



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE
LADERA EN MICROCUENCA YATZÁ, DEPARTAMENTO DE SOLOLÁ**

Rocío Marisol Palacios Castellanos

Asesorado por el Ing. Julio Roberto Luna Aroche

Guatemala, noviembre de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE LADERA
EN MICROCUENCA YATZÁ, DEPARTAMENTO DE SOLOLÁ**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ROCÍO MARISOL PALACIOS CASTELLANOS
ASESORADO POR EL ING. JULIO ROBERTO LUNA AROCHE

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
EXAMINADOR	Ing. Claudio César Castañón Contreras
EXAMINADOR	Ing. Allan Geovani Cosillo Pinto
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:

ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE LADERA EN MICROCUENCA YATZÁ, DEPARTAMENTO DE SOLOLÁ

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha mayo de 2017.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Rocio Marisol Palacios Castellanos', written over a horizontal line.

Rocío Marisol Palacios Castellanos



CENTRO DE ESTUDIOS SUPERIORES
DE ENERGÍA Y MINAS
- CESEM -
Tel.: 24 18 91 39

Guatemala, 18 de octubre de 2017.

Ingeniero
José Gabriel Ordóñez Morales
Jefe del Departamento de Materiales
y Construcciones Civiles
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería/USAC

Ingeniero Ordóñez:

Por este medio me dirijo a usted para saludarlo, deseándole éxitos en sus actividades.

El motivo de la presente es para hacer de su conocimiento que he revisado el trabajo de graduación de la estudiante **Rocío Marisol Palacios Castellanos**, con número de carne 2006-11449, titulado **ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE LADERA EN MICROCUENCA YATZÁ, DEPARTAMENTO DE SOLOLÁ**; después de terminada la revisión se da por aprobado dicho trabajo.

Sin otro particular, me suscribo de usted.

Cordialmente

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Julio Roberto Luna Aroche
ASESOR DE TESIS
DIRECTOR

CENTRO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE ENERGÍA Y MINAS -CESEM-





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala,
18 de octubre de 2017

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

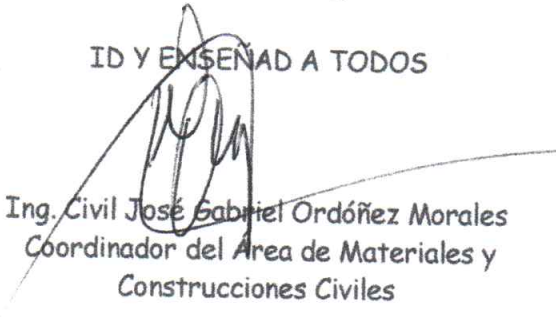
Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE LADERA EN MICROCUENCA YATZÁ, DEPARTAMENTO DE SOLOLÁ** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Rocío Marisol Palacios Castellanos quien contó con la asesoría del Ing. Julio Luna Aroche.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

LEYENDO Y ENSEÑANDO A TODOS


Ing. Civil José Gabriel Ordóñez Morales
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles



**FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC**

/mrrm.



Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Julio Roberto Luna Aroche y Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación de la estudiante Rocío Marisol Palacios Castellanos ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE LADERA EN MICROCUENCA YATZÁ, DEPARTAMENTO DE SOLOLÁ da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, noviembre 2017

/mmm.



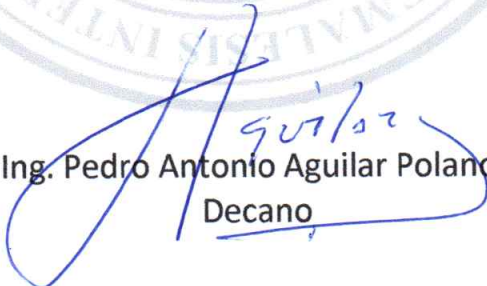
Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua



DTG. 592.2017

El Decano 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 Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE LADERA EN MICROCUENCA YATZÁ, DEPARTAMENTO DE SOLOLÁ**, presentado por la estudiante universitaria: **Rocío Marisol Palacios Castellanos**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, noviembre de 2017

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	El ingeniero del universo. El, que me formó desde la nada y ha sido tan misericordioso.
Mi padre	Humberto Francisco Palacios Herrera. Este triunfo es tuyo.
Mi madre	Por educarme, por ser un modelo de mujer llena de valentía y principios.
Mi tía	Carmen Castellanos, por ser mi segunda madre. La mujer más bondadosa, sencilla y trabajadora que conozco.
Familia Palacios Herrera	Especialmente a mis tíos Briand Palacios y Rodemiro Palacios, por estar en los momentos más duros de mi vida. Por el apoyo brindado.
Familia Castellanos	Mis tíos, primos y sobrinos.
Familia Noack	Por el apoyo incondicional y las interminables muestras de cariño.
Familia Figueroa Mazariegos	Por creer en mí, por tenerme en sus oraciones. Gracias a todos, ¡meta superada!

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. MARCO CONCEPTUAL	1
1.1. Generalidades.....	1
1.1.1. Características de un deslizamiento.....	6
1.1.2. Balance morfogenético	8
1.1.3. Zonificación de amenazas.....	9
1.1.4. Análisis de susceptibilidad a movimientos de ladera mediante SIG.....	10
1.1.5. Aplicaciones de SIG en Guatemala.....	11
1.2. Antecedentes del problema	13
2. CARACTERÍSTICAS REGIONALES.....	19
2.1. Localización geográfica	19
2.2. Vías de acceso.....	22
2.3. Geología regional.....	23
2.4. Litostratigrafía	26
2.4.1. Unidad de rocas graníticas	26
2.4.2. Unidad de flujos de lavas, lodos y piroclastos.....	27
2.4.3. Unidad de depósitos piroclásticos de caída	27

2.4.4.	Unidad de depósitos aluviales.....	27
2.4.5.	Unidad de coluviones	28
2.5.	Tectónica	28
2.6.	Geomorfología	29
2.6.1.	Hidrología	29
2.6.2.	Suelos.....	33
2.6.3.	Relieve	36
3.	MARCO METODOLÓGICO.....	37
3.1.	Etapas de recopilación y análisis bibliográfico.....	37
3.2.	Etapas de campo.....	38
3.3.	Etapas de laboratorio	42
3.3.1.	Análisis con lupa binocular de muestra E5-002	42
3.3.2.	Análisis con lupa binocular de muestra E102	44
3.3.3.	Análisis con lupa binocular de muestra 684.....	45
3.3.4.	Análisis con lupa binocular de muestra 121	47
3.4.	Etapas de gabinete.....	49
3.4.1.	Inventario de movimientos de ladera	49
3.4.2.	Selección de factores determinantes de la estabilidad.....	52
3.4.3.	Análisis entre movimientos de ladera y factores activadores	56
4.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	59
4.1.	Estratigrafía local	59
4.1.1.	Unidad de rocas graníticas (Tg)	60
4.1.2.	Unidad de Lahar andesítico (Tv)	66
4.1.3.	Unidad de lahar (QTa).....	71
4.1.4.	Depósitos piroclásticos de caída (Qpa).....	78

4.1.5.	Unidad de aluvión (Qal)	85
4.1.6.	Unidad de coluvión (Qcol)	87
4.2.	Geología estructural.....	88
4.2.1.	Zona de cizalla.....	88
4.2.2.	Fallas	90
4.3.	Geomorfología	91
4.3.1.	Formas asociadas a procesos endógenos.....	92
4.3.1.1.	Superficie de apilamiento de pómez (SAP)	92
4.3.1.2.	Superficie de apilamiento de pómez degradada (SAPD)	93
4.3.2.	Formas asociadas a procesos exógenos.....	94
4.3.2.1.	Piedemonte (Pm).....	94
4.3.3.	Formas asociadas a procesos de denudación.....	95
4.3.3.1.	Laderas de incisión fluvial (LIF).....	95
4.3.3.2.	Laderas de incisión fluvial reciente (LIFR).....	95
4.3.3.3.	Cerro (Ce).....	96
4.3.3.4.	Superficie de cumbre (SC)	98
4.3.4.	Formas asociadas a movimientos de ladera.....	99
4.3.4.1.	Cicatriz de deslizamiento (CiD)	99
4.3.4.2.	Cuerpo de deslizamiento (CuD)	99
4.3.4.3.	Cabecera de deslizamiento (CaD)	99
4.3.5.	Formas asociadas a procesos fluvio-torrenciales .	101
4.3.5.1.	Barranco (B)	101
4.3.5.2.	Terraza (Te).....	102
4.3.5.3.	Depósitos de canal reciente (DCR)....	103
4.3.6.	Unidad antrópica.....	104
4.3.6.1.	Canteras	104

5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	107
5.1.	Tratamiento de datos	107
5.1.1.	Inventario de movimientos de ladera	108
5.1.2.	Clasificación de los factores condicionantes.....	109
5.2.	Grados de susceptibilidad	109
5.2.1.	Zona de susceptibilidad al deslizamiento muy alta (ZSDMA)	110
5.2.2.	Zona de susceptibilidad al deslizamiento alta (ZSDA)	110
5.2.3.	Zona de susceptibilidad al deslizamiento media (ZSDM)	110
5.2.4.	Zona de susceptibilidad al deslizamiento baja (ZSDB)	111
5.3.	Resultados	111
5.4.	Análisis entre movimientos de ladera y factores activadores	119
5.5.	Sumatoria de capas de susceptibilidad	132
5.6.	Mapa de susceptibilidad	138
5.7.	Interpolación de movimientos de ladera.....	140
5.8.	Análisis de orientación entre deslizamientos y lineamientos .	141
	CONCLUSIONES.....	145
	RECOMENDACIONES	147
	BIBLIOGRAFÍA.....	149
	APÉNDICES	151

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Colapso de rocas	2
2.	Vuelco o desplome de rocas	3
3.	Deslizamiento rotacional.....	4
4.	Expansión lateral con roturas en arena fina y limo	5
5.	Flujo de detritos	6
6.	Características de un deslizamiento rotacional con flujo	7
7.	Daños en municipio El Palmar.....	14
8.	Flujo de detritos del volcán Tolimán	16
9.	Bloques y lodos en las cercanías de aldea Tzanchag	16
10.	Aster mostrando estragos por tormenta Stan.....	17
11.	Mapa de ubicación.....	20
12.	Mapa hipsométrico del polígono de estudio	21
13.	Vías de acceso al polígono de estudio.....	22
14.	Mapa geológico regional.....	24
15.	Geología en los alrededores del polígono de estudio	25
16.	Migración al suroeste de la caldera Atitlán.....	25
17.	Fallas regionales identificadas en el polígono de estudio	29
18.	Microcuencas del río Nahualate	31
19.	Cauces fluviales del polígono de estudio	32
20.	Ampliación del mapa fisiográfico-geomorfológico	34
21.	Minerales de cuarzo, biotita e ilmenita en muestra E5-002	43
22.	Muestra E102 bajo lupa binocular	45
23.	Muestra 684 bajo lupa binocular	46

24.	Muestra 121 bajo lupa binocular	48
25.	Movimientos de masa que tuvieron lugar durante la tormenta tropical Stan.....	51
26.	Un lineamiento con su respectiva área de influencia.....	55
27.	Área de influencia de un lineamiento conteniendo dos deslizamientos	55
28.	Distribución de movimientos de ladera en tres áreas distintas.....	57
29.	Determinación de la susceptibilidad a movimientos de ladera mediante el método de la matriz	58
30.	Columna litoestratigráfica	59
31.	Relictos de maclas polisintéticas en color verde.....	61
32.	Sericitización en feldespatos, marcado con color rojo.....	62
33.	Cristal de hornblenda siendo cloritizado	63
34.	Cuarzo presentando extinción ondulosa	64
35.	Microtextura pertítica en cristales de feldespato.....	65
36.	Afloramiento a orilla de la carretera.....	66
37.	Contacto en los alrededores de la aldea Paquip.....	67
38.	Lentes de líticos andesíticos entre estratos de paleosuelo.....	68
39.	Plagioclasas macladas	69
40.	Zonación oscilatoria y textura traquítica	69
41.	Crecimiento esquelético en el borde de las plagioclasas	70
42.	Cristal de olivino con alteración en sus fracturas	71
43.	Bloques de granito cizallado, muestra 121	72
44.	Cristales de biotita alineados.....	72
45.	Análisis con microscopio petrográfico de muestra 121	73
46.	Cristales de biotita con dos direcciones de alineación.....	73
47.	Afloramiento de muestra 123	75
48.	Muestra de mano identificada como 123	76

49.	Corte perpendicular a la foliación para la realización de la sección delgada	76
50.	Muestra 123 bajo luz polarizada plana, objetivo 10X.....	77
51.	Muestra 123 bajo luz polarizada cruzada, objetivo 10X.....	77
52.	Afloramiento de depósitos piroclásticos de caída	79
53.	Capas de paleosuelo entre depósitos piroclásticos de caída	80
54.	Minerales de óxido de hierro incrustados entre las pumitas	80
55.	Depósitos piroclásticos de color blanco con líticos de andesita	81
56.	Peso acumulado contra diámetro de partículas	82
57.	Histograma con respecto al porcentaje de peso individual de partículas	82
58.	Minerales de óxido de hierro	83
59.	Vesículas redondeadas de las pumitas presentes en la muestra	83
60.	Líticos de andesita presentes en la muestra	84
61.	Ceniza media a gruesa bajo lupa binocular	84
62.	Clases de tamaño para partículas volcánicas.....	85
63.	Aluvión a orillas del río Yatzá	86
64.	Coluvión siendo cubierto por vegetación.....	87
65.	Fuerte fracturamiento en las paredes del cerro Sak'abaj	88
66.	Lineamientos en color rojo subparalelos al río Yatzá.....	89
67.	Fallamiento de tipo normal a orillas del río Yatzá	90
68.	Fallamiento de tipo normal	91
69.	Superficie de apilamiento de pómez (SAP).....	92
70.	Superficie de apilamiento de pómez degradada	93
71.	Superficie de apilamiento de pómez degradada y cerro Ajaw	93
72.	Unidad geomorfológica piedemonte	94
73.	Laderas de incisión fluvial.....	95
74.	Laderas de incisión fluvial reciente (LIFR)	96
75.	Cerro.....	97

76.	Cerro Nariz del Indio.....	97
77.	Superficie de cumbre (SC)	98
78.	Caserío Montecristo.....	98
79.	Cabecera de deslizamiento (CaD)	100
80.	Formas asociadas a movimientos de ladera (CiD)	100
81.	Formas asociadas a movimientos de ladera.....	101
82.	Barrancos o abarrancamientos	102
83.	Terraza.....	103
84.	Zonas aluviales activas.....	103
85.	Depósitos de canal reciente (DCR).....	104
86.	Cantera artesanal	105
87.	Unidades geomorfológicas en el polígono de estudio	106
88.	Esquema de la metodología.....	108
89.	Inventario de movimientos de ladera (2006-2016).....	112
90.	Capa de geología	113
91.	Capa de geomorfología.....	114
92.	Capa de uso del suelo.....	115
93.	Capa de orientaciones.....	116
94.	Capa de pendientes.....	117
95.	Capa de lineamientos	118
96.	Deslizamientos que alberga la capa de geología	121
97.	Área (m ²) de los rangos, en la capa geología	122
98.	Deslizamientos que alberga la capa de geomorfología	123
99.	Área (m ²) de los rangos, en la capa geomorfología.....	123
100.	Deslizamientos que alberga la capa pendientes.....	124
101.	Área (m ²) de los rangos, en la capa pendientes	125
102.	Deslizamientos que alberga la capa de uso del suelo	126
103.	Área (m ²) de los rangos, en la capa de uso del suelo	126
104.	Deslizamientos que alberga la capa de orientaciones.....	127

105.	Área (m ²) de los rangos, en la capa de orientaciones	128
106.	Deslizamientos que alberga la capa de estructural.....	129
107.	Área (m ²) de los rangos, en la capa de estructural	129
108.	Capa de litología	132
109.	Capa de geomorfología	133
110.	Capa de uso del suelo	134
111.	Capa de orientaciones.....	135
112.	Capa de pendientes.....	136
113.	Capa de estructural	137
114.	Mapa de susceptibilidad a movimientos de ladera.....	139
115.	Interpolación de movimientos de ladera según su origen	140
116.	Análisis de lineamientos por kilómetro cuadrado	141
117.	Orientación media de 1 810 deslizamientos inventariados	142
118.	Lineamientos por kilómetro cuadrado	143
119.	Dos familias preferenciales de lineamientos	144

TABLAS

I.	Deslizamientos registrados en Centroamérica durante huracán Mitch.....	15
II.	Coordenadas que delimitan el polígono de estudio	19
III.	Zonas de vida del polígono de estudio.....	34
IV.	Características de los subórdenes y lineamientos generales para los suelos de los órdenes encontrados en el polígono de estudio	35
V.	Eventos que desencadenaron movimientos de ladera	38
VI.	Muestras representativas con descripción macroscópica.....	40
VII.	Minerales principales encontrados en muestra E5-002	43

VIII.	Minerales principales identificados en muestra E102	44
IX.	Minerales principales de muestra 684.....	46
X.	Minerales principales encontrados en muestra 121	47
XI.	Clasificación por rangos de la capa de geología.....	52
XII.	Clasificación por rangos de la capa de geomorfología	53
XIII.	Clasificación por rangos de la capa de pendientes.....	53
XIV.	Clasificación por rangos de la capa de uso del suelo	54
XV.	Clasificación por rangos de la capa orientaciones	54
XVI.	Clasificación por rangos de la capa de estructural	56
XVII.	Análisis con microscopio petrográfico de muestra E5-002	60
XVIII.	Análisis con microscopio petrográfico de muestra E102	62
XIX.	Análisis con microscopio petrográfico de muestra 684.....	64
XX.	Análisis con microscopio petrográfico de muestra 412.....	70
XXI.	Composición mineralógica para muestra 121	74
XXII.	Granulometría.....	81
XXIII.	Factores condicionantes.....	107
XXIV.	Movimientos de ladera en cada capa.....	120
XXV.	Área (m ²) ocupada por cada rango	120
XXVI.	Índice de susceptibilidad para la capa de geología	121
XXVII.	Índice de susceptibilidad para la capa de geomorfología	122
XXVIII.	Índice de susceptibilidad para la capa de pendientes.....	124
XXIX.	Índice de susceptibilidad para la capa de uso del suelo	125
XXX.	Índice de susceptibilidad para la capa de orientaciones.....	127
XXXI.	Índice de susceptibilidad para la capa de estructural	128
XXXII.	Índices ponderados	130
XXXIII.	Peso de cada hipótesis para cada factor	138

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Bt	Biotita
Chl	Clorita
Qz	Cuarzo
E	Este
Fd	Feldespato
Fd K	Feldespato potásico
Km²	Kilómetro cuadrado
Mag	Magnetita
N	Norte
O	Oeste
Px	Piroxeno
S	Sur

GLOSARIO

Afanítico	Textura que describe rocas ígneas con un grano o cristal tan fino que no pueden ser vistos a ojo desnudo.
Anhedral	Granos minerales que no muestran ningún desarrollo de forma cristalina.
Euhedral	Granos minerales que muestran una forma cristalina completamente desarrollada.
Gouge	Harina tectónica, es sencillamente polvo de roca, producto de fricción.
GPS	Sistema global de navegación por satélite.
Hábito	Se refiere al desarrollo cristalino de las caras de un cristal.
Hololeucocrático	Es una medida de índice de color. Tienen <10 % de minerales máficos.

