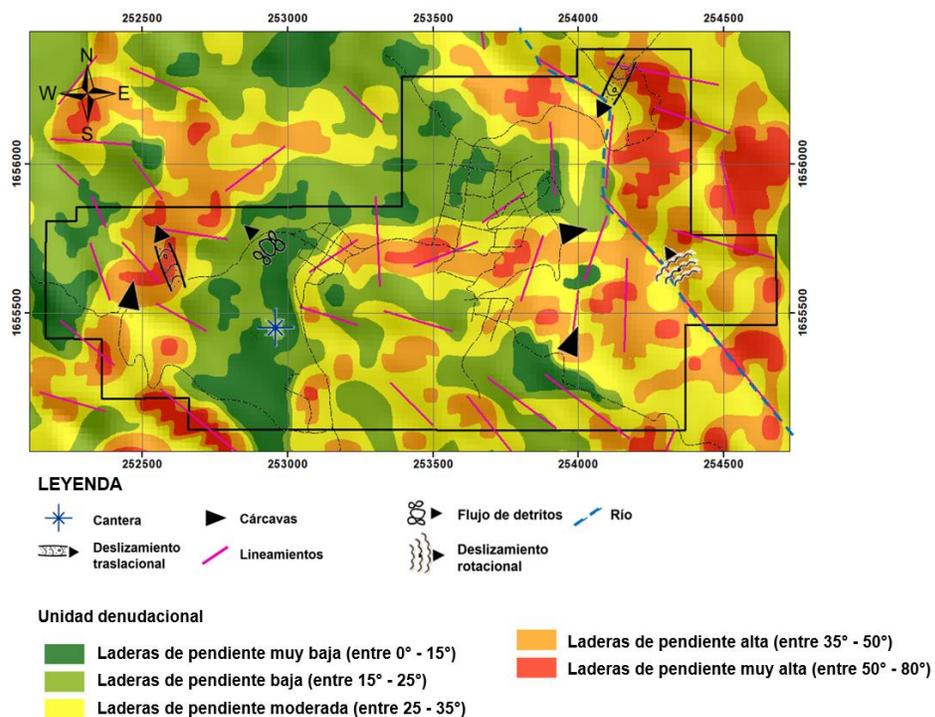
Mediante el análisis de imágenes de satélite se identificaron los lineamientos estructurales, estos elementos geológicos muestran una tendencia lineal de un origen geométrico que tiene una relación directa con la tectónica de la región.

En el mapa geomorfológico de la figura 30 se representan los principales elementos de origen denudacional (producto de procesos erosivos). Este mapa fue elaborado tomando como base la publicación de Salguero (2015).

Debido a las condiciones locales, los principales elementos geomorfológicos en la zona de investigación son las cimas, crestas, laderas, deslizamientos (de tipo traslacional, rotacional y flujo de detritos), surcos y cárcavas.

Las laderas poseen pendientes con un rango de entre 0° y 80° de inclinación como se pueden observar en la figura 30, asociando la inclinación con los colores de acuerdo con esta condición (verde a rojo).

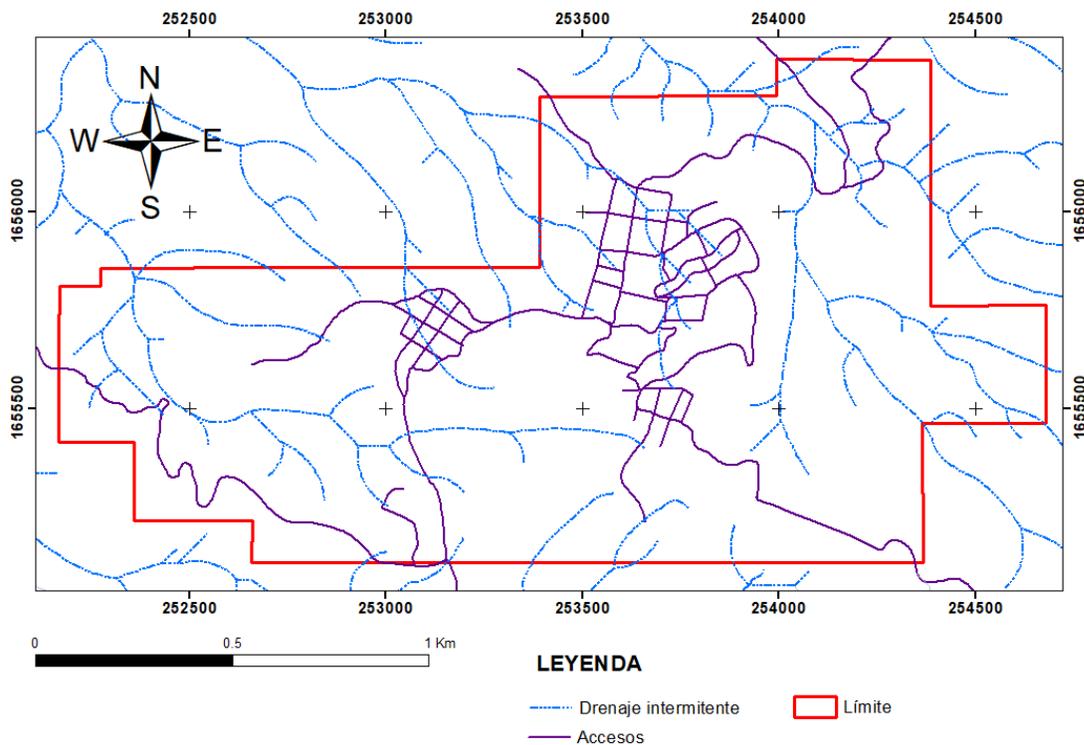
Figura 30. **Mapa geomorfológico**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

La red de drenaje en el municipio La Unión es evidenciada en el mapa de la figura 31. Al norte el drenaje es con dirección NE al NW, más al sur es con dirección N-S.

Figura 31. **Mapa de la red de drenaje**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

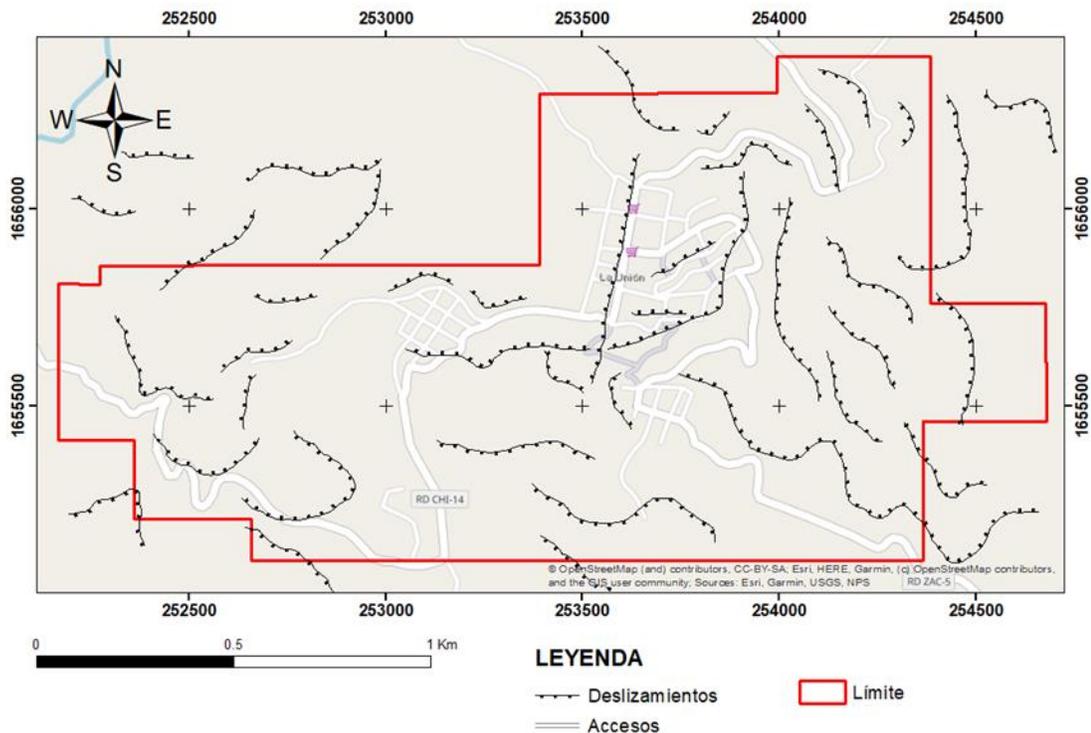
El análisis de las corrientes efímeras (líneas azules punteadas) se realizó mediante la revisión de curvas topográficas.

Los lineamientos estructurales han sido muy importantes en la identificación de subsidencias y asentamientos diferenciales debido a que delimitan espacialmente la zona abarcada.

Para la elaboración del mapa de la figura 32 se hizo una interpretación de los deslizamientos mapeados en la fase de campo, la relación con las pendientes y los lineamientos estructurales. Posterior a este análisis se digitalizaron las trazas de las coronas de los deslizamientos utilizando SIG.

Las coronas de los deslizamientos son representadas por una línea (punteada del lado del asentamiento) mostrando de esta forma la dirección del movimiento. En el mapa se identificaron los movimientos gravitacionales, que en algunos casos las trazas de las coronas alcanzan más de 1 kilómetro lineal.

Figura 32. **Mapa de coronas de deslizamientos**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Relación de calicatas-SEV

Los sondeos de exploración geofísica definieron una zona de suelo transportado, arcillas y con bloques, así como el basamento local de la zona de estudio de acuerdo con los cambios en las resistividades obtenidas. La identificación de estratos de suelos mediante la exploración de calicatas determinó la existencia de suelos arcillosos, limos y la unidad geotécnica de suelo transportado.

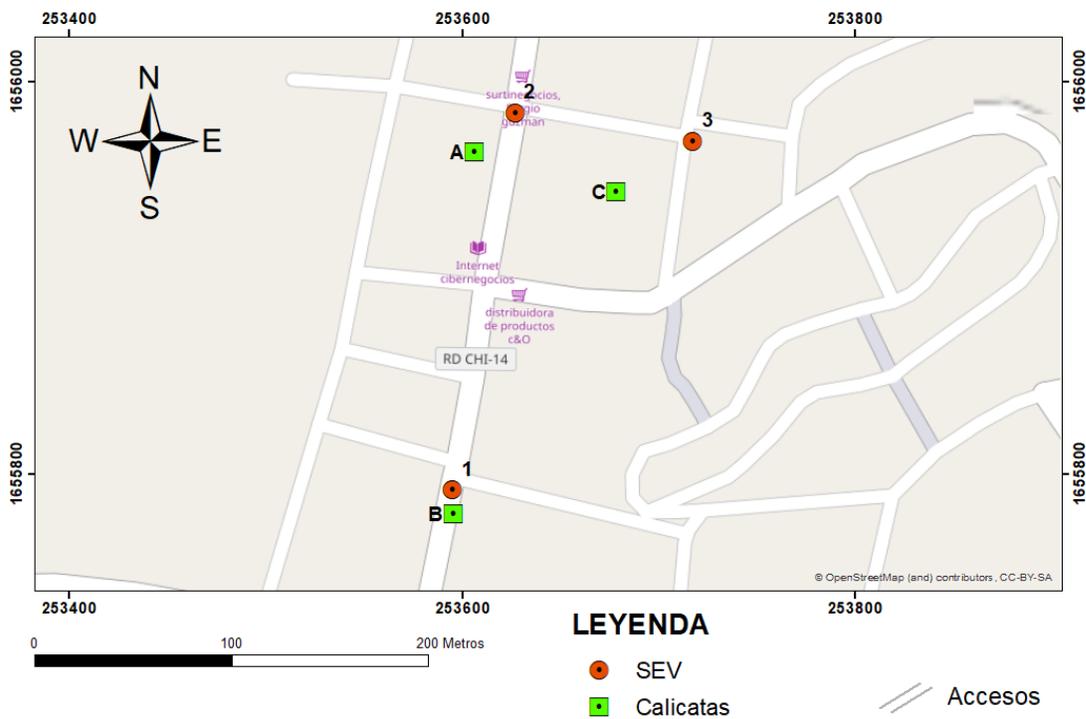
En la calicata A se identificó un suelo arcilloso de media plasticidad con arena (CL) hasta alcanzar una profundidad de 3.40 m. Mientras que el SEV2 lo identificó hasta una profundidad de 7.5 m.

En el caso de la calicata C se identificó un limo de baja plasticidad (ML) llegando hasta los 3 m. Durante esta excavación en muestra de mano se observó un limo con fragmentos de roca foliados, con una meteorización de grado II-III. La relación con el SEV3 por su cercanía permitió definir en este sector el basamento del casco urbano (unidad de filita).

La calicata D fue realizada en Barrio Nuevo, con dos estratos, el primero que es la unidad geotécnica de suelo transportado, y una segunda de limo de baja plasticidad con arena (ML). Mientras que el SEV6 mediante la interpretación geológica de los resultados de campo indican una profundidad de 13 m aproximadamente del suelo transportado.

En el mapa de la figura 33 se puede observar la ubicación de las calicatas A, B y C, de la misma manera con los sondeos eléctricos verticales realizados en la zona urbana (Barrio El Centro). La cercanía de ambos sondeos no excede la distancia de 25 metros entre cada ensayo.

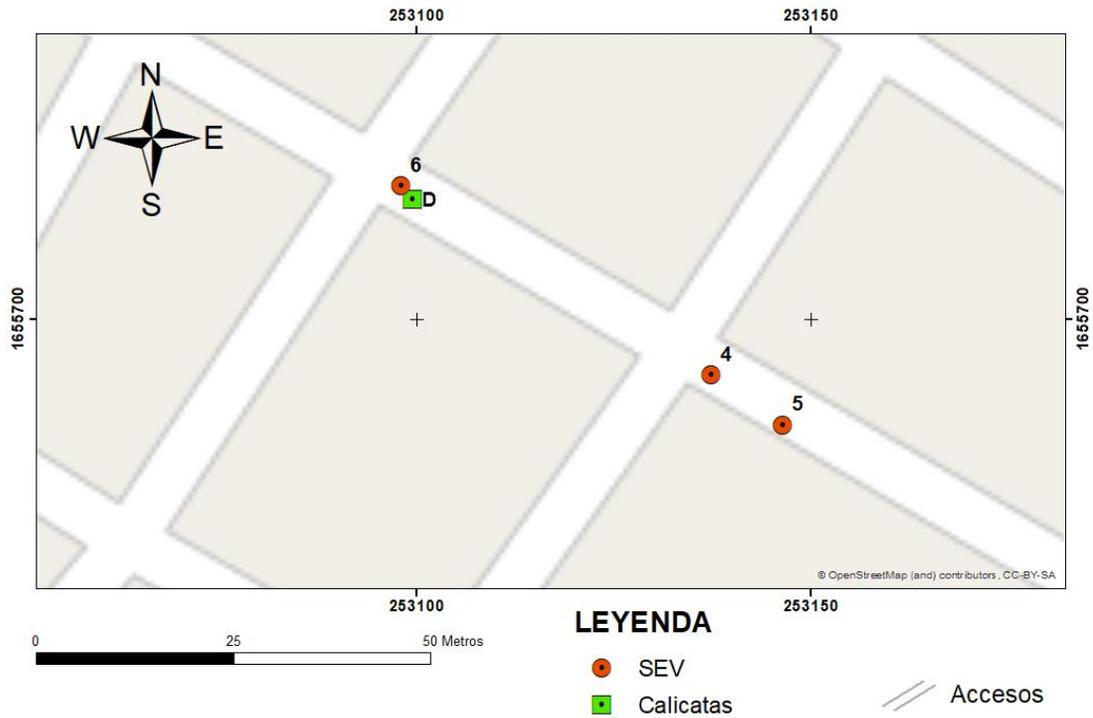
Figura 33. Localización de sondeos en Barrio El Centro



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

En la figura 34 únicamente se tiene la ubicación de la calicata C, realizada en Barrio Nuevo. Este sondeo fue correlacionado con el SEV6.