Leucocrático	Es una medida de índice de color. Los minerales leucocráticos contienen un 10 % a 35 % de minerales máficos.
Máfico	Los minerales oscuros son los minerales máficos
Mesocrático	Es una medida de índice de color. Los minerales mesocráticos contienen un 35 % a 65 % de minerales máficos.
Mineral	Material de origen natural, con estructura cristalina y composición química definida.
SIG	Sistemas de información geográfica.
Subhedral	Granos minerales que muestran una forma cristalina parcialmente desarrollada.
Zonación	Es una textura reconocible en cristales de plagioclasa. Representa cambios rítmicos de la cámara magmática.

RESUMEN

El trabajo aborda el análisis de la susceptibilidad del terreno a los movimientos de ladera, mediante un sistema de información geográfica, al centro de la microcuenca del río Yatzá, jurisdicción del departamento de Sololá.

La historia geológica del polígono de estudio cuenta con eventos del cuaternario: depósitos aluviales y coluviales recientes, depósitos piroclásticos de caída (posteriores a la erupción del batolito Chocoyos) que se extienden en toda el área, cubriendo un macizo granítico más antiguo. Y en todo el cerro Xiquichoy una unidad de lahar descansa sobre sus laderas. Existe otra unidad de lahar al sureste, que se compone de bloques de andesita; se interpreta como un relicto de actividad volcánica previo al colapso de caldera Atitlán II.

Se analizaron los factores determinantes para el análisis de susceptibilidad por el método de la matriz, mediante el cruce de estos con el inventario de movimientos de masa. El inventario contiene 1 810 movimientos de ladera, las unidades litológicas que albergaban mayor cantidad de movimientos de masa son: depósitos piroclásticos de caída y la unidad de lahar. La unidad geomorfológica de laderas de incisión fluvial, ubicada en el cerro Xiquichoy y Tzamatán, contiene la mayor cantidad de deslizamientos.

El análisis de movimientos de ladera realizado al factor de pendientes revela que ocurrieron 986 deslizamientos en laderas con pendientes que se encontraban en un rango de 15° a 30°.

Al contabilizar los deslizamientos que alberga la capa de uso del suelo, se obtiene un 49 % de ocurrencia en las siembras de café. Esto, a causa que el café es vital para la economía de la población, su cultivo se extiende en todo el polígono de estudio; esto propicia la erosión del suelo.

Por tanto, se caracterizaron 5 grados de susceptibilidad: la susceptibilidad alta y muy alta se encuentra sobre laderas escarpadas donde predominan rocas fuertemente cizalladas. La susceptibilidad media se encuentra asociada a fuerte erosión hídrica como resultado de su relación con laderas de incisión fluvial, depósitos de pie de monte y las unidades litológicas de lahar.

Por último, las zonas de baja y muy baja susceptibilidad se encuentran en laderas de menor pendiente ($<30^\circ$); se caracterizan por la alta actividad antrópica desarrollada en ellas.

OBJETIVOS

General

Evaluar la susceptibilidad por movimientos de ladera, en los alrededores de la microcuenca Yatzá, departamento de Sololá.

Específicos

1. Proponer un mapa de susceptibilidad a movimientos de ladera mediante un sistema de información geográfica.
2. Identificar e inventariar los movimientos de ladera del año 2006 y 2010, mediante un programa de tratamiento de datos geoespaciales, ortofotos, imágenes satelitales y visitas de campo.
3. Realizar un análisis estadístico de la distribución espacial de los movimientos de ladera generados dentro de cada una de las categorías de los factores condicionantes.
4. Determinar las zonas más susceptibles a movimientos de ladera con el fin de recomendar los usos del terreno, dependiendo si es una zona de susceptibilidad alta, media, baja o muy baja.

INTRODUCCIÓN

Los movimientos de masa en paisajes volcánicos están asociados a colapsos de laderas abruptas debido a sobresaturación de agua, periodos prolongados de erosión y relictos de actividad volcánica. Representan amenazas significativas para la población, sin embargo, a medida que la demografía aumenta, la demanda de tierra para sembrar, también aumenta y da como resultado un incremento de personas viviendo cerca de lugares con alto potencial de riesgo.

La sectorización de amenazas en los alrededores de volcanes involucra la identificación e interpretación de depósitos dejados por deslizamientos en el pasado. Un mapa de sectorización es una herramienta útil para la inmediata respuesta y especial atención a estas zonas susceptibles a movimientos de ladera.

La investigación se enfoca en el análisis de susceptibilidad a movimientos de ladera, donde a partir de mapas temáticos se zonifican las áreas susceptibles al deslizamiento. La técnica de la sectorización de amenaza por deslizamientos desarrollada en esta investigación, se basa en considerar los factores desencadenantes.

Se seleccionó un conjunto de factores determinantes (litología, pendientes, geomorfología, estructural, uso del suelo) que condicionan la aparición de movimientos de ladera en el polígono de estudio.

Se relacionaron con las ubicaciones de los deslizamientos ocurridos en los últimos 10 años y el resultado es una matriz espacial con categorías de susceptibilidad.

El presente estudio pretende ser una herramienta útil para el beneficio de las comunidades que se encuentran susceptibles a movimientos de ladera dentro del polígono de estudio, con el objetivo de que las autoridades correspondientes adopten medidas de seguridad, establezcan locaciones favorables para el desarrollo de infraestructura y desarrollen planes de mitigación ante cualquier eventualidad.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1. Generalidades

Los deslizamientos constituyen un riesgo cuando amenazan vidas y daño a sus bienes. Este riesgo ha ido en aumento en los últimos años debido al incremento demográfico que ha forzado a explotar zonas con riesgo potencial. A esto se añade la gran cantidad de obras civiles que se realizan para poder brindar mejores condiciones de vida en tales zonas a las personas.

Por lo que, cuando se habla del término ladera, se refiere a su conformación actual, que tuvo como origen un proceso natural; y talud, cuando se forma artificialmente. Para determinar su estabilidad corresponde utilizar diversas ciencias aplicadas: geología, topografía, geomorfología, mecánica de suelos, entre otras.¹

Habitualmente, se usa el término “deslizamiento” en sentido amplio, para designar casi todas las variedades de movimientos en masa producidos en las laderas, por lo que conviene definirse. Según Cruden, es el movimiento de una masa de rocas, detritos o tierras hacia abajo de una ladera.²

Según Gutiérrez Elorza, los deslizamientos son movimientos rápidos de materiales terrestres, separados de la parte estable infrayacente de la ladera por

¹ YAGÜE, Juan y COROMINAS, Jordi. *Terminología de los movimientos de ladera*. p. 1051-1072.

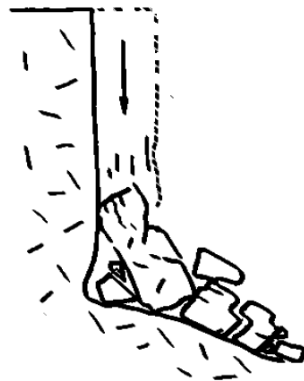
² CRUDEN, David y VARNES, David. *Landslides: Investigation and Mitigation. Special Report 247* p. 12.

un plano neto.³ El término “movimiento en masa” establece la diferencia con otros procesos en los que el transporte no es masivo, no obstante, es utilizado también para describir los movimientos que ocurren en laderas.

La clasificación de los procesos de remoción en masa más aceptada y aplicada a nivel internacional, según Alcántara Ayala, se basa en el mecanismo del movimiento.⁴ De manera general, estos movimientos se dividen en:

- Caídas o desprendimientos (*falls*): son los movimientos en caída libre de distintos materiales tales como rocas o suelos, dando lugar a desprendimiento de rocas o desprendimiento de suelos. Se originan por el desprendimiento de material de una superficie inclinada, ladera abajo. Ocurren en laderas fuertemente inclinadas, de tipo natural o artificial.

Figura 1. **Colapso de rocas**



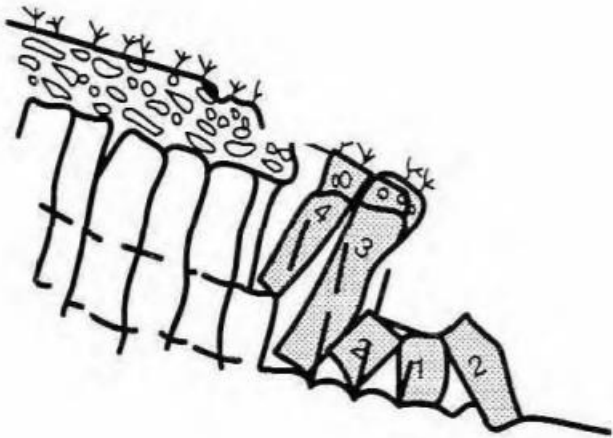
Fuente: GARCÍA YAGÜE, Juan. *Clasificación tipológica de los movimientos de ladera*. p. 5.

³ ELORZA, Mateo. *Geomorfología*. p. 233.

⁴ ALCÁNTARA, Irasema. *Boletín 41: Investigaciones Geográficas*. p. 4.

- Vuelcos o desplomes (*topples*): consiste en la rotación de una masa de suelo, detritos o roca, en torno a un eje o pivote determinado por su centro de gravedad. Frecuentemente ocurren en materiales que poseen un sistema de discontinuidades preferencial como diaclasas, grietas de tensión. Su movimiento es hacia la parte externa y se clasifican en vuelcos de rocas, de derrubios o detritos y vuelco o desplome de suelos.

Figura 2. **Vuelco o desplome de rocas**



Fuente: GARCÍA YAGÜE, Juan. *Clasificación tipológica de los movimientos de ladera*. p.6.

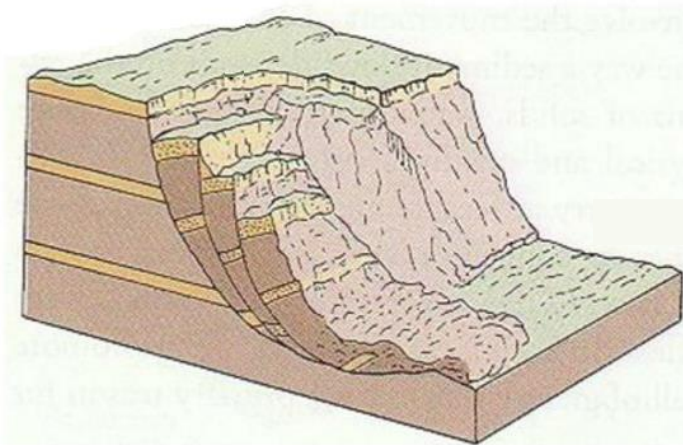
- Deslizamientos (*slides*): son movimientos ladera debajo de una masa de suelo, detritos o roca, la cual ocurre sobre una superficie reconocible de ruptura. La formación de grietas transversales es la primera señal de este tipo de movimientos, las cuales se localizan en la zona que ocupará el escarpe principal.

La superficie de ruptura define el tipo de deslizamiento, por lo que las superficies cóncavas o en forma de cuchara se asocian a deslizamientos rotacionales. En los deslizamientos rotacionales, el escarpe principal regularmente es vertical, la masa desplazada se acumula ladera abajo.

Las superficies de ruptura, semiplanas u onduladas, corresponden a los movimientos traslacionales. Estos son menos profundos que los rotacionales e involucran un movimiento paralelo a la superficie, el cual está controlado por superficies de debilidad de los materiales formadores.

Los deslizamientos planos se asocian a superficies planas y se identifican tres principales tipos a partir del material: deslizamientos de rocas, de derrubios y coladas de barro.

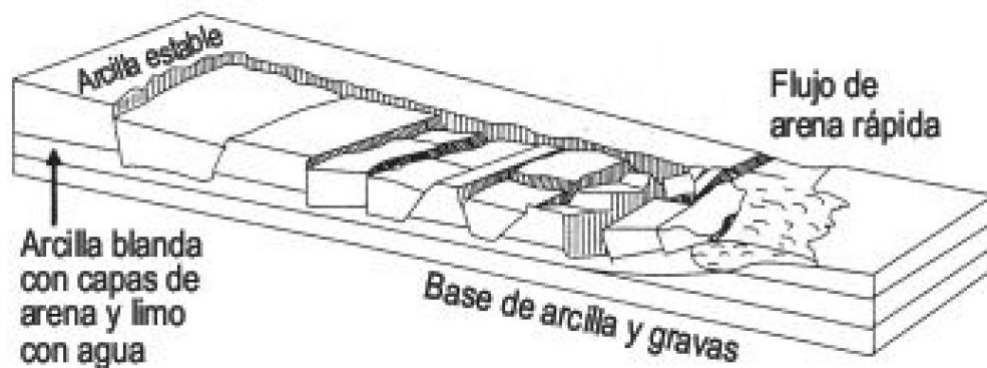
Figura 3. **Deslizamiento rotacional**



Fuente: GUTIÉRREZ ELORZA, Mateo. *Geomorfología*. p. 238.

- Expansiones laterales (*lateral spreading*): estos movimientos son resultado de la fracturación y expansión de suelos o roca, debido a licuefacción. Fragmentos de rocas están inmersos en una matriz de material más fino o contienen arcillas. Ocurren principalmente en ambientes lacustres y marinos donde el nivel freático se encuentra a poca profundidad; también pueden ser desencadenados por efectos sísmicos.

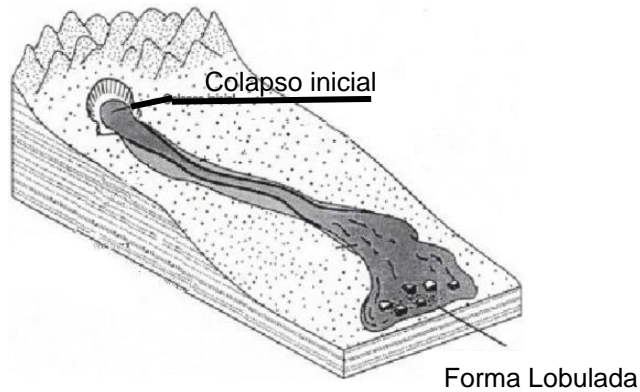
Figura 4. **Expansión lateral con roturas en arena fina y limo**



Fuente: GUTIÉRREZ ELORZA, Mateo. *Geomorfología*. p. 242.

- Flujos (*flows*): constituyen un tipo de movimiento en masa, donde el contenido de agua es muy alto, por consiguiente, se comporta como un fluido. En función del material se subdividen en: flujos de detritos (*debris flows*), flujos de tierras (*soil flow*) y flujos de roca (*rock flow*).

Figura 5. **Flujo de detritos**



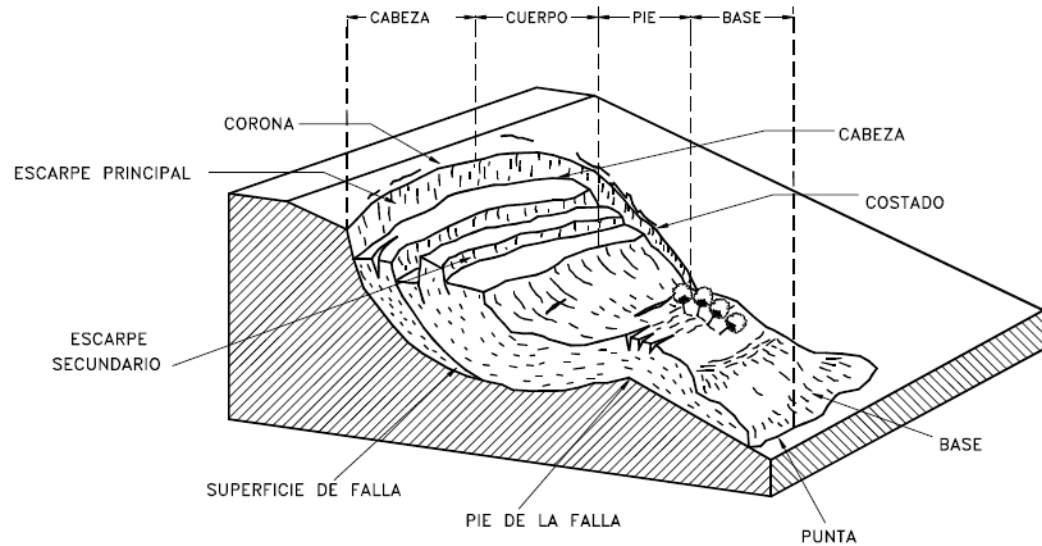
Fuente: GUTIÉRREZ ELORZA, Mateo. *Geomorfología*. p. 244.

1.1.1. **Características de un deslizamiento**

En un deslizamiento se suelen distinguir diversos rasgos característicos, la figura 6 muestra un esquema idealizado, mostrando el desarrollo de los mismos; sin embargo, en función del tipo de movimiento de masa, estos pueden diferir.

- **Escarpe principal:** corresponde a una superficie de pendiente muy fuerte, causado por el desplazamiento del material desplazado. Si este escarpe se proyecta bajo el material desplazado, se obtiene la superficie de ruptura.
- **Escarpe secundario:** superficie de pendiente muy fuerte, producida por desplazamientos diferenciales dentro de la masa que se movió.
- **Cabeza:** las partes superiores del material que se mueve a lo largo del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.

Figura 6. **Características de un deslizamiento rotacional con flujo**



Fuente: SÚAREZ, Jaime. *Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. p. 6.

- Corona: se trata del sector de la ladera que no ha fallado, se localiza adyacente al escarpe principal.
- Superficie de falla: corresponde al área debajo del movimiento que delimita el volumen de material desplazado.
- Pie de la superficie de falla: la línea de intersección (algunas veces cubierta) entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.
- Base: el área cubierta por el material desplazado, debajo del pie.
- Punta: el punto de la base que se encuentra a mayor distancia de la corona.
- Costado o flanco: perfil lateral del movimiento.

1.1.2. Balance morfogenético

Según Tricart, el balance morfogenético depende del valor de la pendiente, de la naturaleza de las rocas y del clima.⁵ En sí, se trata de una interdependencia entre dos componentes que actúan sobre una ladera y su evolución está en función de la magnitud de las mismas.

Gutiérrez Elorza establece que las fuerzas morfogenéticas que se ejercen en una ladera son la componente perpendicular y la paralela.⁶ La primera incluye los procesos de meteorización y edafogénesis y la segunda se refiere al desplazamiento de los materiales por la acción de la gravedad.

En la ocurrencia de un deslizamiento intervienen varios factores, que actúan de forma individual o simultánea. Por lo que, con el fin de entender las causas y desarrollo de la inestabilidad, se pueden diferenciar dos grupos principales: condicionantes (que propician el hecho de que una pendiente sea inestable) y activadores (que contribuyen al inicio del movimiento). Es indiscutible que la mayor parte de los casos son activados por dos o más factores, lo que dificulta predecir el comportamiento de cada fenómeno.

Factores condicionantes: son aquellos intrínsecos al sistema, caracterizan el área sobre la cual puede actuar una amenaza; predisponen al terreno a la ocurrencia de un deslizamiento. Algunos de estos factores son la topografía (natural o modificada) y la geología.⁷

⁵ TRICART, Jean. *Principios y métodos aplicados a la geomorfología*. p. 82.

⁶ ELORZA, Mateo. *Geomorfología*. p. 235.

⁷ NÚÑEZ, Laura. *Informe complementario de la cartografía geológica y geomorfológica de la cuenca del Lago Atitlán*. p. 11.

Factores desencadenantes: son aquellos parámetros externos al sistema que resultan en un aumento de los esfuerzos cortantes.⁸ Estos factores actúan como detonante de la amenaza ya que casi de manera inmediata, rompen el equilibrio de fuerzas internas en un talud, provocando primeramente el deterioro y, por resultado, la falla. Los principales factores son: precipitación, sismicidad, socavación y actividad humana.

Los deslizamientos pueden deberse a varias causas, a veces solo una suele ser la desencadenante. En algunos casos pueden producirse deslizamientos sin que exista una causa evidente desencadenante, sino que se originan por varios factores que se combinan.

1.1.3. Zonificación de amenazas

La zonificación de amenazas se define como el mapeo de áreas con igual probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento en un periodo de tiempo específico, según Varnes.⁹

Los estudios de amenaza por susceptibilidad se dejan llevar por el principio del actualismo; asumen que los fenómenos físicos que rigen el comportamiento del terreno en el pasado, serán los mismos en el presente y futuro; bajo las mismas condiciones. Para realizar una predicción espacial de los movimientos de ladera, se utiliza un mapa de susceptibilidad.

⁸ NÚÑEZ, Laura. *Informe complementario de la cartografía geológica y geomorfológica de la cuenca del Lago Atitlán*. p. 11.

⁹ VARNES, David. *Landslide hazard Zonation. A Review of Principles and practice*. p. 17.

Los mapas de susceptibilidad responden a la necesidad de proteger a los civiles, proteger la vida humana. Su interés fundamental está en la susceptibilidad a aquellos tipos de movimiento que podrían generar vulnerabilidad. Por lo que acertar en el pronóstico de la determinación de las zonas más susceptibles a la ocurrencia de movimientos de ladera, en función de un número de casos conocidos con respecto a la realidad, es prioridad.

1.1.4. Análisis de susceptibilidad a movimientos de ladera mediante SIG

La zonación de susceptibilidad tiene varios puntos de interés, una de las principales aplicaciones es valorar las condiciones geotécnicas de estabilidad para la planificación de urbanizaciones, obras civiles o movimientos de tierras. Es por ello, que el mapa de susceptibilidad se debe emplear como una guía que muestra las zonas en las que las intervenciones mencionadas anteriormente puedan ser ejecutadas en cuanto a la posible inestabilidad del terreno.

En palabras de Vahrson:

Los mapas generados se utilizan y aplican como instrumentos en la toma de decisiones para los procesos de planificación del uso del terreno, explotación de recursos naturales y el desarrollo de infraestructura, urbanismo y líneas vitales. El resultado de su aplicación será una mejor comprensión de los fenómenos naturales en el área de estudio, lo cual incide en su desarrollo eficiente y duradero.¹⁰

¹⁰ MORA, Rolando. *Mapa de Amenaza de Deslizamientos, Valle Central, Costa Rica*. p. 13.

Según Irigaray Fernández, la metodología para la elaboración de mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera en sistemas de información geográfica, se ha desarrollado obteniéndose valiosos resultados en cuanto a la influencia de los factores que determinan las condiciones de inestabilidad y los factores activadores.¹¹

Se necesita una correcta identificación de las áreas inestables (inventario de movimientos de ladera) y un conocimiento de los factores que afectan a la estabilidad de taludes y laderas naturales (factores condicionantes o determinantes).

Bajo ninguna circunstancia, esta metodología viene a sustituir los estudios geotécnicos de campo y laboratorio necesarios para el diseño y concepción de las obras civiles y sus complementos de protección y mitigación correspondientes. Adicionalmente, la metodología tampoco es capaz de pronosticar el tipo de deslizamiento que podría presentarse.

1.1.5. Aplicaciones de SIG en Guatemala

Los sistemas de información geográfica en Guatemala se comenzaron a aplicar durante la década de los noventa, aunque inicialmente fueron pocos los centros que tuvieron acceso a este tipo de tecnología, tomaron auge cuando en 1998, año en el que la tormenta tropical Mitch causó grandes daños al país, se dieron a conocer las grandes ventajas que se tenía para manejar información espacial y realizar modelizaciones.

¹¹ IRIGARAY FERNÁNDEZ, Clemente et al. *Inventario de movimientos de ladera en el borde noreste de la Sierra de los Guájares (Granada) mediante un SIG*. p.11.

Los primeros centros en utilizar esta información fue el Instituto Geográfico Nacional y el Ministerio de Agricultura. Con el apoyo del gobierno holandés se creó el laboratorio de sistemas de información geográfica, cuya visión fue la de generar información digital que ayudara a crear una base de datos que pudiera ser utilizada en el futuro para el análisis y modelamiento espacial. Objetivo que luego se cumpliría al generar una serie de mapas temáticos de todo el país relacionado con algunos riesgos naturales e información para la prevención de estos.

Se generaron mapa de pendientes topográficas, coberturas vegetales y forestales, series de suelo, isoyetas de temperaturas anuales y mensuales, precipitación, vulnerabilidad a los deslizamientos, vulnerabilidad alimentaria, y en base a la información del Instituto Geográfico Nacional se generó el modelo de elevación digital a escala 1:250 000 y 1:50 000, el mapa de uso de suelo actual.

En el año 2000, el Ministerio de Comunicaciones desarrolló un inventario vial de todas las carreteras registradas no pavimentadas del país, con el propósito de crear un sistema de gestión vial en el cual se pudiera relacionar la información de los trabajos asignados en los diferentes proyectos licitados y al avance de la ejecución de los mismos.

El proyecto de establecimiento catastral de la Ciudad de Guatemala incorporó a su base de catastral un poco más de 285 000 predios; esto comenzó con la toma de fotografías aéreas durante los años 1999 – 2000 a una escala de vuelo de 1:6 000, que sirvió para crear las restituciones para la cartografía básica que luego se actualizaría por medio de trabajo de campo. Toda esta información, tienen un rango de precisión menor a 10 centímetros.

Con la creación y vigencia de la ley del Registro Catastral, se gestionó la toma de fotografías aéreas para generar las ortofotos que sirven para el levantamiento catastral del país.

1.2. Antecedentes del problema

En Guatemala se carece de registros históricos de muchos eventos volcánicos de tiempos remotos. Los registros más antiguos quizás daten del siglo XVI, donde se narran los sucesos del 11 de septiembre de 1541. Hubo intensas lluvias en los poblados aledaños al volcán de Agua que causaron la falla de las paredes del cráter del volcán, provocando un lahar de grandes proporciones.

Como consecuencia murieron más de 600 personas, hubo pérdidas en los cultivos y animales de carga; el poblado fue trasladado a lo que hoy se conoce como Antigua Guatemala.¹²

Otro cuerpo volcánico que ha producido muchos daños en diferentes ocasiones, es el volcán Santa María así como su domo Santiaguito, ambos localizados en el departamento de Quetzaltenango.

Luego de cierto período de actividad baja entre 1972 a 1975 la actividad eruptiva del volcán Santiaguito incrementó y fue, entre los últimos días de junio de 1983, que se produjo un lahar que descendió por el río Nimá I y Nimá II afectando a la población de El Palmar, estimándose una pérdida de más de 1 millón de quetzales y la evacuación de más de 244 familias.

¹² *Lahar Hazards at Agua Volcano. Open-File Report 1-432.* p. 8.

Figura 7. **Daños en municipio El Palmar**



Fuente: *Zonificación de Amenazas Cuenca Río Samalá*. p. 13.

Uno de los primeros estudios analíticos sobre deslizamientos fue conducido por científicos de la USGS, en respuesta al huracán Mitch de 1998. Su análisis reveló 11 500 deslizamientos en el este guatemalteco, con variables de laderas y elevación. Llegaron a la conclusión que, lugares con laderas menores a 9°, no eran susceptibles a movimientos de ladera.

De acuerdo con un reporte de las Naciones Unidas de los efectos del huracán Stan, el impacto económico que tuvo fue de US\$983 000 000 con 719 000 hectáreas de tierra perdida por inundaciones, deslizamientos y erosión. El reporte también indica que la mayor parte del daño ocurrió en áreas habitadas por poblaciones indígenas donde se estima que la pérdida en agricultura fue aproximadamente 5,6 millones de dólares (Q43 000 000).¹³

¹³ BUCKNAM, Robert C *et al.* *Deslizamientos de Tierra Inducidos por el Huracán Mitch en Guatemala – Inventario y Discusión*. p. 7.

Tabla I. **Deslizamientos registrados en Centroamérica durante huracán Mitch**

País	Fuente	Período de tiempo	# Eventos Desinventar	# Eventos H. Mitch	Viviendas destruidas	Muertos
Guatemala	CONRED, INSIVUMEH	1988-2010	879	no datos	258	668 ¹⁾
El Salvador	SNET	1906-2011	1,095	no datos	2404	1315
Honduras	COPECO	1966-2010	560	9,800 ³⁾	119	20 ²⁾
Nicaragua	INETER	1826-2003	78 ⁴⁾	17,000 ³⁾	ND	2500
Costa Rica	CNE	1970-2010	2,083	no afectó	197	307
Panamá	SINAPROC	1990-2009	331	no afectó	41	72

Desinventar - Los datos se obtuvieron del sistema Desinventar

¹⁾ Incluye el evento de 1541 en el volcán Agua.

²⁾ Los deslizamientos relacionados con el Huracán Mitch están sub representados

³⁾ Deslizamientos mapeados con fotos aéreas y imágenes de satélite

⁴⁾ Dévoli et al. (2007)

ND No hay datos

Fuente: *Guía para la implementación y sostenibilidad de sistemas de alerta temprana ante deslizamientos en América Central*. p. 13.

En octubre de 2005, el huracán Stan causó intensas precipitaciones en gran parte del territorio de Guatemala. Esta lluvia incesante resultó en deslizamientos, *debris flows* y flujos de lodos. Panabaj, en el municipio de Santiago Atitlán fué afectado por un deslizamiento de material piroclástico que desencadenó un lahar originado en los flancos del volcán Tolimán.

El resultado fue un promedio de 500 personas desaparecidas, pérdida de zonas de cultivo, destrucción de puentes peatonales y la severa afectación de alcantarillado, red de distribución de agua y electricidad. Casi simultáneamente en San Juan la Laguna, una comunidad fue destruida por un lahar originado en el volcán San Pedro junto con otros desprendimientos de laderas (en la parte más abrupta de la cuenca) que contribuyeron al flujo.

Figura 8. Flujo de detritos del volcán Tolimán



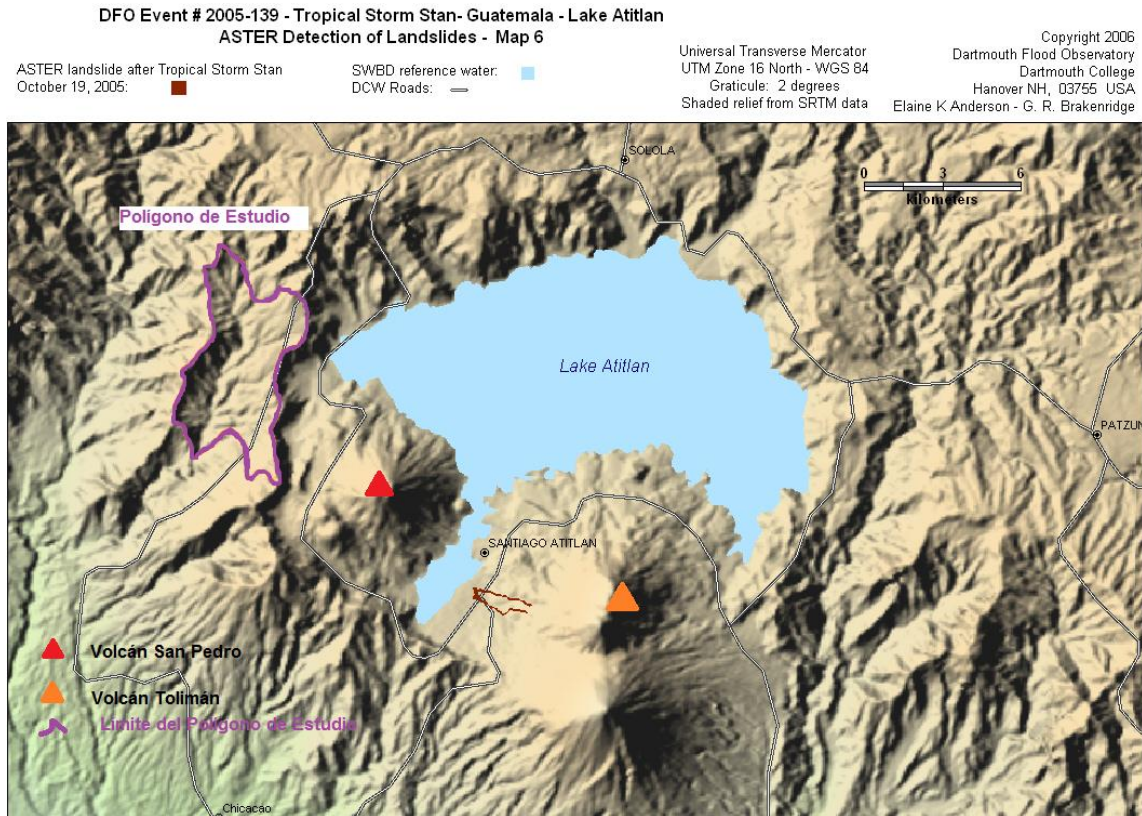
Fuente: *Informe técnico INSIVUMEH: evaluación del alud tipo lahar que soterró al cantón de Panabaj y afectación del cantón de Tzanchag.* p. 4.

Figura 9. Bloques y lodos en las cercanías de aldea Tzanchag



Fuente: *Informe técnico INSIVUMEH: evaluación del alud tipo lahar que soterró al cantón de Panabaj y afectación del cantón de Tzanchag.* p. 4.

Figura 10. Aster mostrando estragos por tormenta Stan



Fuente: *Tropical storm Stan - Central America and southern Mexico. Dartmouth Flood Observatory, Dartmouth College. p. 4.*

Según Newhall, existe evidencia geológica que indica que procesos laháricos y de *debris flow* han sido recurrentes y han afectado los alrededores de la actual caldera por al menos 35 000 años. Adicionalmente, la batimetría del lago revela irregularidades topográficas compuestas por sedimentos con espesores de entre 10 y 15 metros de espesor que corresponden posiblemente a un gran deslizamiento ocurrido hace mil años.¹⁴

¹⁴ NEWHALL, Christopher. *Geology of the Lake Atitlán Region, Western Guatemala. p. 7.*

Medina, realiza el análisis de ambos eventos, Mitch y Stan, que se resumen en un estudio que presenta datos de laderas críticas que van desde los 30 a los 50 grados que son altamente susceptibles a movimientos de ladera; y que las que son menores o iguales a 15° indican áreas llanas donde es menos probable que se forme un abanico aluvial o un cono de detritos.¹⁵

Estudios a gran escala en las municipalidades de Santiago Atitlán y Santa Catarina Ixtahuacán, han sido conducidos por la Coordinadora Nacional para Reducción de Desastres (CONRED) en 2005 y 2014. Ambos reportes describen deslizamientos y sus efectos en comunidades locales.

Posteriormente, Riesgos en los Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Área Metropolitana de San Salvador (IPGARAMSS 2008) introdujo un enfoque innovador hacia el estudio de movimientos de masa usando sistemas de información geográfica. Esta metodología relaciona las ubicaciones de los deslizamientos con otra serie de capas que se montan sobre el área de estudio y luego se le asigna un valor a cada variable. El resultado es una matriz espacial con categorías de susceptibilidad.

¹⁵ MEDINA, Byron Yuri. *Deslizamientos e Impactos ambientales de los Huracanes Mitch y Stan en Guatemala*. p. 31.

2. CARACTERÍSTICAS REGIONALES

2.1. Localización geográfica

El polígono de estudio se encuentra en jurisdicción de los municipios de Santa María Visitación, Santa Clara la Laguna y San Juan la Laguna; en los alrededores de las aldeas: Chuipoj, Paquib, Montecristo, Cipresales y caseríos: Chitún, Palestina y Panyever.