Figura 34. Localización de sondeos en Barrio Nuevo



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

4.2. Resultados SPT

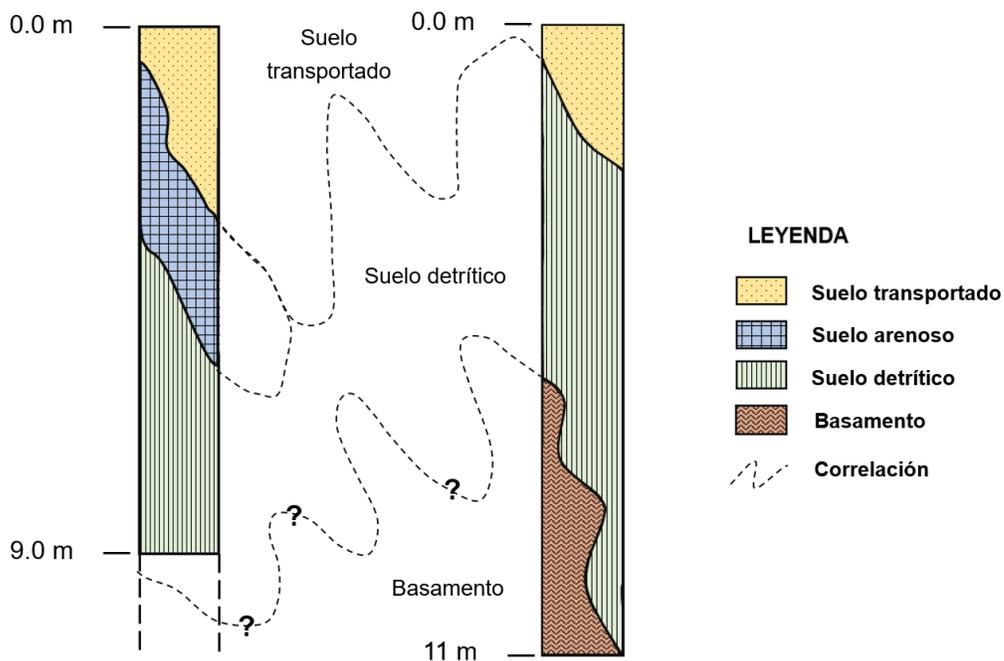
Los suelos identificados por CP-Ingeniería de Materiales (2008), son tres unidades geotécnicas denominadas: Suelo transportado, Suelo arenoso, Suelo detrítico y Roca alterada.

El suelo transportado ha sido identificado en la unidad litológica de coluvión, producido por este material que no se encuentra in situ, es el más somero con una profundidad que llega hasta los 2.5 m de profundidad. El suelo

arenoso se identificó de forma uniformizada en el sustrato de Barrio El Centro, en los sondeos ejecutados en Barrio Nuevo no fue definido.

La unidad de suelo detrítico se encuentra en la base de la columna estratigráfica geotécnica, es de amplia extensión lateral y espesor no determinado. En la figura 35 se puede observar la correlación de estas unidades geotécnicas al piso de la correlación.

Figura 35. **Correlación de SPT**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft PowerPoint.

El basamento (unidad de filita) fue identificada en los sondeos de Barrio Nuevo, la profundidad estimada fue a partir de 6.0 metros sin ser identificada en los sondeos de Barrio El Centro.

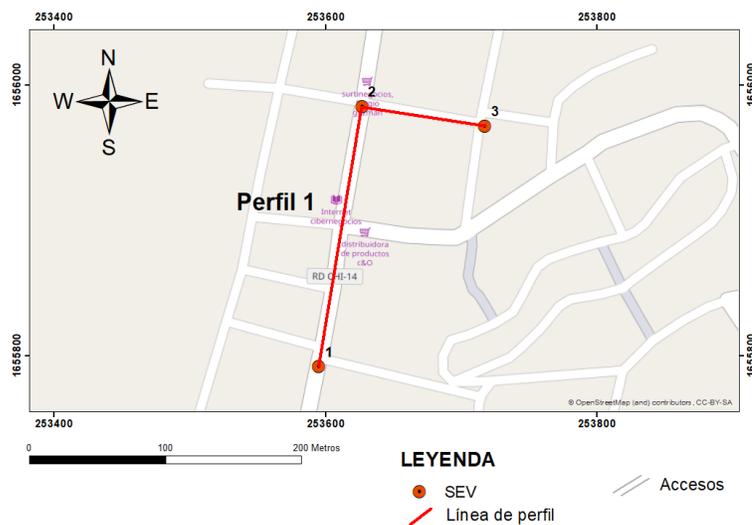
La profundidad del basamento en el sector de Barrio El Centro es incierto, es probable que se encuentre a una profundidad más allá de los 15 metros, por la geomorfología del lugar.

4.3. Correlaciones SEV

En la figura 36 y figura 38 se pueden observar las ubicaciones de los 6 sondeos eléctricos verticales, así como la localización de los perfiles 1 y 2 respectivamente.

En el caso del perfil 1 (figura 36), localizado en el Barrio El Centro se tiene una orientación S-N. Para este perfil se tiene una distancia lineal de ± 280 m.

Figura 36. Perfil 1, Barrio El Centro

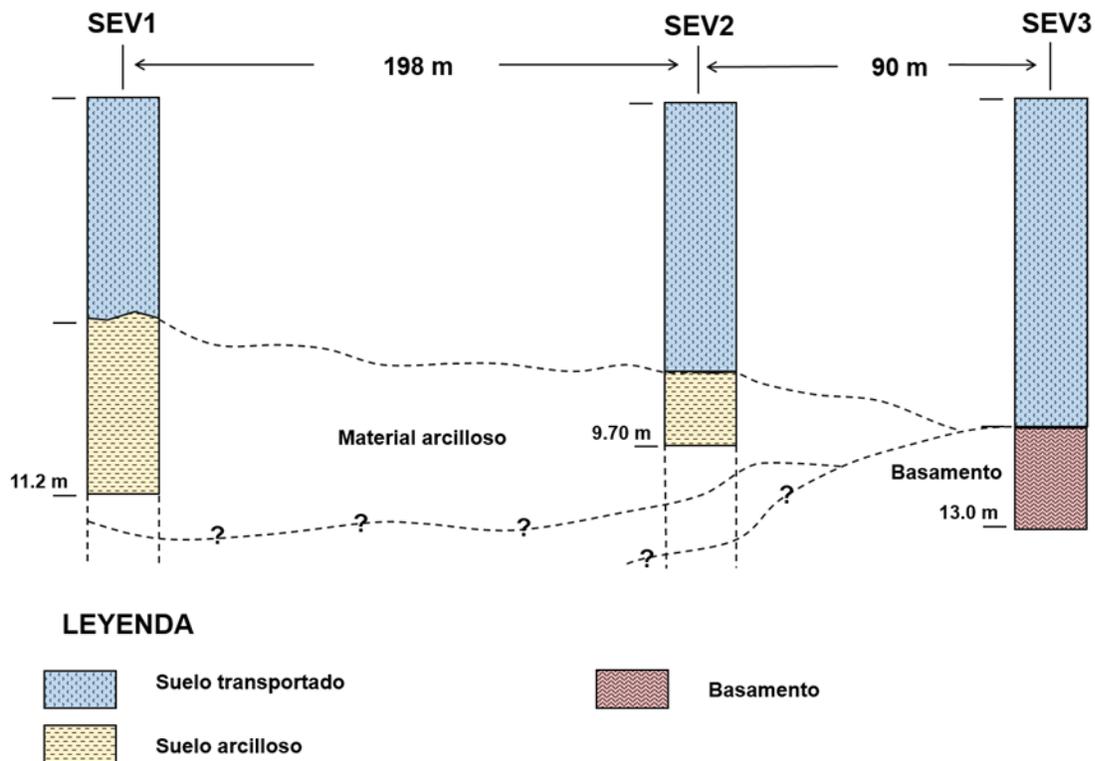


Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

La correlación estratigráfica del perfil 1 (figura 37), muestra una relación entre la zona de suelo transportado y la unidad de suelo arcilloso subyacente.