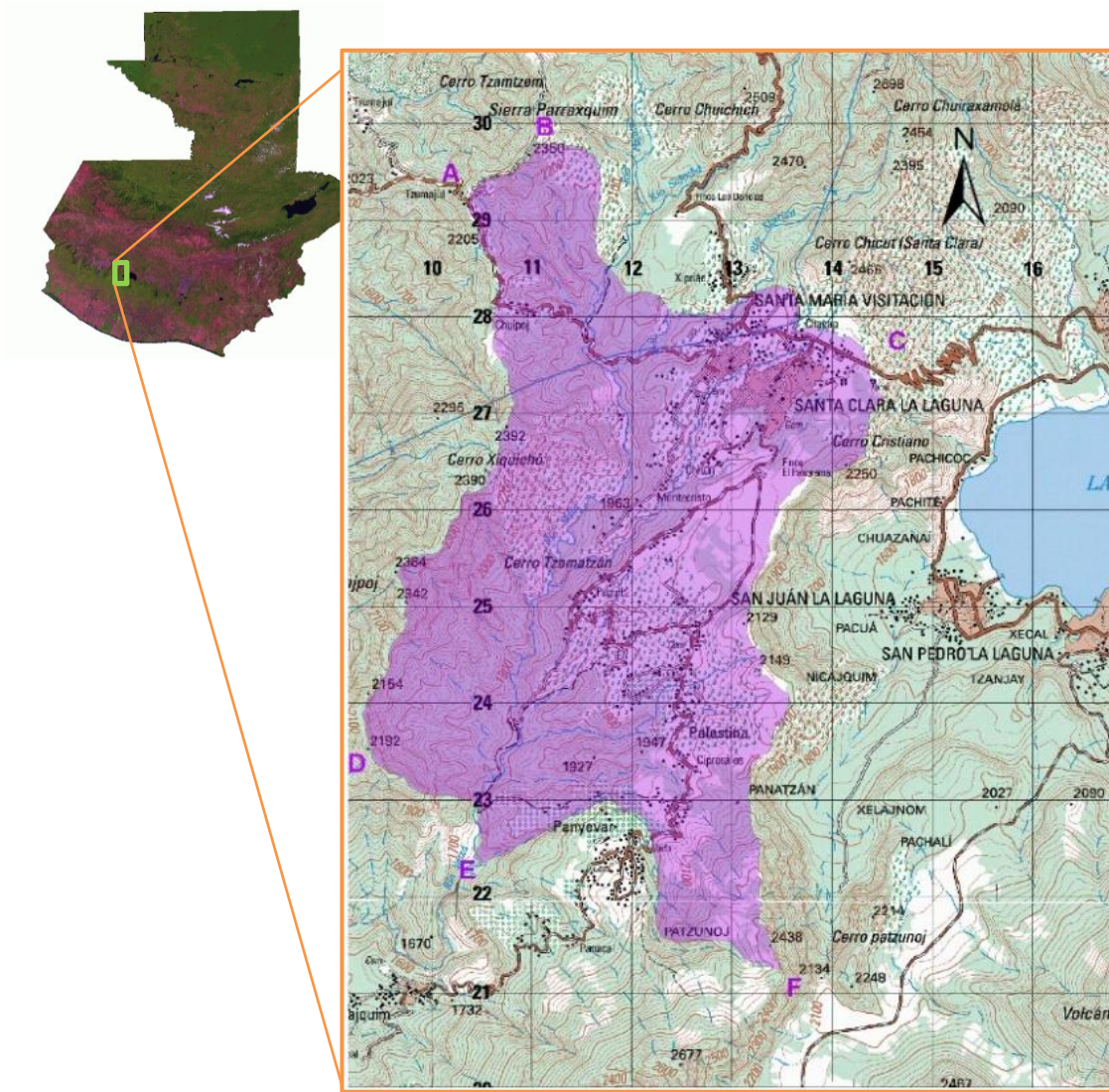
El estudio comprende una extensión de 22,3 kilómetros cuadrados, localizados en la hoja cartográfica, Santa Catarina Ixtahuacán (1960 III) publicada por el Instituto Geográfico Nacional a escala 1:50 000 con las siguientes coordenadas G.T.M:

Tabla II. **Coordenadas que delimitan el polígono de estudio**

PUNTO	LATITUD	LONGITUD
A	410386	1629299
B	411058	1629791
C	414498	1627182
D	409407	1623441
E	410496	1622356
F	413482	1621234

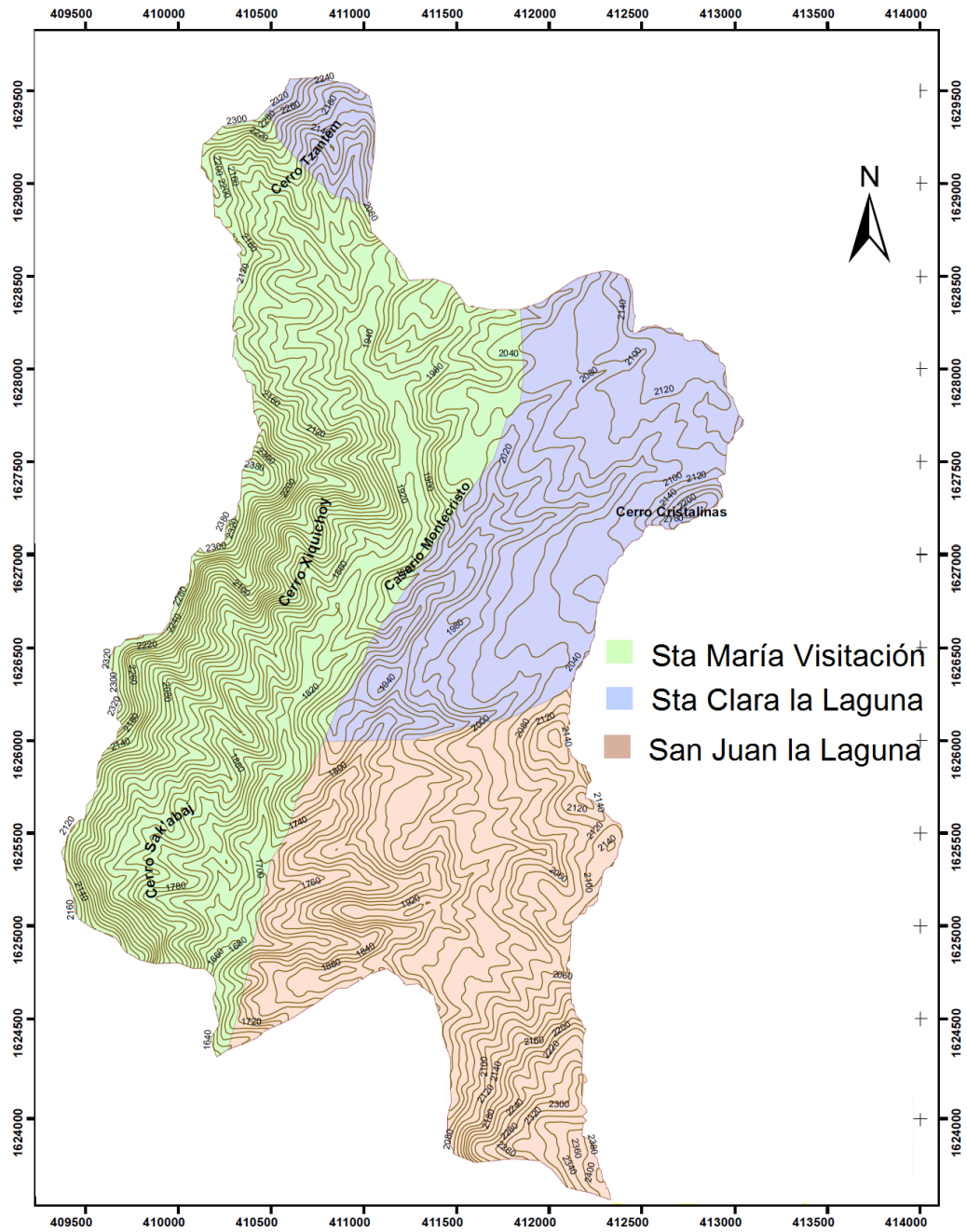
Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Mapa de ubicación**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis versión 10.3.

Figura 12. Mapa hipsométrico del polígono de estudio



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis versión 10.3.

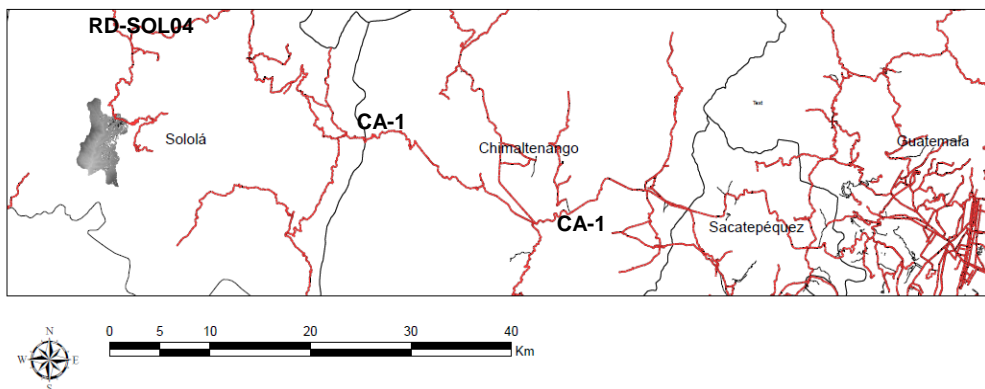
2.2. Vías de acceso

El municipio de Santa María Visitación se encuentra a 163,2 kilómetros al occidente de la ciudad de Guatemala y a 28,2 kilómetros al occidente de la cabecera departamental de Sololá.

Se accede a la carretera CA-1 desde la ciudad capital, con dirección hacia el occidente. En el kilómetro 148, se toma un desvío por la carretera RD SOL-04 hasta el kilómetro 162,2. Es aquí donde se encuentra la entrada al municipio de Santa María Visitación. Esta carretera es de concreto, atraviesa los municipios de Santa Clara La Laguna, San Pablo La Laguna y San Juan La Laguna.

Desde el caserío Chuipoj, el municipio de Santa María Visitación dispone de otra vía proveniente de la comunidad de Guineales, departamento de Suchitepéquez. Pasa por el municipio de Nahualá, es de terracería y solo es transitable en época seca.

Figura 13. Vías de acceso al polígono de estudio



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis versión 10.3.

2.3. Geología regional

En el altiplano guatemalteco, la cuenca del lago Atitlán es una caldera de colapso, su actividad volcánica empezó en el pleistoceno tardío (hace 11-12 millones de años). Tres ciclos de crecimiento de estratovolcanes quedaron grabados en la historia geológica de los alrededores. El polígono de estudio está siendo afectado por el segundo ciclo (10-8 millones de años) que termina con un evento de erupción de flujos de ceniza, el colapso que forma la caldera Atitlán II y la última etapa de la inyección de diques en anillo.

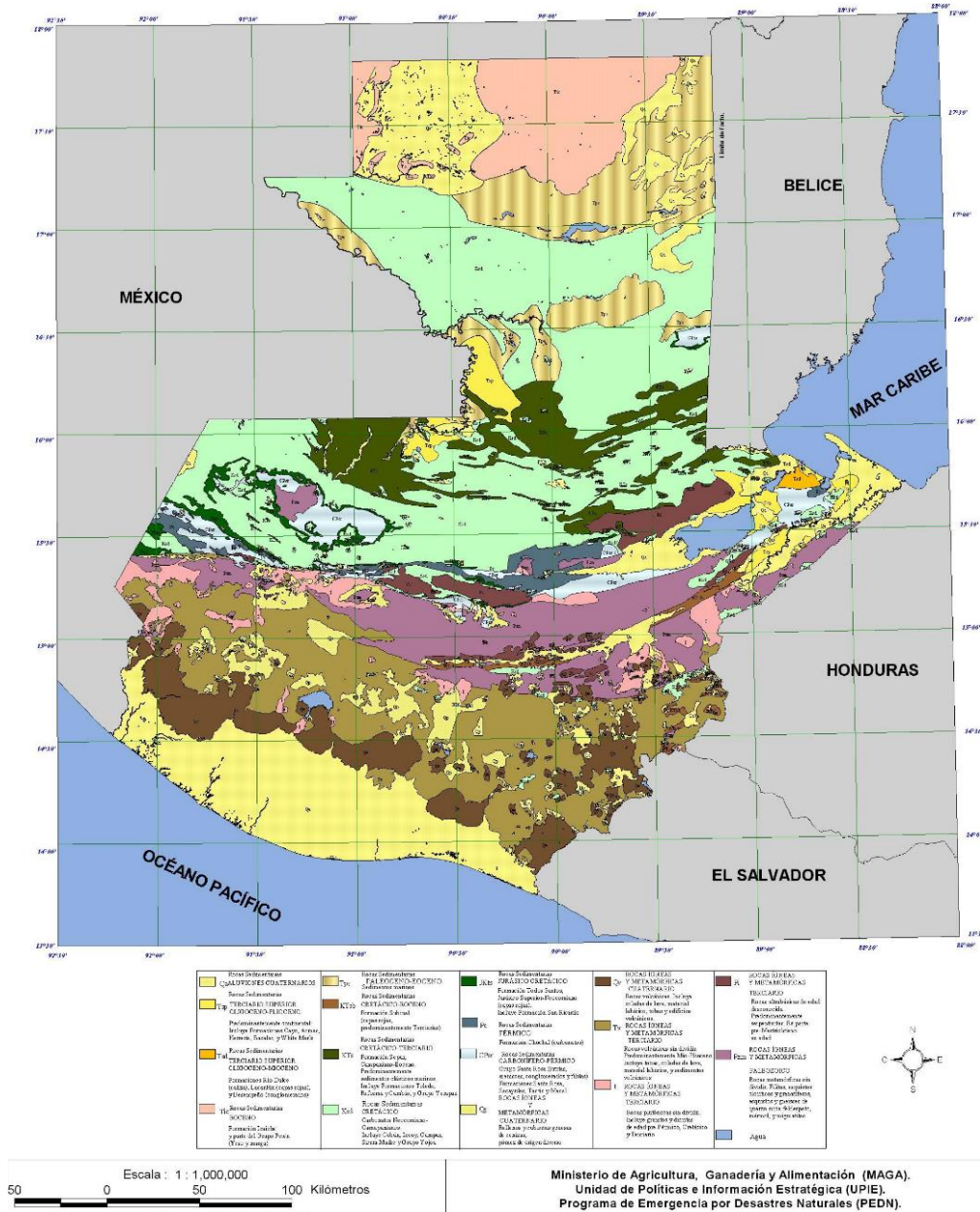
Según Newhall, el tercer ciclo (hace aproximadamente 1,8 millones de años) incluye el crecimiento de los estratovolcanes cuaternarios, las voluminosas erupciones del batolito Chocoyos y una menor cantidad de erupciones siliciclásticas que formaron la actual caldera Atitlán III y el crecimiento de los modernos estratovolcanes San Pedro, Tolimán y Atitlán.¹⁶

La caldera de Atitlán ha hecho erupción por lo menos cinco veces en los últimos 84 000 años. Las mediciones de flujo de calor, el registro geológico de erupciones post-caldéricas y la inexplicable fluctuación del nivel del lago actual, sugiere que hay remanentes de magma en el fondo del lago y que futuras explosiones son posibles, según Rose.¹⁷

¹⁶ NEWHALL, Christopher. *Geology of the Lake Atitlán Region, Western Guatemala*. p.9.

¹⁷ ROSE, William, et al. *Quaternary Silicic Pyroclastic Deposits of Atitlán Caldera, Guatemala*. p.4.

Figura 14. Mapa geológico regional



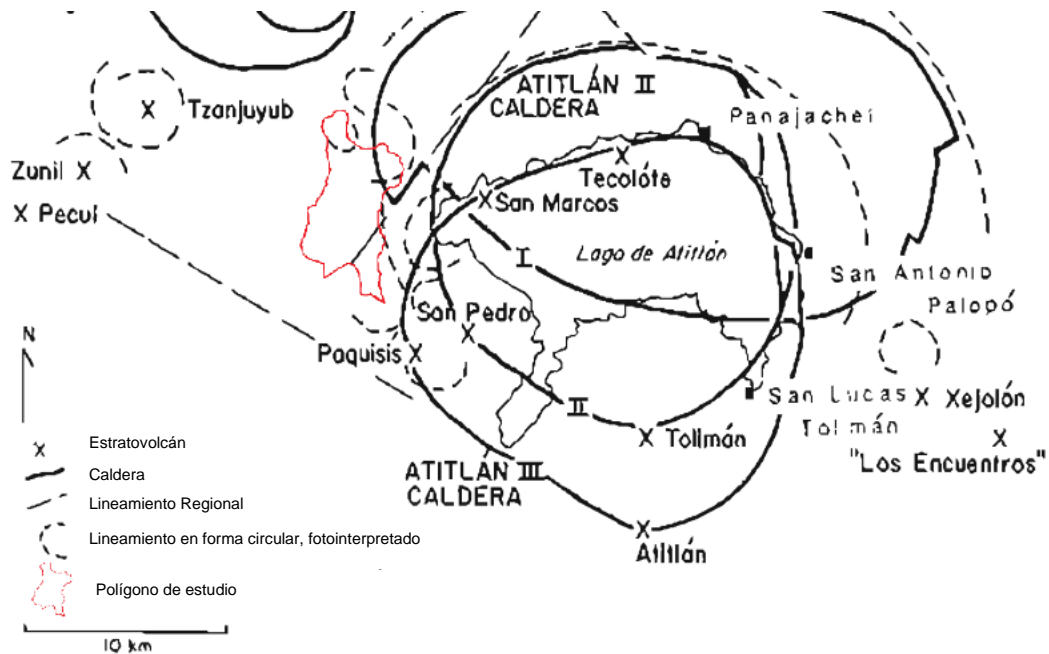
Fuente: Mapa Geológico de la República de Guatemala. Instituto Geográfico Nacional.

Figura 15. Geología en los alrededores del polígono de estudio



Fuente: Mapa Geológico de la República de Guatemala. Instituto Geográfico Nacional.

Figura 16. Migración al suroeste de la caldera Atilán



Fuente: NEWHALL, Christopher. *Quaternary Deposits of Atilán Caldera, Guatemala*. p. 4.

2.4. Litostratigrafía

La base de datos del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA), describe las rocas más antiguas como intrusivos graníticos y dioríticos del cretácico, que limitan a la unidad al oeste y al este. Siendo la mayor cantidad de rocas, lavas andesíticas y riolíticas, las cuales están cubiertas en la superficie por una capa de espesor considerable de depósitos de caída.

En 2012, se realiza una cartografía geológica y geomorfológica detallada de los alrededores de la cuenca del lago de Atitlán donde se describen procesos y unidades litológicas asociadas a los ciclos de colapso de la caldera Atitlán.

2.4.1. Unidad de rocas graníticas

Esta unidad está directamente relacionada con el crecimiento e intrusiones de antiguos estratovolcanes. Diversos volúmenes de magma dieron lugar a rocas plutónicas como granitos. Se reporta que las rocas plutónicas más comunes en la cuenca son diversos granitos y granodioritas, que constituyen al menos la mitad de las rocas plutónicas del área.¹⁸ Según L. Núñez Álvarez, también aparecen intrusiones de estado tardío dentro de granitos biotíticos.¹⁹

¹⁸ ROSE, William, et al. *Quaternary Silicic Pyroclastic Deposits of Atitlán Caldera Guatemala*. p.4.

¹⁹ NÚÑEZ, Laura. *Informe complementario de la cartografía geológica y geomorfológica de la cuenca del Lago Atitlán*. p. 24.

2.4.2. Unidad de flujos de lavas, lodos y piroclastos

Está asociada a complejos estratovolcánicos terciarios-cuaternarios, sedimentos de relleno de caldera II y lavas discordantes que se presume tienen origen de los antiguos estratovolcanes (hoy en día erosionados).

2.4.3. Unidad de depósitos piroclásticos de caída

Se debe a una secuencia de erupciones que vaciaron la cámara magmática del batolito Chocoyos. Hoy en día se registran hasta 200 metros de rellenos de valle.

Aparecen laminados, bien clasificados (granulométricamente), predominan vitroclastos del tamaño de cenizas, lapilli y bombas, siguiendo una trayectoria balística. La composición es esencialmente silícica y según Sendra, pueden presentar un grado bajo-medio de compactación y adquirir un cierto carácter tobáceo.²⁰

2.4.4. Unidad de depósitos aluviales

Esta unidad se constituye por cantos rodados inmaduros, texturalmente hablando; bloques que sobrepasan el metro de ancho, que se desprenden de paredes de antiguos conductos de circulación de magma y por fragmentación de antiguas coladas de lava.

²⁰ SENDRA LÓPEZ, Gemma. *Estudio Hidrogeológico Preliminar de la Parte Alta de la Microcuenca de Tzozomá, Sololá.* p.14.

La fracción más fina proviene principalmente de los depósitos piroclásticos que son arrastrados por la corriente y la meteorización mecánica que sufren bloques más grandes, disgregándose al tamaño de arenas, limos y arcillas.

2.4.5. Unidad de coluviones

Pueden encontrarse en las partes más bajas de las laderas, se origina por material que se desprende de las mismas. A diferencia del material de la unidad de aluvión, estos bloques no son transportados grandes distancias, son texturalmente inmaduras. Existen registros de esta unidad, al pie de laderas de borde de caldera.

2.5. Tectónica

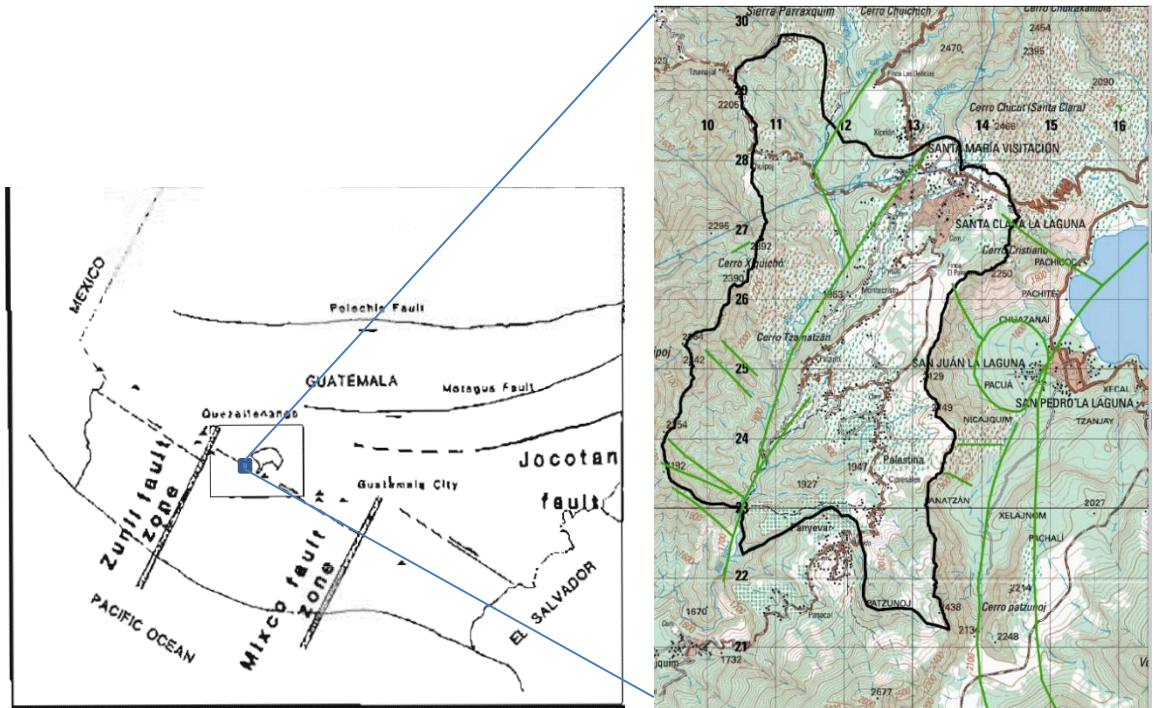
Newhall describe una tendencia de fracturas de dirección este - oeste, al norte del área de estudio, relacionándolas con el movimiento relativo de la placa del Caribe hacia la placa Norteamericana.²¹ También evidencia en la incidencia que tiene el Sistema de Falla de Zunil (SFZ) en áreas aledañas al estudio (figura 17); mostrando lineamientos con dirección noroeste y sureste.

Según Rose, si se toma de referencia el lago de Atitlán, hacia el este, las fracturas transversales al cinturón volcánico muestran una tendencia más al norte; la falla de Zunil se ha trazado 25 kilómetros hacia Totonicapán y el volcán Siete Orejas y Chicaval están alineados al noreste.²²

²¹ NEWHALL, Christopher. *Geology of the Lake Atitlán Region, Western Guatemala*. p.9.

²² ROSE, W. et al. *Quaternary Silicic Pyroclastic Deposits of Atitlán Caldera Guatemala*. p.4.

Figura 17. Fallas regionales identificadas en el polígono de estudio



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis versión 10.3.

2.6. Geomorfología

2.6.1. Hidrología

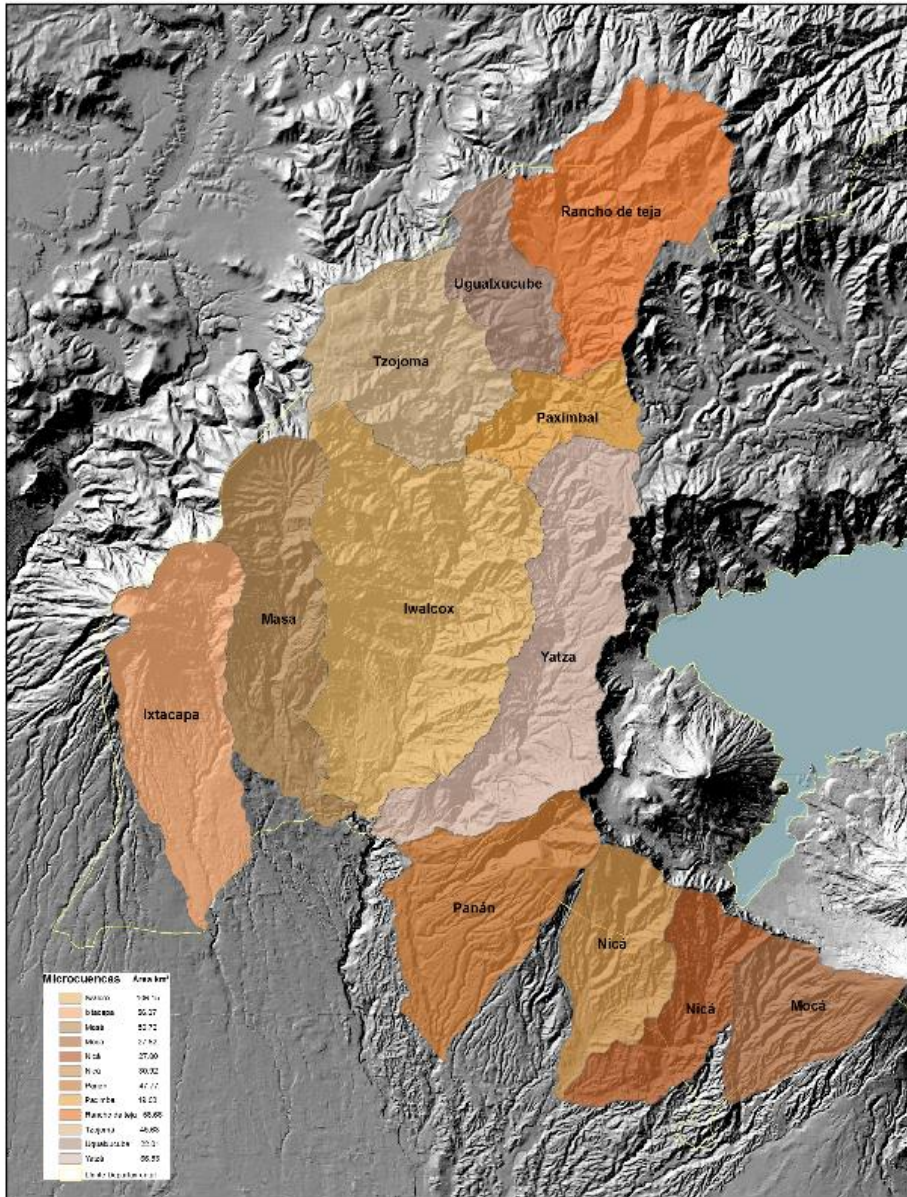
La microcuenca del río Yatzá forma parte de una serie de microcuencas del río Nahualate (figura 18). Limita al norte con la microcuenca Paximbal, al sur con la del río Panaán, al oeste con la microcuenca Iwalcox y al este con la cuenca del lago de Atitlán. El polígono de estudio se encuentra al centro de la microcuenca en cuestión y ocupa 22,3 km².

Numerosos cursos fluviales, tanto estacionales como permanentes, además de los ríos principales, Xiprián y Yatzá, drenan sus aguas hacia la microcuenca. La mayoría de drenajes intermitentes aportan caudal por incisión fluvial, laderas debajo de los cerros Xiquichoy, Tza'ntem y Sak'abaj.

El río Yatzá nace en las faldas del cerro T'zantem, en el municipio de Santa Catarina Ixtahuacán. Recorre todo el municipio de Santa María Visitación hasta su extremo sur, bordea el caserío Montecristo y pasa a territorio de San Juan la Laguna. Cabe mencionar, que aquí desemboca el sistema de drenajes de Santa Clara la Laguna.

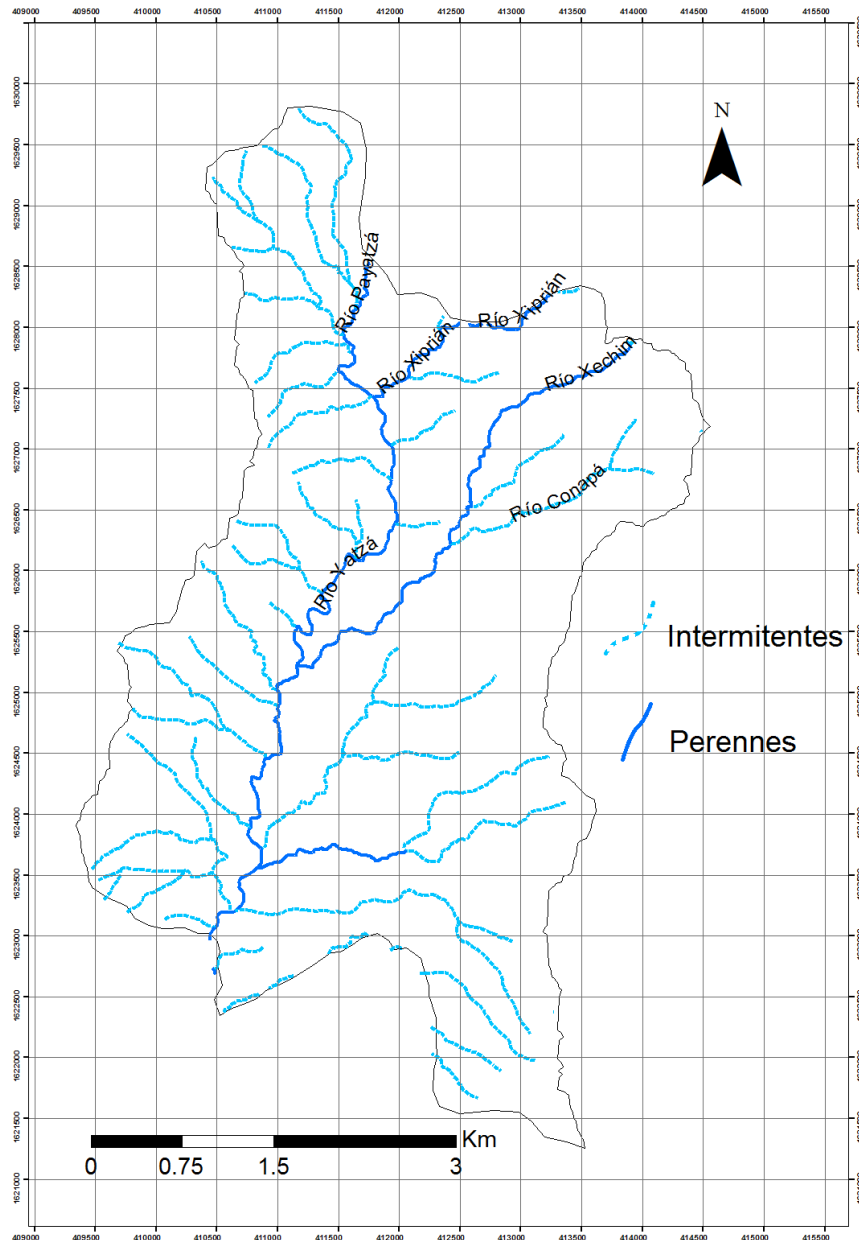
Los ríos secundarios: Xiprián y Tz'ulu son alimentados por varios nacimientos en el norte del municipio de Santa Clara la Laguna en la sierra Parraxquim, son poco caudalosos y se utilizan para riego de cultivos aledaños. Además, se inventariaron 9 nacimientos de agua ubicados en la localidad de Santa María Visitación en diferentes puntos del cerro Xiquichoy; todos aportando su caudal al río Yatzá.

Figura 18. Microcuencas del río Nahualate



Fuente: taller de Sistemas de Información Geográfica (SIG), Asociación Vivamos Mejor.

Figura 19. **Cauces fluviales del polígono de estudio**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis versión 10.3.

En base al mapa de climas de Thornwhite, predominan dos tipos de clima que son: muy húmedo semicálido y húmedo templado con invierno benigno o húmedo con invierno seco. Gran parte de la humedad efectiva está en forma de condensaciones de niebla, comunes durante todo el año.

La estación lluviosa que abarca el período comprendido entre los meses de mayo y octubre. El mes de junio y septiembre presentan los valores más altos de lluvia, con 313,7 milímetros y 299,8 milímetros, respectivamente. Se registra una disminución representativa entre los meses de julio y agosto con 182,2 milímetros.

En general, el Plan Maestro de la Reserva de Uso Múltiple Cuenca del Lago de Atitlán (RUMCLA) describe la zona entre los cerros Tz'antem, Xiquichoy y Sak'abaj, como una cobertura de bosques mixtos y latifoliados que han sido intervenidos por extracción forestal y siembra de café. El Consejo Nacional de Áreas Protegidas (CONAP) considera esta zona de gran importancia para la recarga hídrica del río Yatzá.²³

2.6.2. Suelos

En la tabla 4 se describen las características de los suelos encontrados en el polígono de estudio según la clasificación taxonómica de los suelos de la República, recopilado por el Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (MAGA).

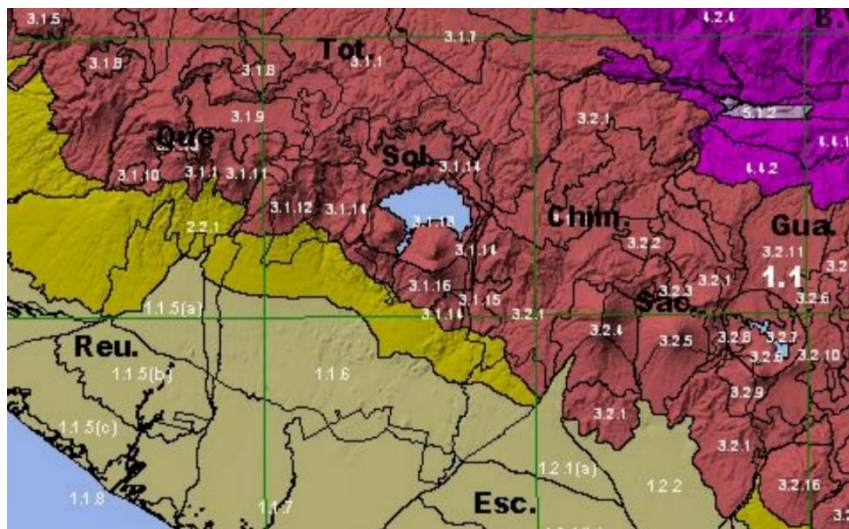
²³ CONAP. *Plan Maestro de la Reserva de Uso Múltiple Cuenca del Lago de Atitlán*. p.56.

Tabla III. Zonas de vida del polígono de estudio

Municipio	Zona de Vida	Descripción
Santa María Visitación	Bosque Muy Húmedo Montano Bajo Subtropical	El patrón de lluvias promedio promedia 1 730 mm. Las temperaturas van de 12,5 a 18,6 grados C°. La vegetación natural indicadora es: <i>Cipressus lusitánica</i> , <i>Chiranthodendron pentadactylon</i> , <i>Pinus ayacahuite</i> , <i>Pinus hartwegii</i>
Santa Clara la Laguna	Bosque Muy Húmedo Montano Bajo Subtropical	
San Juan la Laguna	Bosque Húmedo Montano Bajo Subtropical	El patrón de lluvias promedia 1 344 mm de precipitación anual. La temperatura varía de 15-23 grados C°. Su topografía en general es plana y está destinada a cultivos agrícolas. La vegetación natural típica está representada por rodales de <i>Qercus spp</i> , <i>Pinus pseudostrobus</i> y <i>Pinus montezumae</i>

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. Ampliación del mapa fisiográfico-geomorfológico



Fuente: Mapa Fisiográfico-Geomorfológico de la República de Guatemala.

Tabla IV. **Subórdenes y lineamientos generales para los suelos de los órdenes encontrados en el polígono de estudio**

Orden	Características	Suborden	Características
Andisol (and)	Suelos desarrollados sobre ceniza volcánica que tienen baja densidad aparente y con altos contenidos de alófono. Generalmente son suelos con alto potencial de fertilidad y adecuadas características físicas para su manejo. En condiciones de fuerte pendiente tienden a erosionarse con facilidad.	Udands	Andisoles que no están secos en su interior por más de 90 días en el año. Tienen determinado contenido de humedad la mayor parte del año. Poseen alto potencial para la agricultura, pero deben considerarse las limitantes que presentan en términos generales los andisoles y en este caso debe agregarse el riesgo de erosión hídrica, como consecuencia de la alta pluviosidad en los lugares donde están presentes.
		Vitrands	Son suelos con alto contenido de vidrio volcánico, lo que hace que tengan texturas arenosas. Demandan mayor cantidad de agua para actividades agrícolas, sin embargo, por sus características físicas son fácilmente trabajables. Una limitante lo constituye las pendientes fuertes.
Entisol (ent)	Suelos con poca o ninguna evidencia de desarrollo de su perfil, por consiguiente, de los horizontes genéticos. El poco desarrollo es debido a condiciones extremas, tales como, el relieve (el cual incide en la erosión; en su defecto, en la deposición superficial de materiales minerales y orgánicos) y, por otro lado, las condiciones como el exceso de agua. De acuerdo al relieve, estos suelos están presentes en áreas muy accidentadas (cimas de montañas y volcanes) o en partes planas	Psammments	Son los Entisoles más arenosos, que se encuentran en superficies poco inclinadas y con menos del 35% de fragmentos rocosos. Generalmente se encuentran en las áreas más cercanas a los ríos o en áreas de actividad volcánica muy reciente. No tienen capas deposicionales de materiales minerales en su interior. En muchas áreas, están cubiertos con bosque de galería, y en otros casos están cultivados y forman parte de lo que los agricultores llaman los suelos de vega.

Fuente: *Primera Aproximación al Mapa de Clasificación Taxonómica de los Suelos de la República de Guatemala*. Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación de Guatemala.