El basamento identificado en el sondeo SEV3, no fue establecido en los sondeos SEV1 y SEV 2, debido a esto se hizo una proyección probable entre los sondeos sin definir su profundidad.

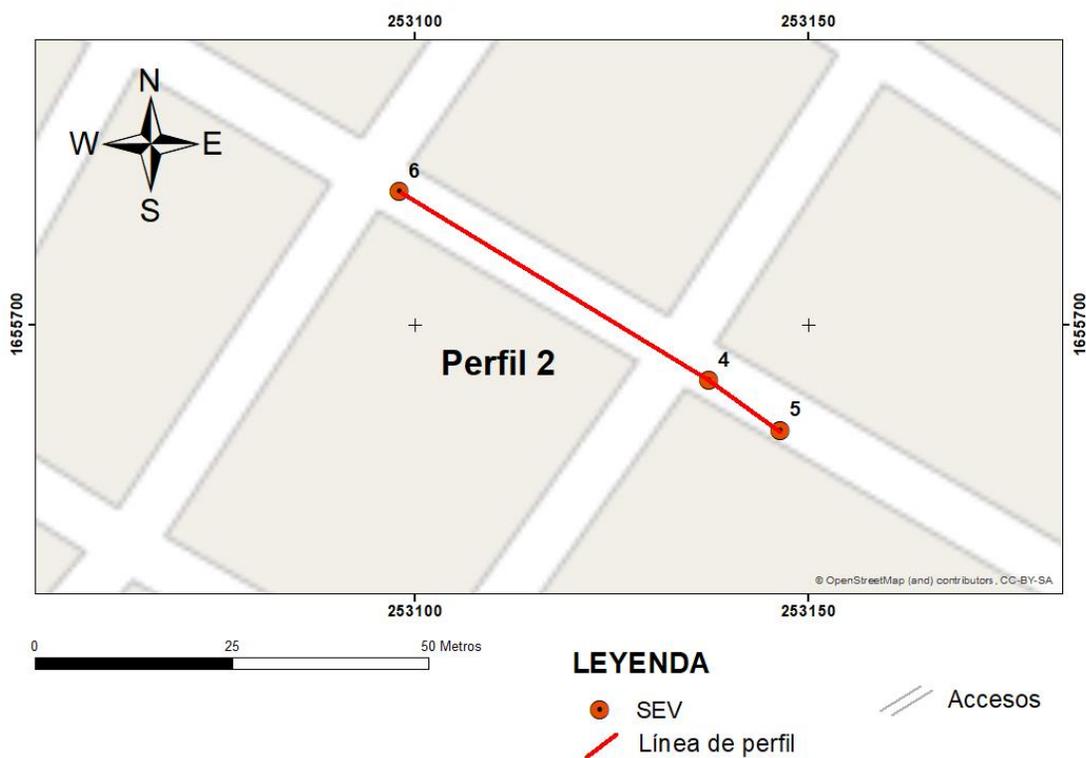
Figura 37. Perfil 1, correlación estratigráfica



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft PowerPoint.

En el caso del perfil 2 (figura 38) la orientación es W-E con una distancia lineal de ± 55 m. La profundidad máxima alcanzada en este perfil fue de 13.1 m (SEV6).

Figura 38. Perfil 2, Barrio Nuevo

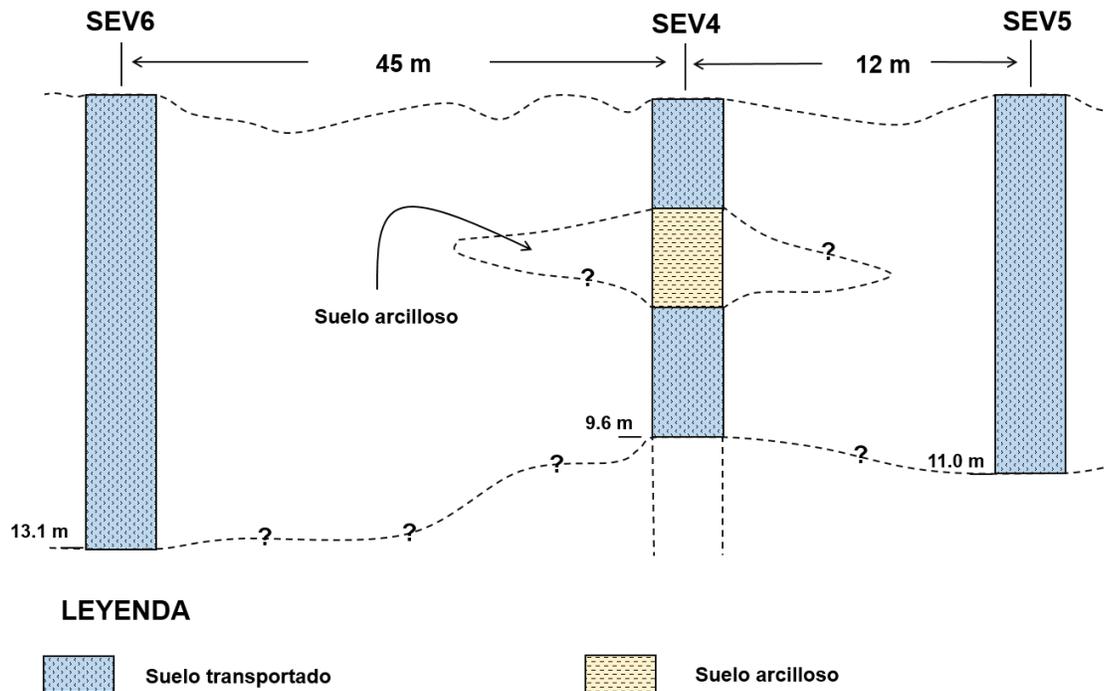


Fuente: elaboración propia, empleando programa ArcMap.

Como se puede observar en la correlación estratigráfica de la figura 39, la zona de suelo transportado guarda una relación en el subsuelo. Se realizaron las proyecciones de estas unidades.

El SEV4 muestra un lente de suelo arcilloso, que desde el punto de vista estratigráfico es aislado, con una variación lateral variable.

Figura 39. Perfil 2, correlación estratigráfica



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft PowerPoint.

4.4. Geología estructural

La geología estructural se aborda haciendo una aproximación de lo regional a lo local con el fin de identificar la influencia de las estructuras mayores sobre los aspectos locales que se identifican y miden dentro del área de estudio de esta investigación.

El área del casco urbano del municipio La Unión, Zacapa se localiza en la zona de falla del Motagua, tal como se mostró en el mapa de la geología regional.

En la aproximación estructural inicialmente se identificaron y marcaron las lineaciones principales auxiliándose de un modelo de elevación digital, así como revisión de imágenes satelitales y los mapas topográficos locales, esto con la finalidad de comparar los patrones de lineamientos regionales con las mediciones que se identificaron dentro del área de estudio.