2.6.3. Relieve

El polígono de estudio, fisiográficamente se clasifica en la región de tierras altas volcánicas, que se define como una región que se desarrolló sobre el basamento cristalino y sedimentario. La actividad volcánica lanzó grandes cantidades de material, entre ellas, basalto y riolacitas que cubrieron formaciones preexistentes. Se subdivide en: subregión zona montañosa occidental. Gran paisaje: montañas y laderas alrededor de la caldera Atitlán.

Se trata de un conjunto de lomas y colinas orientadas; las formas son redondeadas y las pendientes van del 18 % a 40 %. Las que caen a los cauces de los ríos, presentan una topografía con pendientes escarpadas.

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Etapa de recopilación y análisis bibliográfico

Esta etapa sugiere la recopilación de todo el material disponible que pudiera abarcar el polígono de estudio y sus alrededores.

Se consultaron mapas topográficos, mapas geológicos, ensayos, publicaciones, imágenes satelitales y ortofotos de los alrededores de la microcuenca Yatzá; aspectos de la geología estructural, tanto regionales como locales.

Así, se organizó un recorrido al área de estudio para realizar una etapa de reconocimiento previo a la etapa de campo. Se desarrolló el mapa base, seleccionaron las vías de acceso al polígono de estudio, se planificaron recorridos a realizar en el campo para corroborar datos fotointerpretados y se eligió trabajar con un problema de investigación que involucraba la zonificación de áreas susceptibles a movimientos de ladera.

Varios de los caminamientos planificados tenían como objetivo la visita a determinados puntos que en el pasado habían sido afectados por movimientos de ladera (a causa de tormentas tropicales, huracanes, otros) en un periodo de 10 años atrás. Para esto se emplearon imágenes de satélite que interactuando con SIG proporcionaron inventarios de entre los años 2006 - 2016.

La idea radicó en detectar las depresiones tropicales que han afectado a las personas que habitan en el polígono de estudio o a sus bienes. Se obtuvo la fecha de estos y se determinó que se podrían evaluar imágenes satelitales del año 2006 y 2010 con el objetivo de observar los daños. Actualmente estos mismos movimientos están cubiertos por vegetación, están dormidos o siguen activos.

Tabla V. **Eventos que desencadenaron movimientos de ladera**

Agatha, 2010	Se desarrolla el 14 de mayo en tierras guatemaltecas. Cobra vidas el 29 de mayo en varios puntos de la República.
Huracán Stan 2005	El 5 de octubre, ocurre la tragedia en Panabaj, Sololá.

Fuente: elaboración propia.

3.2. **Etapa de campo**

Etapa que comprendió de 45 días de campo, donde se realizó el levantamiento geológico del polígono de estudio, mediante la combinación del método de afloramientos y por caminamientos.

Se recorrieron las carreteras principales, quebradas y senderos de paso peatonal; se cubrieron los diferentes accesos que se tenían hacia los cerros municipales y a lo largo del río principal que drena la microcuenca Yatzá, que lleva el mismo nombre. Se marcaron puntos de interés mediante un GPS con un margen de error de ± 3 metros, los cuales fueron descritos en la libreta de campo.

Los datos litológicos recopilados en el campo fueron plasmados sobre el mapa base con los respectivos datos estructurales. Las unidades litológicas más representativas del polígono de estudio fueron muestreadas de forma adecuada.

Los datos estructurales fueron medidos con brújula, mediante el método *dip/direction* en sentido azimutal.

Las evidencias que se identificaron para fundamentar la investigación son, la morfología, el drenaje, la vegetación, la litología y los elementos afectados por movimientos de masa.

Se realizó un registro de movimientos de masa en fichas técnicas, donde se anotaron mediciones y observaciones con respecto al volumen de material desplazado, se registraron las actividades antrópicas o naturales que pudieron haber desencadenado dicho movimiento de ladera. Cuanto más reciente sea el movimiento, los rasgos son más evidentes; cosa que en la mayoría de los eventos, no se dió el caso.




Con la ayuda de los comunitarios se establecieron las fechas de ocurrencia de cada deslizamiento, los daños ocasionados y los factores generadores. Se examinó el material deslizado y se describieron los usos del suelo de los alrededores.

En el caso de los afloramientos representativos del área, se identificaron 6 muestras que representan a cada uno de ellos. Se extrajo muestra de mano, fotografías, coordenadas, entre otros datos. Estas muestras se describieron macroscópicamente en el sitio.

Tabla VI. Muestras representativas con descripción macroscópica

No de Muestra	Minerales Primarios		Minerales Accesorio	
	Mineral	Porcentaje (%)	Mineral	Porcentaje (%)
1. E5-002 Textura Fanerítica Leucocrática	Cuarzo Feldespato Biotita	60 28 12	- - -	- - -
Fotografía		Coordenadas	Textura	
		(G.T.M) E0410620 N1629464 Ubicación: Cerro Tzantem	* Fenocristales subhedrales de cuarzo de hasta 5mm * Cristales subhedrales de feldespato, de hasta 1mm * Cristales anhedrales de biotita de hasta 2mm, alargados.	
No de Muestra	Minerales Primarios		Minerales Accesorio	
	Mineral	Porcentaje (%)	Mineral	Porcentaje (%)
2. E102 Holocristalina Fanerítica Mesocrática	Cuarzo Feldespato K Biotita	45 14 8	Anfiboles Piroxenos Magnéticos	18 5 10
Fotografía		Coordenadas	Textura	
		(G.T.M) E0411008 N1625061 Ubicación: Río Yatzá	* Granos subhedrales de cuarzo de hasta 5 mm * Cristales de feldespato rosa, subhedrales. Hasta 2mm de diámetro * Cristales euhedrales de anfíboles, tabulares de hasta 5mm	
No de Muestra	Mineral	Porcentaje (%)	Mineral	Porcentaje (%)
3. 684 Holocristalina Textura Afanítica Leucocrática	Cuarzo Feldespato K Biotita	51 48 18	- - -	- - -
Fotografía		Coordenadas	Textura	
		(G.T.M) E0409541 N1623309 Ubicación: Cerro Sak'abaj	* Los cristales de cuarzo y feldespato no superan el milímetro de diámetro * Las biotitas se presentan subhedrales y varían su tamaño entre 2 y 3 milímetros de diámetro	

Continuación tabla VI.

No de Muestra	Minerales Primarios		Minerales Accesorio	
	Mineral	Porcentaje (%)	Mineral	Porcentaje (%)
4. 432 - Lahar	Plagioclasas	55	Piroxenos	15
Holocristalina	Feldespato K	20	-	-
Textura Porfídica	Vidrio***	10	-	-
Mesocrática				
Fotografía		Coordenadas	Textura	
		(G.T.M) E0411778 N1624831 Ubicación: Paquip	* Fenocristales de plagioclasas entre una matriz fina * Grado de meteorización III	
No de Muestra	Minerales Primarios		Minerales Accesorio	
	Mineral	Porcentaje (%)	Mineral	Porcentaje (%)
5. 121	Cuarzo	45	-	-
holocristalina	Feldespato K	48	-	-
textura fanerítica	Biotita	7	-	-
Leucocrática				
Fotografía		Coordenadas	Textura	
		(G.T.M) E0410609 N1624855 Ubicación: Cerro Xiquichoy	* Cristales Subhedrales de cuarzo de hasta 3mm *Cristales subhedrales de feldespato. Hasta 3mm * biotitas cizalladas de hasta 3mm * Muestra notablemente equigranular	
No de Muestra	Minerales Primarios		Minerales Accesorio	
	Mineral	Porcentaje (%)	Mineral	Porcentaje (%)
6. 124	Cuarzo	45	-	-
gouge(?)	Feldespato K	42	-	-
En General:	Biotita	5	-	-
Textura Afanítica				
Fotografía		Coordenadas	Textura	
		(G.T.M) E0410534 N1624712 Ubicación: Cerro Xiquichoy	* Tamaños de grano submicroscópico (<10 micras) a microcristalino. Se presume es harina tectónica producto de la cizalla. Contiene varios minerales intercalados que no pueden ser descritos por el tamaño de grano. Será analizado en sección delgada	

Fuente: elaboración propia.

3.3. Etapa de laboratorio

Contempla el análisis de las muestras mediante la lupa binocular y la elaboración de secciones delgadas para el posterior análisis en el microscopio petrográfico. Con esto, se complementan las descripciones de las unidades que se identificaron en el área de estudio.

Para el análisis en lupa binocular, se trituraron 4 muestras de las unidades representativas del polígono de estudio, con la ayuda de un mortero y un pistilo. Las partículas que poseían propiedades magnéticas fueron aisladas, cuantificadas y fotografiadas; el resto fue también segregado de acuerdo a sus propiedades físicas más destacadas (color, brillo, clivaje, fractura) para obtener porcentajes minerales.

3.3.1. Análisis con lupa binocular de muestra E5-002

En general, la muestra presentaba textura fanerítica, hololeucocrática y holocristalina. Se identificaron fenocristales subhedrales de cuarzo de hasta 5mm (grano medio), cristales subhedrales de feldespato de hasta 1 mm (grano fino), cristales subhedrales y anhedrales de biotita de hasta 2 mm, cristales tabulares, color negro de ilmenita.

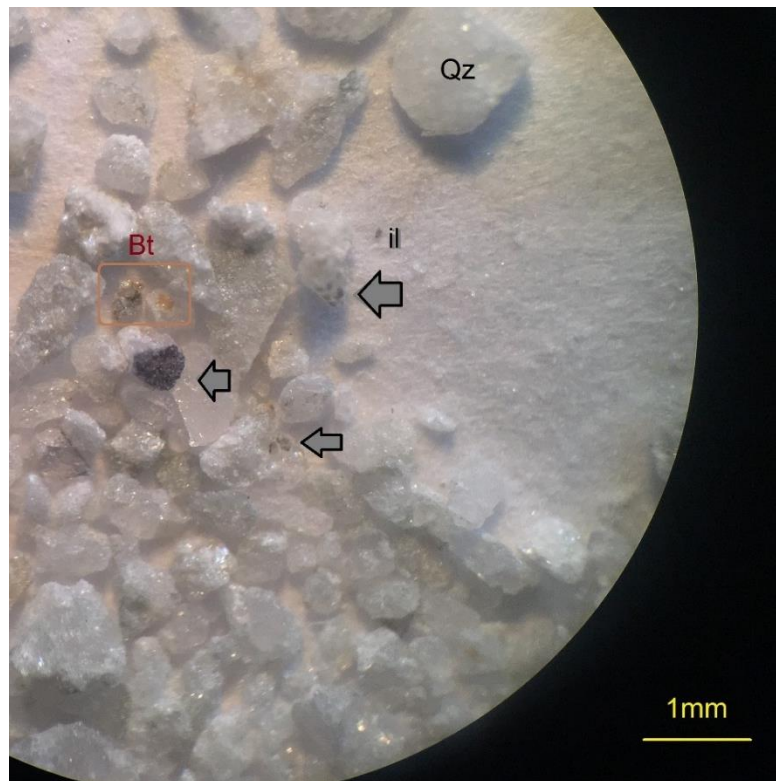
Los cristales lechosos de cuarzo contienen un mineral de tonalidades verde musgo a verde oscuro que puede tratarse de clorita, un piroxeno o un anfíbol. También pueden apreciarse inclusiones de ilmenita color negro. Por su contenido de óxidos de hierro presenta coloraciones anaranjadas entre los planos de fractura en el afloramiento.

Tabla VII. **Minerales principales encontrados en muestra E5-002**

Minerales primarios		Minerales Secundarios	
Cuarzo	59 %	Magnetita	1 %
Feldspatos	10 %	Ilmenita	10 %
		Piroxeno/anfíbol verde	20 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Minerales de cuarzo, biotita e ilmenita en muestra E5-002**



Fuente: Asociación Vivamos Mejor.

3.3.2. Análisis con lupa binocular de muestra E102

En general, la muestra presentaba textura fanerítica, mesocrática y holocristalina. Se identificaron granos subhedrales de cuarzo de hasta 5mm. Puede apreciarse con lupa binocular, una variación que tiene a cuarzo amatista por trazas del ión Fe^{+3} .

Se identifica también, un mineral de color verde musgo presente en abundancia, debe verificarse en sección delgada si se tratara de clorita o algún piroxeno.

Son evidentes, cristales euhedrales de anfíboles; tabulares de hasta 5mm de largo, color negro. Y los minerales magnéticos, se presentan en buena cantidad, con característico hábito cúbico.

Tabla VIII. **Minerales principales identificados en muestra E102**

Minerales primarios	
Cuarzo	43 %

Minerales Secundarios	
Magnetita	8 %
Biotita	4 %
Anfíboles negros	21 %
Piroxenos/clorita	23 %
Sulfuros	1 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Muestra E102 bajo lupa binocular**



Fuente: Asociación Vivamos Mejor.

3.3.3. **Análisis con lupa binocular de muestra 684**

En general, la muestra presenta textura afanítica, holocristalina y leucocrática. Se identificaron cristales de cuarzo y feldespato que no superaban el milímetro de diámetro. Se encuentran subhedrales y el porcentaje de feldespatos supera al de cuarzo.

Los cristales de biotita se presentan subhedrales y con un diámetro $\leq 1\text{mm}$. Los minerales de color negro se presentan euhedrales a subhedrales con un hábito característico de magnetita. Existen otros que no parecen tener propiedades magnéticas y se ubicaron como óxidos en la tabla a continuación.

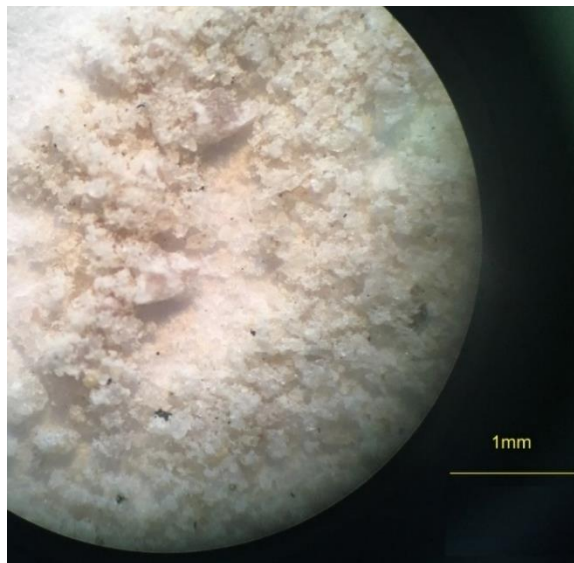
Tabla IX. **Minerales principales de muestra 684**

Minerales primarios	
Cuarzo	44 %
Feldespatos	50 %

Minerales Secundarios	
Biotita	3 %
Óxidos: magnetita	1 %
Óxidos: otros	2 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Muestra 684 bajo lupa binocular**



Fuente: Asociación Vivamos Mejor.

3.3.4. Análisis con lupa binocular de muestra 121

En general, la muestra presenta textura fanerítica, holocristalina y leucocrática. Se identificaron cristales subhedrales de cuarzo de hasta 3mm; cuarzo lechoso y cuarzo traslúcido, en ocasiones con coloración amarilla, como un cuarzo citrino. Al confirmar la presencia de ilmenita, se explican las trazas de titanio en el cuarzo citrino.

Se identificaron cristales anhedrales a subhedrales de feldespato de hasta 3mm, con coloración rosa, característica de los feldespatos potásicos.

Se evidencia una secuencia de cristales subhedrales de biotita. En muestra de mano, se presentan alargados en un inusual alineamiento a causa del cizallamiento sufrido por la roca.

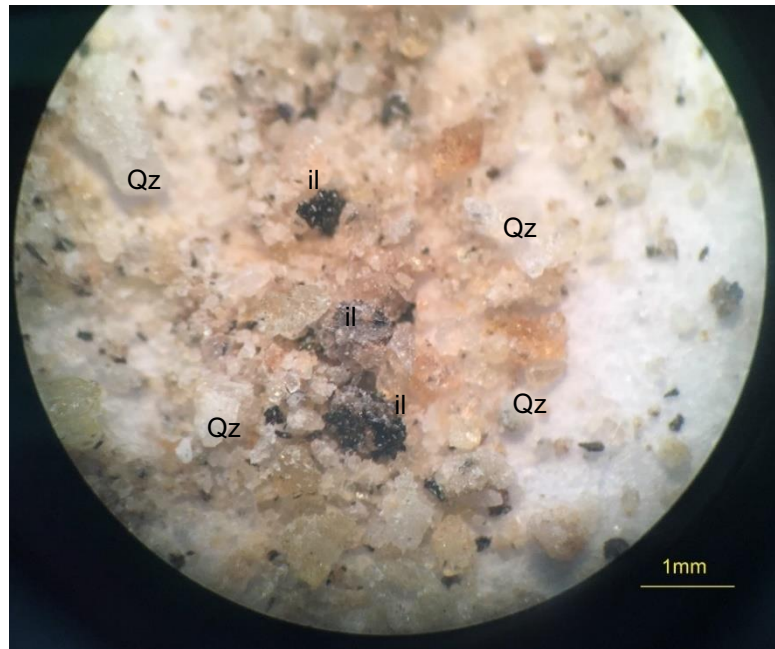
Tabla X. **Minerales principales encontrados en muestra 121**

Minerales primarios	
Cuarzo	38 %
Feldespato K	36 %

Minerales Secundarios	
Biotita	10 %
Anfiboles	13 %
Magnetita	1 %
Óxidos: no magnéticos	2 %

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Muestra 121 bajo lupa binocular**



Fuente: Asociación Vivamos Mejor.

No se realiza análisis con lupa binocular de muestra de 124, debido a que los cristales que componen la harina tectónica son submicroscópicos.

En el caso de la muestra 432, se tiene la evidencia que trata de una andesita. Su análisis mineralógico, se llevará a cabo mediante el microscopio petrográfico.

3.4. Etapa de gabinete

Constituye la digitalización de los datos y el análisis de la información recabada en campo. Los datos fueron plasmados en mapas para su análisis.

Para la cartografía de zonas expuestas a los movimientos de ladera, una herramienta muy valiosa es el mapa de susceptibilidad, en el que se muestran con colores diferentes los niveles, que estarán determinados por la tendencia del terreno a la inestabilidad.

Los mapas de susceptibilidad de la cuenca del lago de Atitlán se han realizado con una metodología adecuada por Geólogos del Mundo (GM) a R. Anbalagan de *Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain*. Se extrae el criterio principal de la técnica de la sectorización de amenaza por deslizamientos desarrollada por Anbalagan, que se basa en considerar los factores desencadenantes.

Se trata de un método estadístico bivalente, ajustado al área de estudio y el procedimiento es descrito a continuación.

3.4.1. Inventario de movimientos de ladera

Según Corominias, el proceso de evaluación de riesgos en una determinada zona empieza por la identificación del proceso o procesos generadores de estos en el área de estudio y por la definición de su área de influencia, ya que la mayoría de movimientos de ladera que se han registrado en el pasado, no alcanzan la estabilidad total. El inventario de movimientos de ladera es el mapa más importante para la evaluación de la susceptibilidad.²⁴

²⁴ COROMINIAS, Jordi. *Criterios para la confección de mapas de peligrosidad de movimientos de ladera*. p. 22.

Según Jiménez Perálvarez, un inventario de movimientos de ladera no debe limitarse a una mera cartografía de la zona afectada. Hay que elaborar una base de datos con información sobre la zona de ruptura, zona de acumulación, actividad, desarrollo, litología, dimensiones, presencia o ausencia de agua, información de testigos y otros.²⁵

Se utilizó una base topográfica 1:10 000 sobre una plataforma del *software* ArcGis 10.3 que permite la realización de funciones de entrada y análisis de salida de datos.

Se realizó una cartografía inicial de movimientos de ladera a escala 1:10 000, sobre las fotografías aéreas correspondientes al vuelo del año 2006 y la imagen satelital del año 2010 correspondiente al polígono de estudio y sus alrededores.

Con la cartografía sobre la foto aérea y los datos de campo correspondientes, se digitalizó la información, para lo que es fundamental el potencial de los sistemas de información geográfica.

Una vez digitalizado el inventario, se elaboran modelos digitales del terreno y se obtienen mapas de formas del terreno. El empleo de sistemas de información geográfica hace posible un potente análisis que requiere suficiente información y comprobación en campo.

²⁵ JIMÉNEZ PERÁLVAREZ, José. *Análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante un SIG en la cuenca vertiente al embalse de Rules*. p. 44.

Figura 25. **Movimientos de masa que tuvieron lugar durante la tormenta tropical Stan**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis versión 10.3.

3.4.2. Selección de factores determinantes de la estabilidad

Para establecer las causas de la inestabilidad, se apela a factores determinantes de las condiciones de estabilidad y factores desencadenantes o activadores de los movimientos de ladera.

Para cada factor, deben construirse las capas de información, en orden alfabético. En el caso de la litología, durante la etapa de campo se realizó un levantamiento geológico para delimitar las unidades litológicas presentes en el polígono de estudio.

Tabla XI. **Clasificación por rangos de la capa de geología**

COD	Unidad
1	Aluvión
2	Coluvión
3	Depósitos de caída
4	Lahar
5	Lahar andesítico
6	Rocas Graníticas

Fuente: elaboración propia.

La capa de geomorfología tiene diversas unidades que se designaron mediante observaciones de campo y delimitaron utilizando el mapa topográfico con la ayuda de las curvas a nivel.

Tabla XII. **Clasificación por rangos de la capa de geomorfología**

COD	Geoforma
1	(B) Barrancos
2	(CE) Cerro
3	(DCR) Depositos de canal reciente
4	(LIF) Laderas de incisión fluvial
5	(LIFR) Laderas de incisión fluvial reciente
6	(PM) Pie de monte
7	(SAP) Superficie de apilamiento de pomez
8	(SAPD) Superficie de apilamientos de pomez degradado
9	(SC) Superficie de cumbre
10	(Te) Terrazas

Fuente: elaboración propia.

La capa de pendientes se clasifica en 4 rangos que van a contener un conjunto de laderas pertenecientes al polígono de estudio. Esto es importante porque en diversas bibliografías constantemente se considera 30° como el umbral a partir del cual aumenta considerablemente la susceptibilidad.

Tabla XIII. **Clasificación por rangos de la capa de pendientes**

FACT. CONDICIONANTE	COD	UNIDADES
Pendientes	1	0°-15°
	2	16°-30°
	3	31°-40°
	4	41°-50°
	5	>51

Fuente: elaboración propia.

Para las capas de uso del suelo, se analizan los rangos presentes dentro del polígono de estudio.

Tabla XIV. **Clasificación por rangos de la capa de uso del suelo**

FACT. CONDICIONANTE	COD	Uso de Suelo
Uso del Suelo	1	Bosque de mixto
	2	Bosque de Pino
	3	Bosque latifoliado
	4	Café
	5	Espacios con vegetación escasa
	6	Hortalizas
	7	Maíz
	8	Maíz y Frijol
	9	Plantaciones de ciprés
	10	Tejido urbano discontinuo
	11	Tejido urbano precario
	12	Vegetación arbustiva baja (matorral)

Fuente: *Mapa de Usos del Suelo del Departamento de Sololá*. Guatemala: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Ganadería (MAGA).

La capa de orientaciones se dividió en cuatro rangos, que representan los cuatro puntos cardinales, por tanto, el *software* les interpreta como la exposición a la luz solar a lo largo del día.

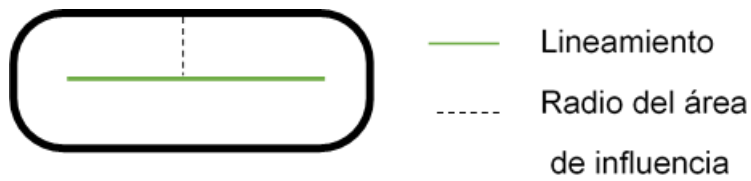
Tabla XV. **Clasificación por rangos de la capa orientaciones**

FACT. CONDICIONANTE	COD	Orientaciones
Orientaciones	1	NW315-NE45
	2	NE45-SE135
	3	SE135-SW220
	4	SW220-NW315

Fuente: elaboración propia.

La capa de estructural se obtiene a partir de lineamientos y/o fallas. Los rangos se obtienen al momento de crear un área de influencia (*buffering*) para cada lineamiento.

Figura 26. **Un lineamiento con su respectiva área de influencia**



Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Área de influencia de un lineamiento conteniendo dos deslizamientos**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Clasificación por rangos de la capa de estructural**

Fact. Condicionante	COD	Densidad de Fracturación (m/Km ²)
Estructural	1	0 - 0,70
	2	0,7 - 1,4
	3	1,4 - 2,1
	4	2,1 - 2,8
	5	2,8 - 3,5
	6	3,5 - 4,2
	7	4,2 - 4,9
	8	4,9 - 5,6
	9	5,6 - 6,3

Fuente: elaboración propia.

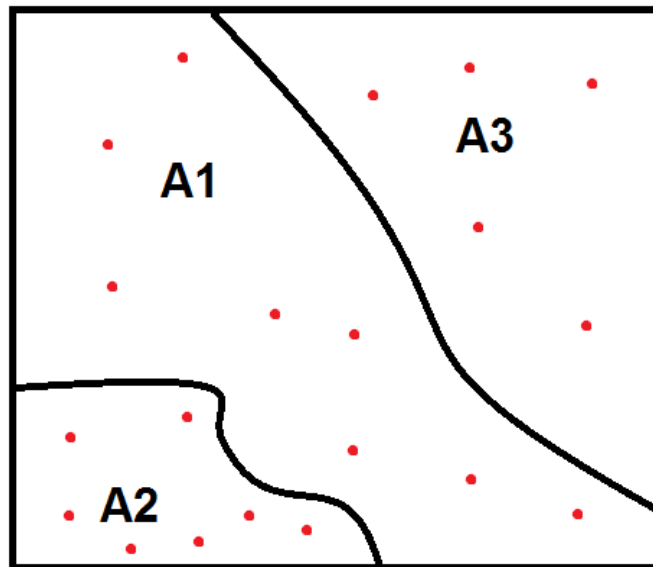
3.4.3. **Análisis entre movimientos de ladera y factores activadores**

El método de la matriz es un método de análisis estadístico, permite evaluar la inestabilidad potencial relativa en una región, utilizando una serie de valores cuantificables.

Una vez seleccionado el conjunto de factores que condicionan la aparición de los movimientos de ladera, se construye una matriz, de modo que cada una de sus celdas representa cada una de las combinaciones de las clases de los factores considerados.

A partir del inventario de movimientos de ladera, se calcula el área afectada por movimientos en cada combinación de factores (figura 28). Así, se construye la matriz de movimientos de ladera. De forma análoga se construye la matriz de la zona de estudio, que representará el área total de cada combinación de factores (figura 29).

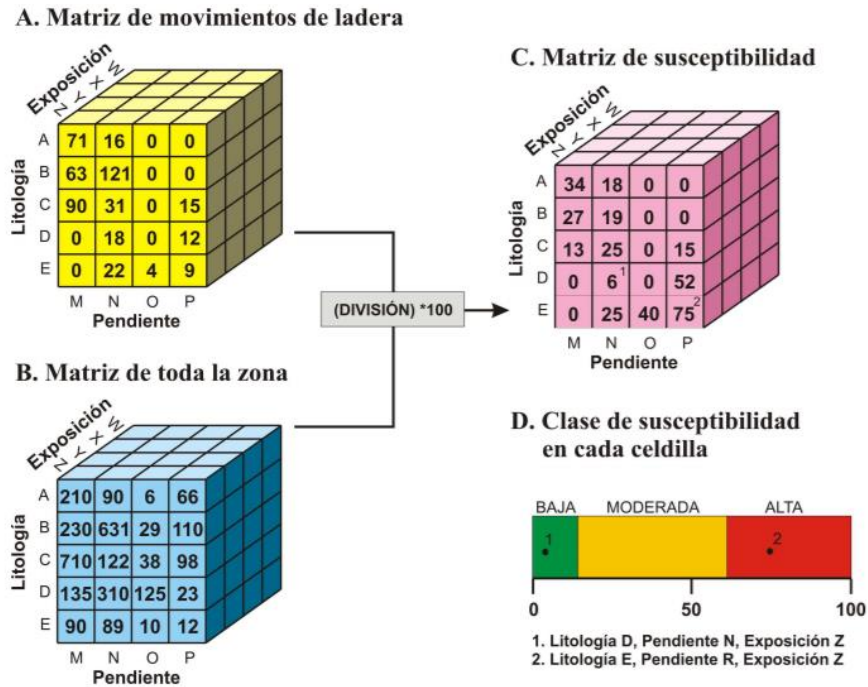
Figura 28. **Distribución de movimientos de ladera en tres áreas distintas**



Fuente: elaboración propia.

La figura 21, muestra que donde se producen mayores movimientos es en A1. Analizándolo de forma absoluta, A1 tendría más susceptibilidad, seguidamente de A2 y por último, A3. Pero al relativizarlo respecto a la superficie del rango, A2 es el más susceptible, ya que la proporción de movimientos en función del área ocupada es mayor que en las demás categorías.

Figura 29. **Determinación de la susceptibilidad a movimientos de ladera mediante el método de la matriz**



Fuente: IRIGARAY, Clemente. *Verification of landslide susceptibility mapping. A case study; Earth Surface Processes and Landforms.* p. 9.

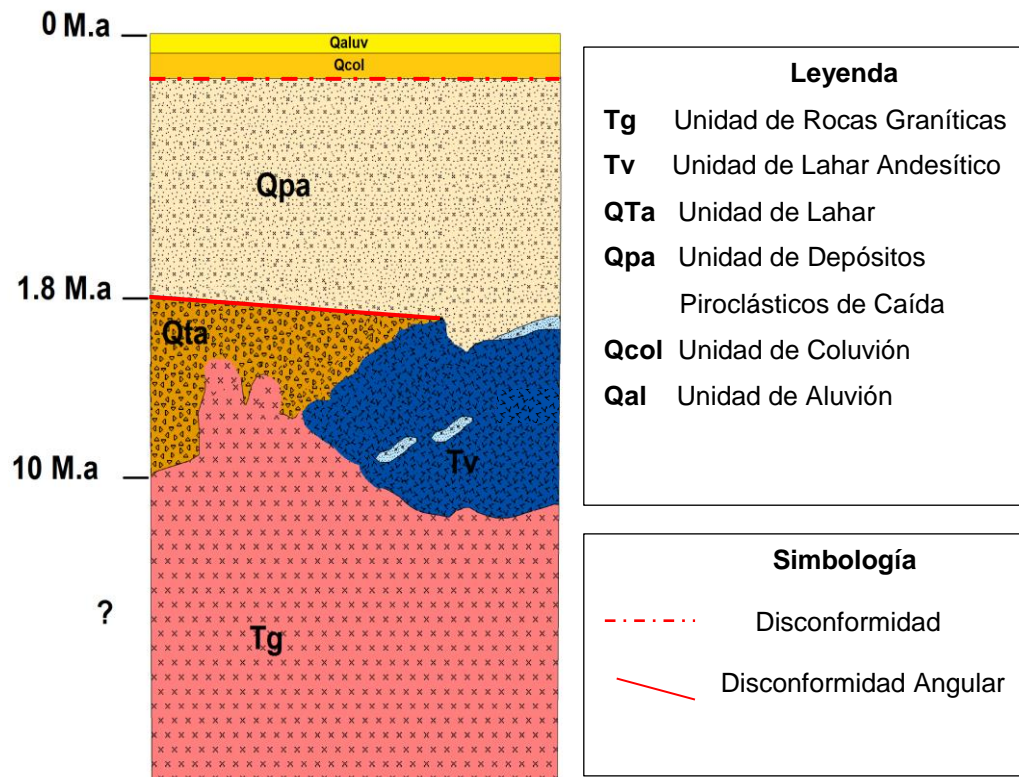
El valor de cada celda de esta nueva matriz se obtiene dividiendo los correspondientes a la matriz de movimientos entre los de la matriz de toda la zona. Todas las combinaciones que no están asociadas a movimientos de ladera se les asigna el valor "0" en la matriz de susceptibilidad; el resto tendrá valores mayores a 0, pudiendo alcanzar el valor 1 (100, si lo expresamos en porcentaje) como máximo.

4. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Estratigrafía local

En el polígono de estudio afloran 6 unidades: rocas graníticas (Tg), lahar andesítico (Tv), lahar (QTa), depósitos piroclásticos de caída (Qpa), coluvión (QCol), aluvión (QAI).

Figura 30. Columna litoestratigráfica



Fuente: elaboración propia.

4.1.1. Unidad de rocas graníticas (Tg)

Esta unidad agrupa tres variaciones diferentes que se identifican a lo largo del río Yatzá; las muestras con la nomenclatura: E5-002, 102 y 684 representan las rocas graníticas presentes en el polígono de estudio.

Se estima que un 80 % de esta unidad se encuentra con un alto grado de meteorización; teniendo como características físicas principales: rasgos de alteración (sericitización y cloritización), en estado deleznable.

La muestra E5-002 representa a las rocas graníticas encontradas en la cumbre del cerro Tzantem, en el extremo noroeste del polígono de estudio. Se trata de una roca fanerítica con alto contenido en sílice y unas vacuolas con crecimientos cristalinos a su alrededor, a causa de una alteración hidrotermal. Agua salió por esos orificios y debido a la alta temperatura, recrystalizó las orillas de estas vacuolas, formando nuevos cristales.

El afloramiento, presenta fracturas sin relleno y notable descomposición de feldespatos. A continuación, se presenta el análisis petrográfico de la muestra.

Tabla XVII. **Análisis con microscopio petrográfico de muestra E5-002**

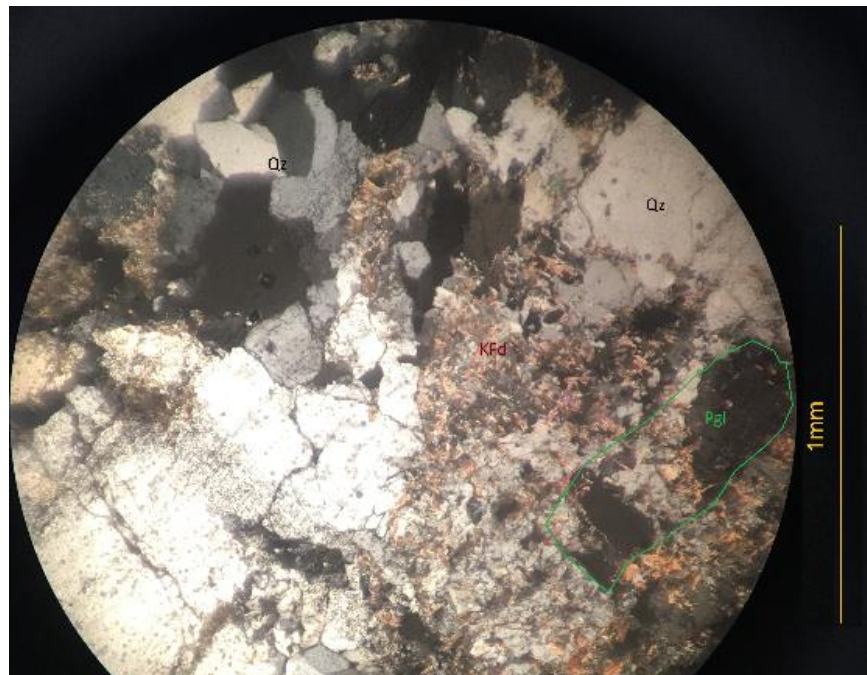
Minerales Escenciales	Porcentaje (%)	Forma	Otros Minerales	Porcentaje (%)	Forma
Cuarzo	48	Anhedral	Accesorios:	10	Anhedral
Feldespato A	25	Subhedral a euhedral	biotita		
Plagioclasas	11	subhedral, sericitizadas	Opacos:		
			Ilmenita	5	Anhedral a subh.
			Magnetita	1	Anhedral a subh.

Fuente: elaboración propia.

Los feldespatos encontrados en la muestra estaban siendo reemplazados por un tipo de alteración muy frecuente en el polígono de estudio: sericitización. Por lo menos el 40 % de los cristales de feldespato se ven sericitizados en el microscopio petrográfico. Los cristales de cuarzo fueron los únicos que no se veían afectados por ningún tipo de alteración.

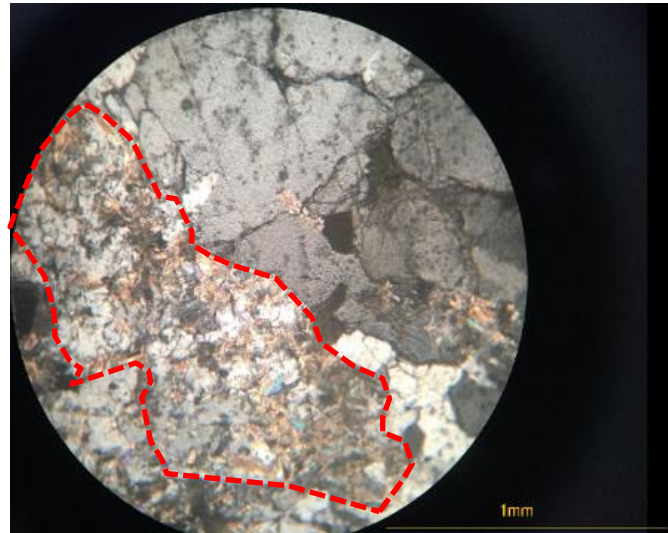
Se evidencian relictos de maclas polisintéticas en cristales de plagioclasas lo que no permitía identificarles con certeza; el tomar en cuenta los ángulos de extinción que presentaban, podría dar resultados anómalos.

Figura 31. **Relictos de maclas polisintéticas en color verde**



Fuente: Laboratorio de Petrología, Centro Universitario del Norte.

Figura 32. Sericitización en feldespatos, marcado con color rojo



Fuente: Laboratorio de Petrología, Centro Universitario del Norte.