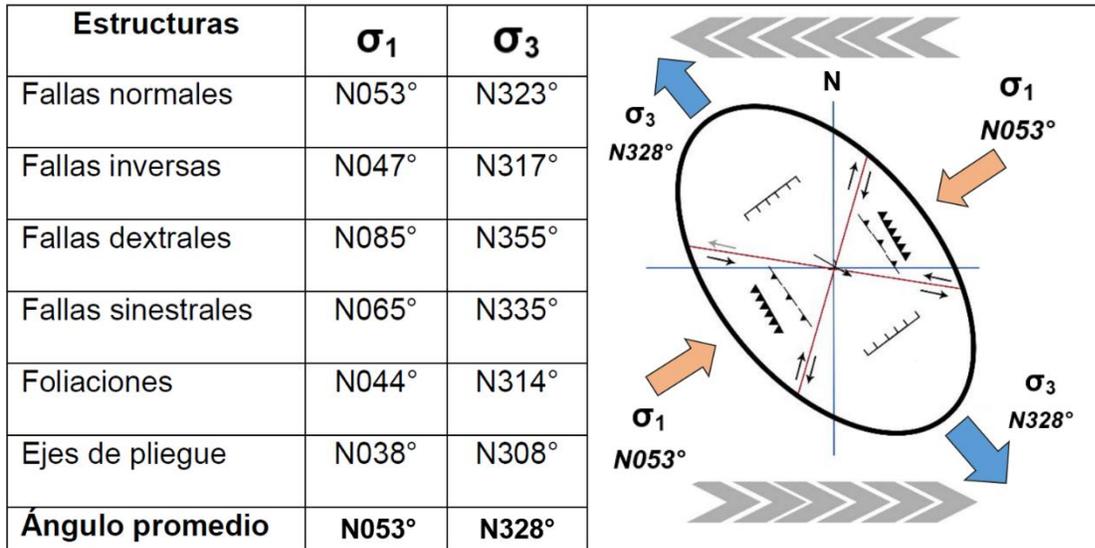
Según lo observado en la fase de campo, las coronas de deslizamientos condicionan la circulación del agua de infiltración y alcanza en el subsuelo el potencial acuífero local.

De acuerdo con Salguero (2015), el modelo general propuesto se definió tras realizar "un análisis geométrico y estadístico de las diversas estructuras corresponde a un modelo de deformación sinistral" (p. 90).

El autor tomó en cuenta estructuras geológicas de deformación frágil y dúctil entre las que se pueden mencionar foliaciones, ejes de pliegue y fallas de tipo normal, inversas y de rumbo.

Seguidamente de este análisis propuso el modelo de elipse de deformación local con un esfuerzo de compresión (Σ_1 , flechas color naranja) con orientación $N053^\circ$ y un esfuerzo de extensión (Σ_3 , flechas color azul) de $N328^\circ$ como se muestra en la figura 40.

Figura 40. **Elipse de deformación local**

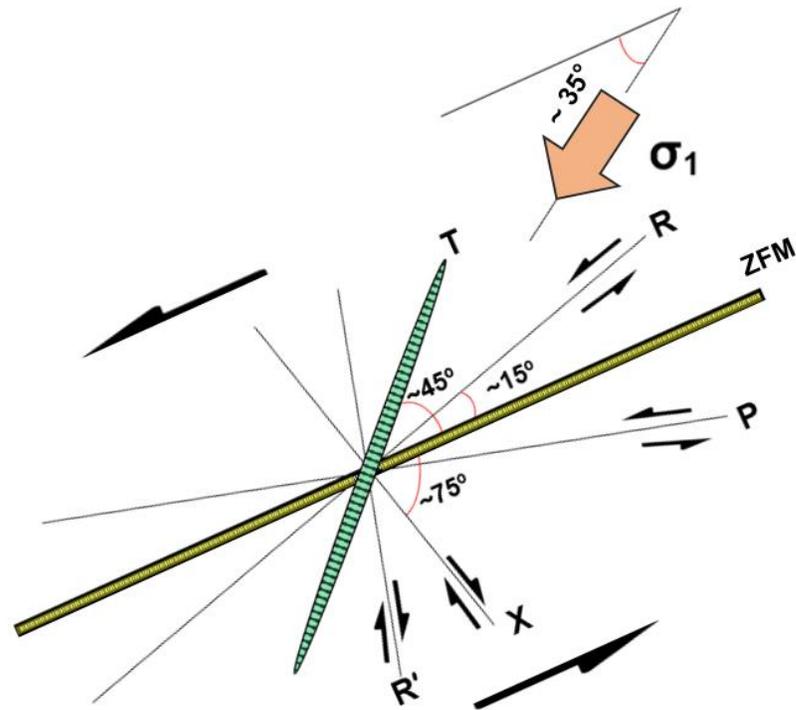


Fuente: Salguero (2015). *Modelo petrológico del Plutón La Unión, en 24 kilómetros cuadrados a escala 1:25,000.*

Con base en estos resultados en la descripción de este primer análisis, los resultados se han comparado seguidamente con el modelo teórico de fallamiento-fracturamiento asociado al movimiento sinistral de la zona de falla del Motagua, en el que se contemplan la traza principal de la falla maestra regional y las secundarias asociadas más conocidas.

Este modelo teórico se muestra en la figura 41, ya rotado según la traza de la falla del Motagua (30 °- 35 °) que pasa más cerca al área de estudio, con el fin de poder hacer las comparaciones de consistencia estructural con las lineaciones interpretadas.

Figura 41. **Modelo teórico sistema de falla sinistral**



LEYENDA

- | | | | |
|------------|--------------------|---|--------------------|
| σ_1 | Sigma 1 | T | Grietas de tensión |
| R, R' | Fallas tipo Riedel | | |
| X, P | Fallas secundarias | | |

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft PowerPoint.

La descripción resumida de las fallas secundarias asociadas a la falla maestra (traza del sistema de falla del Motagua) se describe a continuación, para tener una referencia explicativa e interpretativa cuando se ha comparado con el modelo con los datos de los rumbos de lineamientos.

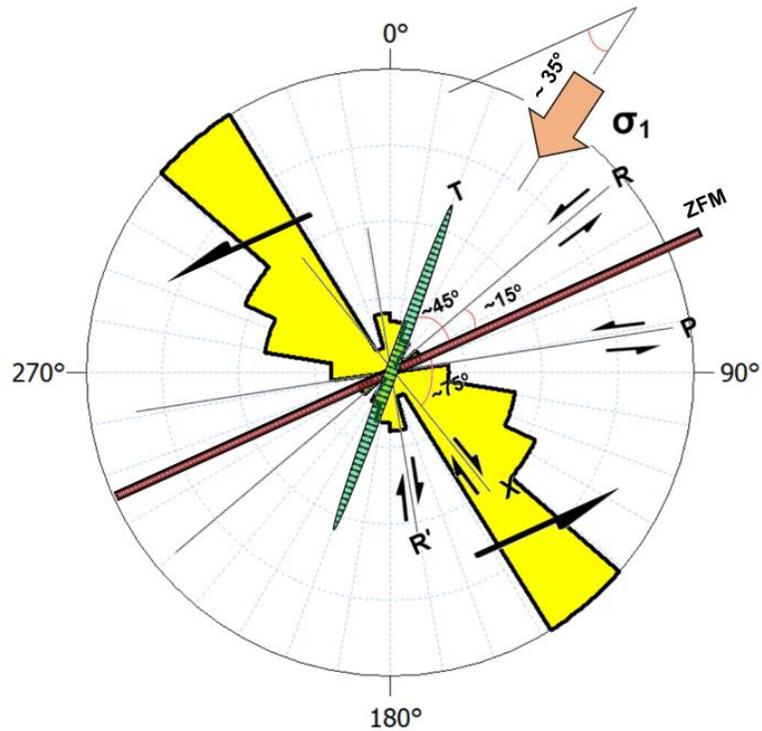
Todas las direcciones angulares indicadas hacen referencia a la traza de falla principal o maestra de rumbo sinestral vista en planta de la figura 41.

Como puede apreciarse en la figura 42, se muestra la roseta de rumbos sobrepuesta al modelo anterior. ZFM en el modelo se refiere a la traza de la cizalla regional, que en esta investigación es la zona de falla del Motagua para esta zona de Guatemala y particularmente para el municipio de La Unión, con una dirección entre 30 y 35°.

Las fallas de cizalla secundarias tienen un ángulo entre 10 a 20 ° las R y son de la misma naturaleza que la traza principal, y de 65 a 85° las R', estas últimas son de tipo dextral. P y X son fallas o fracturas secundarias y aparecen como conjugadas a las Riedel con ángulos similares de 10 a 20 ° las P (sinestrales) y de 65 a 85° las X (dextrales) (Riedel, 1929).

Las grietas de tensión se identifican como T y son paralelas a la dirección del esfuerzo principal σ_1 . Se muestra una zona de compresión NE-SW (figura 42) dado el sistema de falla principal que rige el movimiento lateral izquierdo adyacente a la zona investigada, la moda dominante de las lineaciones muestra una orientación de N319-139 (fallas secundarias X).

Figura 42. Roseta de rumbo superpuesta al modelo teórico de ZFM



LEYENDA

- σ_1 Sigma 1
- R, R' Fallas tipo Riedel
- X, P Fallas secundarias
- T Grietas de tensión

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft PowerPoint.

Se muestra la moda subordinada que está asociada a estructuras secundarias del sistema principal y que corresponden con las fallas Riedel R' (N354-174). La cercanía de la traza principal de falla (a 17 kilómetros aproximadamente) fueron tomados en cuenta al momento de interpretar los esfuerzos ya que estos pueden mostrarse un poco más perpendiculares a la traza principal.

4.5. Mapa geotécnico

El mapa geotécnico muestra las unidades geotécnicas identificadas en la zona de investigación, fueron delimitadas a partir de parámetros cartográficos realizados en la fase de campo y su posterior análisis de gabinete.

En las unidades se indican características observadas en cada localidad, parámetros geotécnicos, de geomorfología y aspectos que son relevantes en cada una. Asimismo, se diferencian las rocas duras, blandas y también los suelos estudiados. En la tabla XIX se indica a modo de resumen las características más sobresalientes de cada unidad.

Tabla XIX. **Resumen unidades geotécnicas**

Zona	Tipo	Descripción litológica-edáfica	Resistencia a la penetración	
Unidades	Rocas Duras	B2	Granito. Roca volcánica intrusiva	No evaluado
	Rocas blandas	B1	Coluvión, unidad producto de paleo deslizamientos generando material transportado, con poca cohesión, de alta permeabilidad y extensión en forma de abanico.	Suelo limo plástico arenoso con $5 < N_{70} > 10$
		B3	Filita. Roca metamórfica con alto grado de meteorización (III-IV)	Roca alterada con $5 > N_{30} > 27$
	Suelos duros	A1	Mediante SPT se encontraron limos y arenas arcillosas. Con las calicatas se definieron horizontes de limos y también arcillas con partículas finas y fragmentos dispersos.	Suelos limo arcillosos con gravilla $9 > N_{40} > 12$. Suelos arcillosos de $15 > N_{40} > 20$
	Suelos blando	A2	Por la proximidad con los sondeos SPT1 y SPT2 y la asociación geomorfológica del sector, se consideran suelos limoso-arcillosos.	Suelos limo arcillosos y gravilla de $N_{40} > 32$

Continuación tabla XIX.

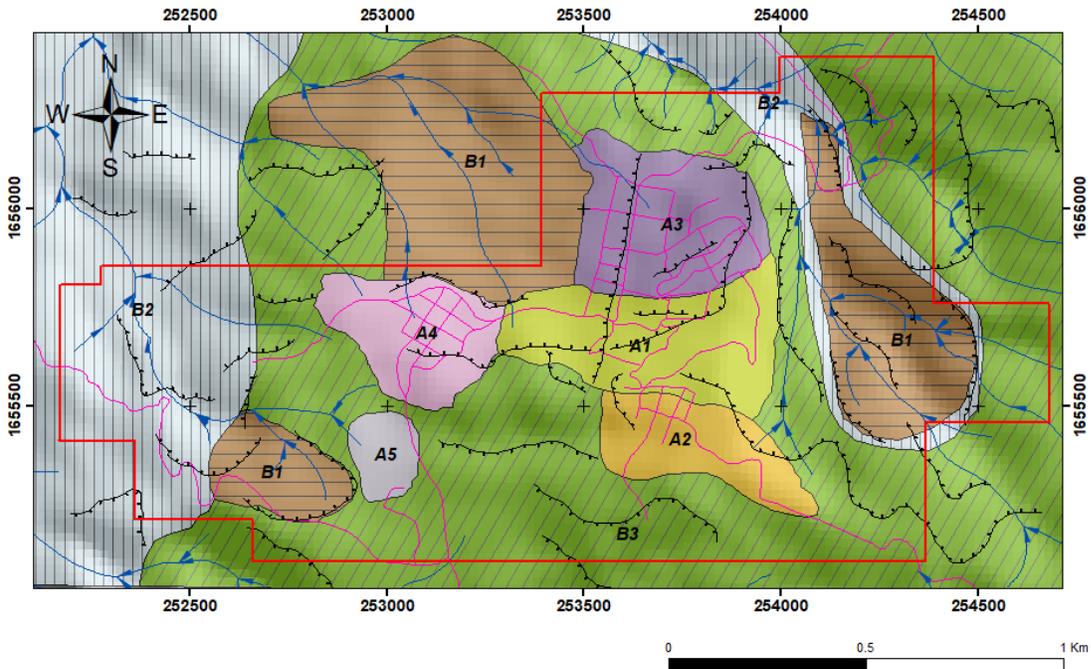
Zona	Tipo	Descripción litológica-edáfica	Resistencia a la penetración
Unidades Suelos blandos	A3	Con las calicatas A y C se constató la presencia de la unidad de suelo transportado (de baja capacidad portante).	Suelos de este sector son de tipo arenoso-limoso a mayor profundidad. De consistencia media $15 < N_{70} < 25$.
	A4	Con la excavación de la calicata B se observó el horizonte de suelo transportado hasta una profundidad de 2 metros.	Está formada por un limo plástico arenoso $5 < N_{70} < 10$
	A5	El material en este sector se satura fácilmente con las corrientes efímeras, producto de la microfrecuencia de la que forma parte.	No evaluado

Nota: Los colores de las unidades de roca o suelo corresponden al mapa geotécnico.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

En el mapa de la figura 43 se tiene el mapa geotécnico en síntesis del casco urbano, identificando las unidades geotécnicas y el riesgo por deslizamientos de tierra.

Figura 43. Mapa de riesgo geotécnico



LEYENDA

Unidades geotécnicas

	A1		A5
	A2		B1
	A3		B2
	A4		B3

Simbología

	Límite
	Deslizamientos
	Afluentes efímeros
	Accesos

Fuente: elaboración propia, empleando programa ArcMap.

Las unidades son las siguientes:

- Unidad A1: representa la ladera intermedia de la zona poblada (El Bordo). Geomorfológicamente existen laderas de pendiente muy alta, hay grietas y hundimientos. Estas trazas de deslizamientos fueron mapeadas mediante trabajo de campo y gabinete.

De acuerdo con CONRED (2009) luego de la evaluación estructural realizada por parte de miembros de la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural e investigadores de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se concluyó que existían numerosas viviendas con daños que se catalogaron con daños leves a severos, las viviendas en esta zona fueron hasta esa fecha, más de 45 unidades.

Esta zona también abarca el área ubicada al pie de la ladera principal del casco urbano, las pendientes son laderas de pendiente muy alta - alta.

Al este de esta zona los vecinos han optado por realizar rellenos en laderas, en donde se puede apreciar que hay una falta de criterio técnico, debido a que no se han hecho compactaciones para obtener una buena capacidad soporte.

Las perforaciones de SPT indican limos de alta plasticidad con arena, a modo de resumen, se indican a continuación los parámetros geotécnicos de los primeros dos estratos de suelo identificados.

EL SPT1 indica en el estrato A un suelo limoso de alta plasticidad con arena, LL = 50 %, LP = 36 % e IP = 14 %, mientras que en el estrato B se tiene una arena limosa con grava LL = 36 %, LP = 28 % e IP = 8 %.

En el caso del SPT2, el estrato A es una arena arcillosa de LL = 28 %, con LP = 20 % e IP = 8 %, para el estrato B se tiene un limo de baja plasticidad con LL = 49 %, LP = 36 % e IP = 13 %.

Las calicatas realizadas en esta área indicaron la existencia de arcillas de media plasticidad (calicata A) y limos de baja plasticidad con partículas finas y fragmentos dispersos (calicata C).

- Unidad A2: en esta área las viviendas construidas al sur, se encuentran en una zona relativamente segura, debido a que está categorizada como laderas de pendiente baja-muy baja, con distancias relativamente seguras de las laderas más al norte (a unos 100 m aproximadamente).

Se han observado algunas grietas en superficie que pueden asociarse a la baja capacidad de carga del subsuelo, que es muy posiblemente la unidad litológica de filita y su alto grado de meteorización (III-IV).

- Unidad A3: esta unidad se ubica en la zona central del casco urbano, ubicada al norte de la zona de investigación. En este sector se ubica el Barrio El Centro con las construcciones más antiguas del área urbana. En este sector se tienen trazas de deslizamientos locales, estas trazas fueron cartografiadas mediante los recorridos de campo realizados.

Los SEV indican estratos de suelo transportado, seguido de un estrato de suelo arcilloso y el basamento que es parte posiblemente de la unidad de filita.

Mediante la excavación de las calicatas A, B, C se verificó la unidad de suelo transportado, que como se ha indicado es un material de poca cohesión formado muy posiblemente a partir de material depositado de deslizamientos antiguos, que en la actualidad es la zona urbanizada.

El suelo transportado (unidad superficial) en este sector es un suelo limoso de alta plasticidad, arenoso s(MH), de color café rojizo. Es de consistencia media,

tiene un LL = 60.4 %, IP = 24.96 % y una humedad que varía de 17 al 27 %. La capacidad soporte de la unidad es de 7.2 - 7.5 T/m² para un asentamiento de 2.5 cm y un factor de seguridad de 3.

El suelo detrítico identificado en los SPT es grava media a gruesa, en una matriz arenosa a areno-limosa, plástica de color rojizo, es de consistencia media a alta, con un contenido de humedad de 20 %. La capacidad soporte para esta unidad es de 20.0 - 21.2 T/m² con un asentamiento de 2.5 cm y un factor de seguridad de 3.

- Unidad A4: en esta área ha sido identificada al igual que en la unidad A3 la unidad de suelo transportado, verificada mediante la excavación de calicatas y analizada a partir de los sondeos geofísicos.

Los SEV identificaron esta zona como de muy baja capacidad resistiva, por considerarse sin mucha cohesión y de alta humedad, de los datos adquiridos en fase de campo, se interpretó en el perfil un lente de material arcilloso que posee una extensión lateral indefinida.

En este sector se ubica Barrio Nuevo, con una geomorfología de laderas de pendientes muy bajas hasta moderadas. Existen deslizamientos de tipo traslacional y flujo de detritos que son fácilmente identificados en campo.

En el sector, mediante los SPT fue identificada una zona de roca metamórfica fuertemente alterada, asociada con el basamento de la zona de investigación. El grado de meteorización es alto produciendo un suelo limoso de alta plasticidad con arena.

La unidad de suelo transportado es un limo de alta plasticidad con arena (MH)s de color café rojizo. De consistencia medianamente firme con LL = 65.4 %, IP = 29.1 %. La capacidad soporte de la unidad es de 7.2 - 7.5 T/m² para un asentamiento de 2.5 cm con un factor de seguridad de 3.

En cambio, la unidad de suelo detrítico (subyacente a la unidad de roca alterada) es un suelo gravo-arenoso, de color café rojizo a café. Es de consistencia suelta a densa con contenido de humedad de 20 a 30 %. La capacidad soporte para esta unidad es de 20.0 - 21.2 T/m² con un asentamiento de 2.5 cm y un factor de seguridad de 3.

- Unidad A5: esta área se ubica en una geomorfología identificada como laderas de pendiente muy baja. En eventos de alta precipitación se ha notado agua meteórica reposada por la saturación del suelo, que luego de evapotranspirarse genera una serie de grietas con una orientación de movimiento al sur debido a la infiltración.
- Unidad B1: esta unidad de relleno es producto de materiales de poca consolidación, que se identifica fácilmente por su forma de abanico, esta es la forma típica de un deslizamiento, el suelo derivado de esta unidad de edad cuaternaria es relativamente joven y ha sido asociada a la unidad de suelo transportado por tener poca cohesión y contener en su matriz fragmentos de roca angulosos.

Se tomó de base la cartografía geológica de la zona y en fase de campo fue asociada a los deslizamientos ubicados en la zona de estudio, estudios previos indican su ubicación tanto en la unidad de filita como en la unidad de granito, así como zonas de pendiente baja.

Los contactos de esta área son particularmente con coronas de deslizamientos, las orientaciones de los aparentes flujos de (escombros y detritos) es N-S y SE-NW.

Los parámetros geotécnicos fueron adquiridos en la capa de suelo superficial de esta unidad y denotan poca capacidad de carga debido a su génesis geológica que la ubicó en su localización actual.

- Unidad B2: esta unidad de roca dura está compuesta por un cuerpo intrusivo, con gradaciones hasta alcanzar el núcleo. De acuerdo con Salguero (2015), identificó mediante el uso de microscopio petrográfico "la presencia de sericita lo cual evidencia que han sido afectadas por la cizalla" ubicada al NW de la zona de investigación (p. 38).

Esta unidad rocosa no cuenta con parámetros geotécnicos debido a que aflora en laderas de alta pendiente el E de la zona investigada, además que la población habita este sector en mucho menor proporción respecto a la zona central.

- Unidad B3: esta unidad de roca blanda Salguero (2015), indica que está compuesta por un cuerpo de roca metamórfico de bajo grado, de coloración grisácea.

Los parámetros geotécnicos de esta unidad de roca alterada han producido un suelo limo arcilloso (MH), blanco moteado con tonalidades verdosas con LL = 51.5 %, IP = 19.8 %, el contenido de humedad natural es de un rango de 30 al 50 %.

En muestra alterada procedente del ensayo SPT se observó una roca completamente meteorizada, de acuerdo con la correlación de los sondeos de penetración se ha determinado que muy posiblemente se trate de la unidad de filita, actuando como el basamento local.

4.6. Mapa de riesgo por deslizamientos

En el mapa de la figura 44 se aprecian los fenómenos de deslizamientos identificados. En este mapa de riesgo se han identificado este tipo de fenómenos naturales mediante trabajo de campo y la interpretación de otros elementos, entre los que se pueden mencionar estructuras geológicas locales y estudios anteriores en la localidad.

La geometría de los deslizamientos se muestra de forma alargada, siguiendo un patrón proporcional, indicando desplazamiento de los suelos hacia las partes más bajas. Los saltos de pendiente identificados en campo evidencian esta teoría.

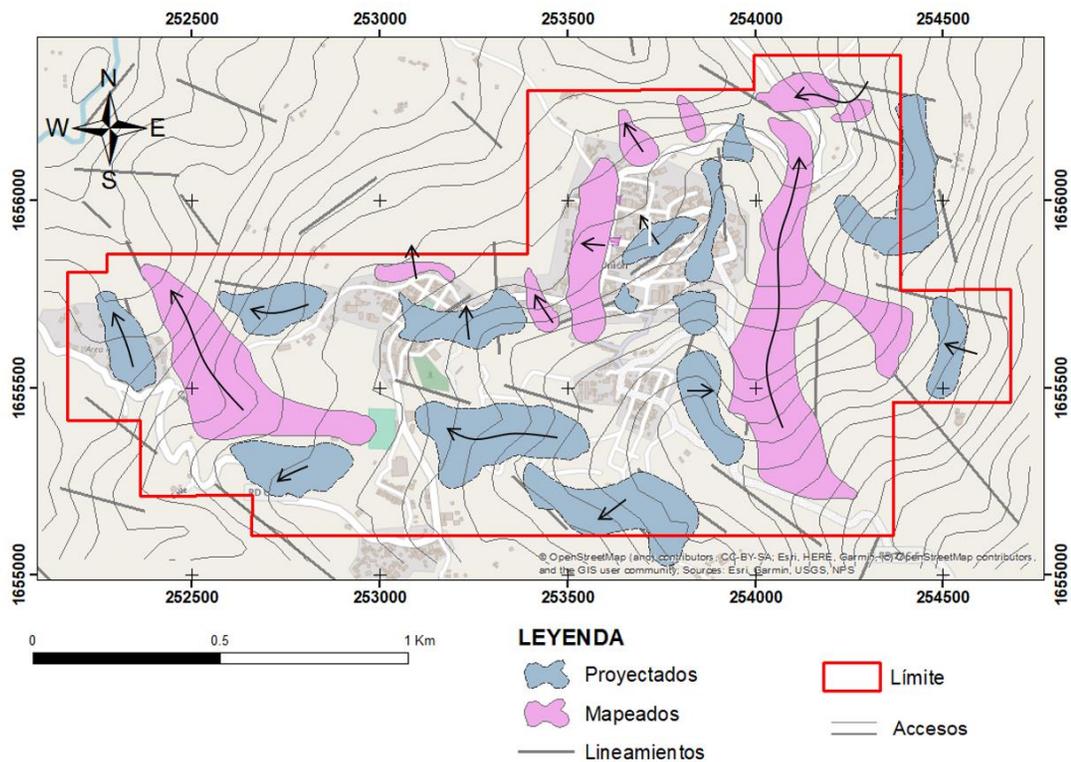
En el mapa se pueden observar con tonalidad de color rosado, los deslizamientos identificados mediante visitas de campo realizadas en la zona de investigación, dentro de los tipos identificados fueron movimientos rotacionales, flujos de lodo y flujos de detritos.

Los deslizamientos de tonalidad celeste oscura muestran las proyecciones de estos deslizamientos, que aguas arriba tienen una tendencia alta de seguir la trayectoria de los movimientos de ladera actuales.

Las flechas sobre los polígonos que representan los deslizamientos activos muestran la dirección de movimiento de estas masas, por ser una topografía de

alta pendiente en algunos sectores de la zona estudiada guardan relación con lineamientos estructurales (figura 25) y la red de drenaje local (figura 31).

Figura 44. Mapa de riesgo por deslizamientos



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

CONCLUSIONES

1. Se realizó el mapa que delimita las unidades geotécnicas, el cual identifica los riesgos por deslizamiento en el área urbana del municipio La Unión, localizados en el departamento de Zacapa.
2. Se identificó mediante el análisis de curvas de nivel, recorridos de campo e imágenes satelitales, las zonas afectadas por deslizamientos, plasmando en un mapa estos tipos de riesgos, observando que estos fenómenos se dan de diferentes formas en la zona de estudio, entre los que se pueden mencionar: flujo de detritos y lodo, movimientos rotacionales y traslacionales.
3. Se clasificaron los suelos superficiales mediante la realización de ensayos de granulometría, plasticidad con muestras de ensayos SPT y Calicatas. Los parámetros geotécnicos identificados se indican en las unidades geotécnicas, que de forma global se puede mencionar que, la unidad de suelo más superficial tiene una capacidad soporte de entre 7.2 y 7.5 T/m² por ser un suelo blando.
4. El estudio de la geología de superficie y la geología estructural han permitido comprender el entorno geomorfológico que producen los deslizamientos. Esto se debe a que, de forma local, el casco urbano se encuentra asentado sobre un posible paleo-deslizamiento, que ha producido suelos de baja capacidad soporte, que cuando se saturan tienden a efectuar un asentamiento diferenciado produciendo grietas y hundimientos sectorizados.

5. Se realizó una correlación de los sondeos SPT y SEV, identificando suelos limoso-arcillosos y transportados principalmente. El suelo limoso-arcilloso alcanza hasta 6.09 m de profundidad, es variable (en ensayo SPT), hasta los 3.40 m (en calicata) mientras que los suelos transportados pueden ser desde superficie hasta 13.10 m (en ensayo SEV).

6. Al ser el agua subterránea y superficial uno de los agentes que propician los deslizamientos dentro de la zona urbana, es importante drenar de la mejor forma estos flujos que saturan el suelo y producen los movimientos que afectan directamente a la población. El nivel freático no fue definido mediante la excavación de calicatas, la interpretación de los sondeos SEV identificaron suelos transportados (zona saturada) sin embargo la resistividad no muestra una tendencia generalizada atribuyendo esto a los suelos que no son in situ y tienen la particularidad de poseer una fácil absorción superficial de agua meteórica.

RECOMENDACIONES

1. Realizar una exploración geotécnica a detalle de las Unidades A5, B1 y B3. Estas áreas son las que tienen la tendencia a crecer en el futuro, en el tema de construcción de viviendas y que son parte de espacios recreativos para la población.
2. Detallar de mejorar manera el basamento local, esto es viable mediante una perforación más profunda, así como una campaña de exploración geofísica utilizando el método sísmico.
3. Mantener una constante capacitación a la población del municipio, en temas de evacuación por el riesgo latente de deslizamientos en la zona.
4. Implementar un Plan de Ordenamiento Territorial que defina las áreas con vocación urbana, permitiendo de esta forma un futuro crecimiento seguro de la población.
5. Registrar las talas de árboles que se realizan en las partes más altas del municipio, debido a que estas prácticas no contemplan el posterior flujo de la escorrentía que se produce durante eventos de alta precipitación, originando la saturación de los suelos en las zonas de baja pendiente.

REFERENCIAS

1. Coordinadora para la Reducción de desastres (2005). *Informe de situación: La Unión, Zacapa*. Guatemala: Autor.
2. CP-Ingeniería de Materiales (2008). *Estudio geotécnico para la evaluación de la estabilidad por efecto de fenómenos de deslizamientos en el terreno del Casco Urbano del Municipio de La Unión, Zacapa*. Guatemala: Autor.
3. Crespo, C. (2004). *Mecánica de suelos y Cimentaciones*. México: Limusa
4. Devincenzi, M., y Frank, N. (2004). *Estudios Geotécnicos*. Gerona, España: Autor. Recuperado de <https://bit.ly/3JUy4tg>.
5. González, L. L., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid, España: Pearson Educación.
6. Grupo Serex (2008). *Estudio de suelos y cimentaciones, estación base La Unión, Zacapa*. Guatemala: Autor.
7. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos (2008). *Guía metodológica para la elaboración de Cartografías de Riesgos Naturales en España*. Madrid, España: Gobierno de España. Recuperado de <https://bit.ly/33V6OWU>.

8. Instituto de Fomento Municipal (2008). *Estudio geofísico en el casco urbano del Municipio de La Unión, Zacapa*. Guatemala: Autor.
9. Instituto Geográfico Nacional (1961). *Mapa Geológico General de Guatemala, Hoja Chiquimula*. Guatemala: Autor.
10. López, J. (2002). *Geología aplicada a la Ingeniería Civil*. Madrid, España: Dossat 2000.
11. Montúfar, G. (2017). *Origen, formación y mineralogía de los suelos* (Tesis de maestría). Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá. Recuperado de <http://bit.ly/40L0zAK>.
12. Ortega-Gutierrez, F., Solari, L. A., Ortega-Obregón, C., y Elías-Herrera, M. (octubre, 2007). The Maya-Chortís Boundary: A Tectonostratigraphic Approach. *International Geology Review*, 49(11), 996-1024.
13. Riedel, W. (junio, 1929). Zur mechanic geologischer Brucherscheinungen. *Revista central de mineralogía, geología y paleontología*, 6(8), 354-368.
14. Rivera, H. (2005). *Geología general*. Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
15. Salguero, F. E. (2015). *Modelo petrológico del Plutón La Unión, en 24 kilómetros cuadrados a escala 1:25000* (Tesis de técnico). Centro Universitario del Norte, Cobán.

16. Servicios unificados de ingeniería. (2006). Estudio de suelos del sitio de torre La Unión, Zacapa. Guatemala: Autor.
17. Wicander, R., y Monroe, J. (2000). *Fundamentos de geología*. México: International Thomson Editores.