La muestra E102, representa las rocas graníticas que afloran a lo largo del río Yatzá, en las paredes del lecho del río. Se trata de un afloramiento fracturado, con textura fanerítica, mesocrático y parches de color verde, producto de un remplazamiento que los minerales están sufriendo por clorita.

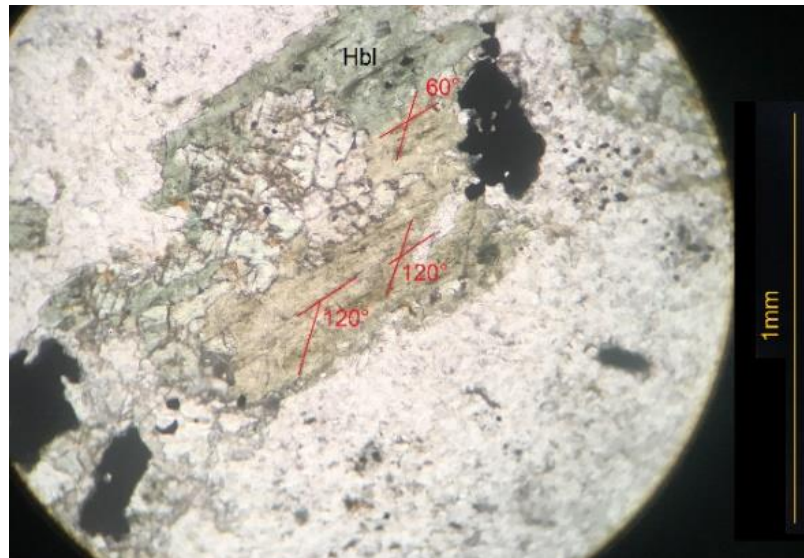
Tabla XVIII. Análisis con microscopio petrográfico de muestra E102

Minerales Esenciales	Porcentaje (%)	Forma	Otros minerales	Porcentaje (%)	Forma
Cuarzo	23	Anhedral	Accesorios: Biotita	5	Subhedral a euhedral
Feldespato A	14	Subhedral a euhedral	Anfiboles	21	Subhedral a euhedral
Plagioclasas	7	Subhedral, sericitizadas	Piroxenos	21	Subhedral a euhedral
			Opacos: Magnetita	9	Anhedral a Subhedral
			Secundarios: Clorita*	*	

Fuente: elaboración propia.

Es notable un reemplazamiento por clorita, por lo menos el 45 % de los piroxenos y anfíboles de la muestra están siendo cloritizados. La clorita se presenta por alteración de minerales ferromagnesianos primarios (como anfíboles y biotita), donde estos pierden todo el potasio. También hay un proceso de sericitización en feldespatos.

Figura 33. **Cristal de hornblenda siendo cloritizado**



Fuente: Laboratorio de Petrología, Centro Universitario del Norte.

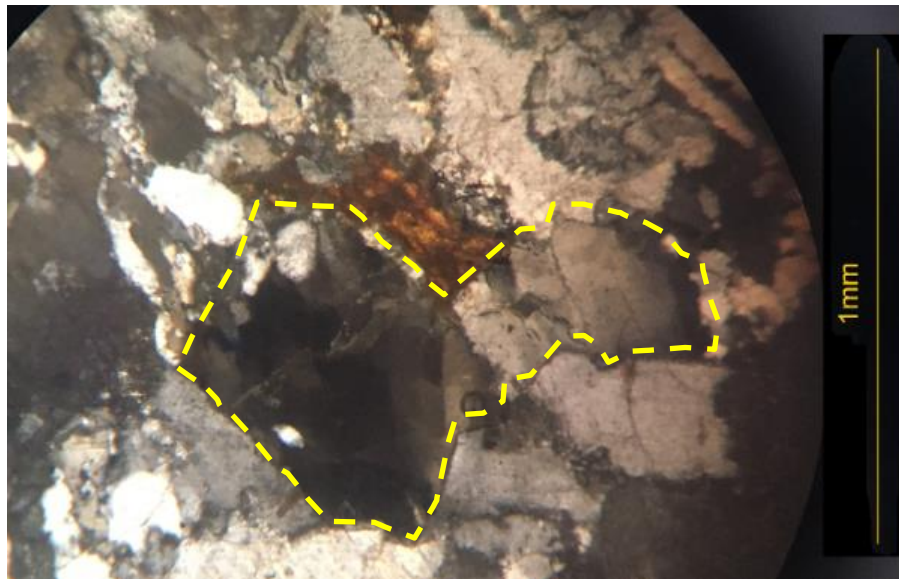
Para concluir con esta unidad, en el cerro Sak'abaj, en el límite suroeste del polígono de estudio, se extrae la muestra 684. Estas rocas constituyen el cerro en cuestión, sobreyaciendo a un granito fanerítico.

Tabla XIX. **Análisis con microscopio petrográfico de muestra 684**

Minerales Esenciales	Porcentaje (%)	Forma	Otros minerales	Porcentaje (%)	Forma
Cuarzo	46	Anhedral	Accesorios: biotita	6	Anhedral
Feldespato A.	31	Subhedral a euhedral	Opacos: magnetita	1	Subhedral a euhedral
Plagioclasas (Labradorita)	16				

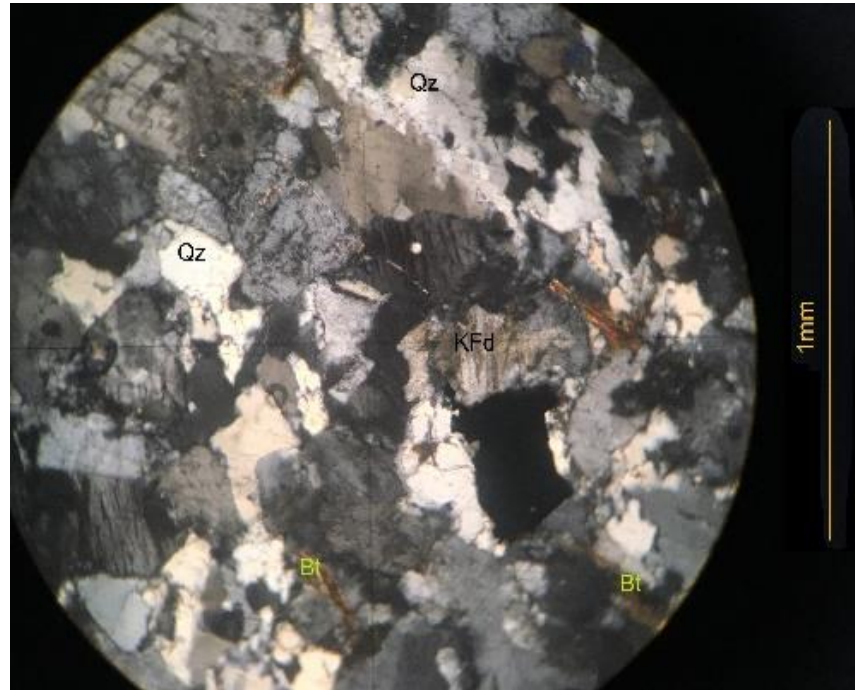
Fuente: elaboración propia.

Figura 34. **Cuarzo presentando extinción ondulosa**



Fuente: Laboratorio de Petrología, Centro Universitario del Norte.

Figura 35. **Microtextura perfitica en cristales de feldespato**



Fuente: Laboratorio de Petrología, Centro Universitario del Norte.

La textura perfitica se presenta en un cristal huésped de ortosa, siendo afectado con inclusiones en forma de vetillas paralelas entre sí. En general, se muestran feldespatos potásicos y plagioclasas con alteraciones, posiblemente por esfuerzos; lo cual es razonable si asumimos que el cerro Sak'abaj fue afectado por esfuerzos de cizalla.

Existen relictos de maclas polisintéticas, correspondientes a plagioclasas; pareciera que se están borrando. En el caso de los cuarzos que presentan extinción ondulante, ambos son signos de que la roca estuvo sometida a una deformación, dando lugar a una serie de dislocaciones intracristalinas que curvan la red cristalina.

4.1.2. Unidad de Lahar andesítico (Tv)

En los alrededores de San Juan la Laguna, aflora una antigua unidad de lahar que contiene entre su matriz de ceniza, bloques angulosos de andesitas, que superan los 2 metros de alto.

Únicamente en presencia de esta unidad, se identificaron también lentes (figura 38) de arenas sub-redondeadas a angulosas, líticos de color azul, tefra y pumitas de varios tamaños; en sus intersticios se encontró vidrio y arena máfica. Están laminados y se derivaron de la meteorización de andesitas, que en la antigüedad fueron depositadas por una corriente fluvial de aguas arriba.

Figura 36. **Afloramiento a orilla de la carretera**



Fuente: ruta a San Juan la Laguna.

Estos afloramientos están asociados a complejos estratovolcánicos terciarios-cuaternarios. Se describen como lavas discordantes, relacionadas con antiguos estratovolcanes.

Evidenciamos la unidad de lahar andesítico en contacto con la unidad de depósitos piroclásticos de caída, tal y como se presenta en la columna litoestratigráfica.

Figura 37. **Contacto en los alrededores de la aldea Paquip**



Fuente: aldea Paquip, Santa Clara la Laguna.

Figura 38. **Lentes de líticos andesíticos entre estratos de paleosuelo**

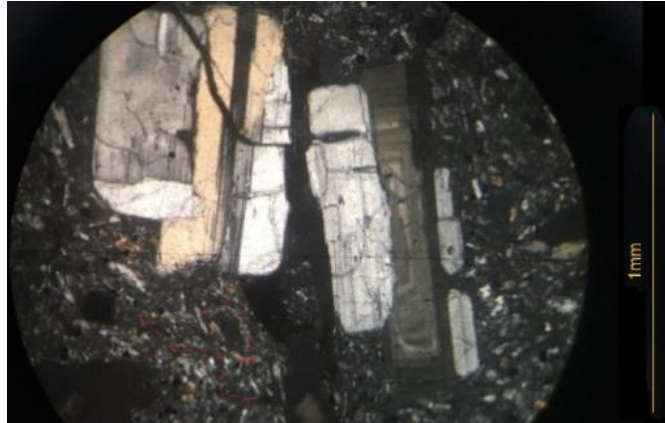


Fuente: en los alrededores de Santa Clara la Laguna.

Al analizar la muestra con microscopio petrográfico, se determinó que la mayoría de las plagioclasas encontradas estaban zonadas y macladas. La zonación oscilatoria podría representar variaciones rítmicas en la cámara magmática o una contaminación del magma (por la roca caja) durante el ascenso.

En toda la sección delgada, salta a la vista la matriz de numerosos y diminutos cristales de plagioclasa alineados en una típica textura traquítica; no puede identificarse el tipo de plagioclasa debido a su tamaño. En segundo lugar, se puede observar un fenocristal zonado de plagioclasa (andesina).

Figura 39. **Plagioclasas macladas**



Fuente: Laboratorio de Petrología, Centro Universitario del Norte.

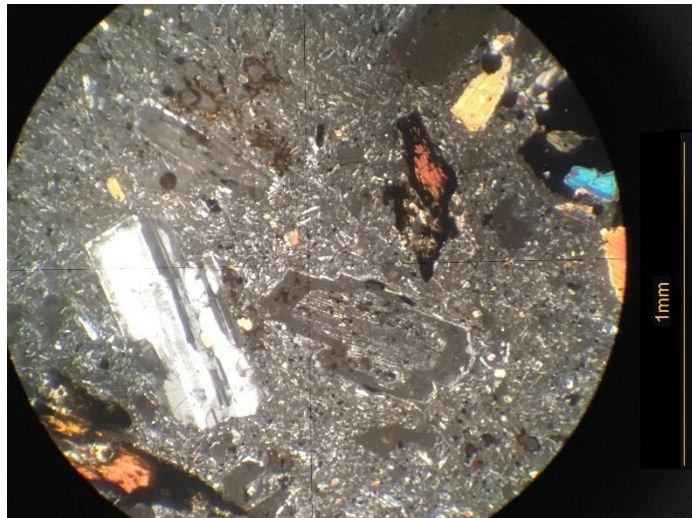
Figura 40. **Zonación oscilatoria y textura traquítica**



Fuente: Laboratorio de Petrología, Centro Universitario del Norte.

El crecimiento esquelético en los bordes de algunas plagioclasas podría indicarnos que la roca sufrió de un enfriamiento y posterior calentamiento.

Figura 41. **Crecimiento esquelético en el borde de las plagioclasas**



Fuente: Laboratorio de Petrología, Centro Universitario del Norte.

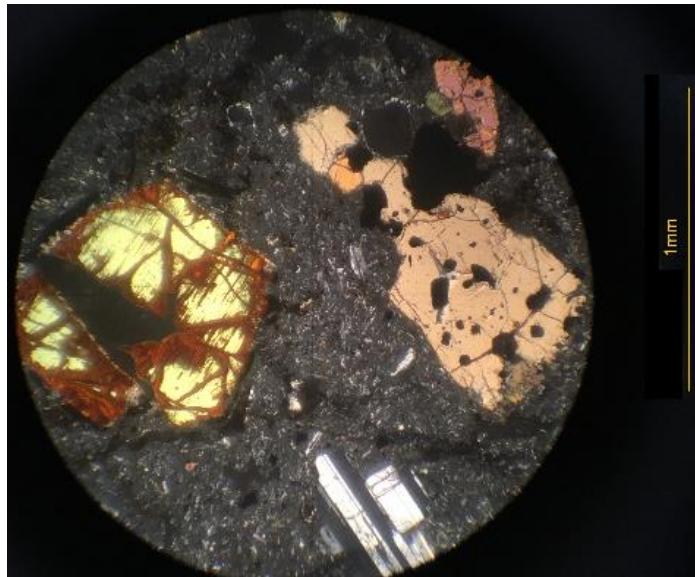
Tabla XX. **Análisis con microscopio petrográfico de muestra 412**

Minerales Esenciales	Porcentaje (%)	Forma	Otros Minerales	Porcentaje (%)	Forma
Cuarzo	2	Anhedral	Accesorios:		
Plagioclasas (andesina+ matriz)	55	Anhedral a subhedral	Piroxenos	6	Subhedral a euhedral
			Anfíboles	12	Subhedral a euhedral
			Biotita	2	Anhedral
Feldespato K	10	euhedral	Opacos		
			Vidrio*	9	*no es un mineral
			Secundarios		
			Olivino	4	euhedral

Fuente: elaboración propia.

La muestra también contenía vidrio volcánico y unos fenocristales de olivino que muestra alteración en sus fracturas.

Figura 42. **Cristal de olivino con alteración en sus fracturas**



Fuente: Laboratorio de Petrología, Centro Universitario del Norte.

4.1.3. **Unidad de lahar (QTa)**

Está asociada a antiguos complejos estratovolcánicos (cretácicos a cuaternarios). Contiene bloques angulosos de grandes dimensiones de composición granítica y bloques de harina tectónica (*gouge*) entre una matriz de lodos y ceniza.

Se extrajeron dos muestras con las etiquetas 121 y 124, realizaron secciones delgadas y analizaron con microscopio petrográfico.

Figura 43. **Bloques de granito cizallado, muestra 121**



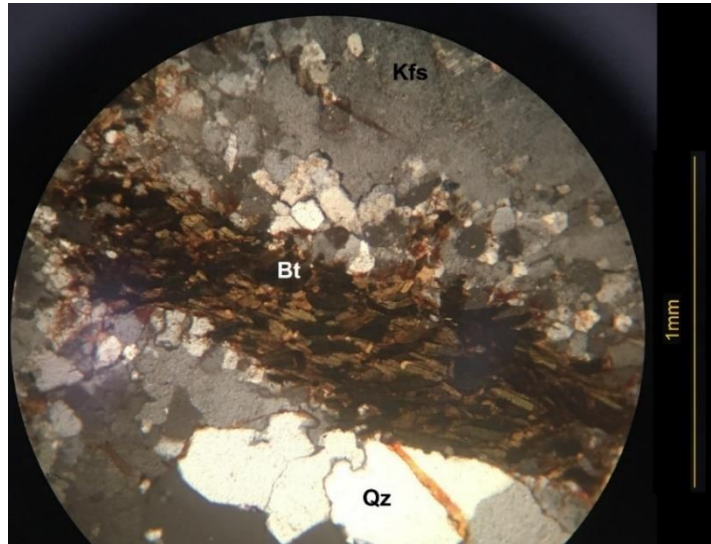
Fuente: cerro Xiquichoy, municipio de Santa María Visitación.

Figura 44. **Cristales de biotita alineados**



Fuente: cerro Xiquichoy, municipio de Santa María Visitación.

Figura 45. **Análisis con microscopio petrográfico de muestra 121**



Fuente: Laboratorio de Petrología, Centro Universitario del Norte.

Figura 46. **Cristales de biotita con dos direcciones de alineación**



Fuente: Laboratorio de Petrología, Centro Universitario del Norte.

Tabla XXI. **Composición mineralógica para muestra 121**

Minerales Escenciales	Porcentaje (%)	Forma	Otros Minerales	Porcentaje (%)	Forma
Cuarzo	33	Anhedral	Accesorios:		
Feldespato A	40	Anhedral a subhedral	biotita	19	Anhedral
Plagioclasas	8	euhedral			

Fuente: elaboración propia.

El afloramiento que representa la muestra 123, consiste en un apilamiento de bloques que presentan foliación y se encuentran entre una matriz de ceniza y lodos; típico de eventos laháricos. También fue obtenida de los alrededores del cerro Xiquichoy.

Durante el análisis con microscopio petrográfico, se presenta una matriz ruidosa, caótica, sin ningún orden lógico y tiene cristales muy pequeños incluso para el objetivo 40x. Por lo que no se puede realizar un conteo de minerales representativo. Se concluye que se trata de una harina tectónica, también llamado *gouge*.

Figura 47. **Afloramiento de muestra 123**



Fuente: cerro Xiquichoy, municipio de Santa María Visitación.

Figura 48. **Muestra de mano identificada como 123**



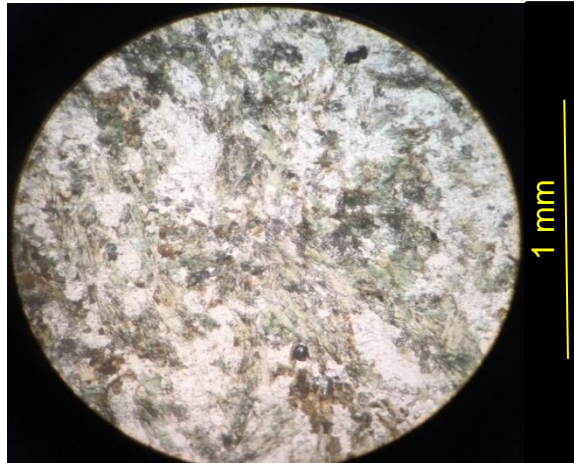
Fuente: cerro Xiquichoy, municipio de Santa María Visitación.

Figura 49. **Corte perpendicular a la foliación para la realización de la sección delgada**



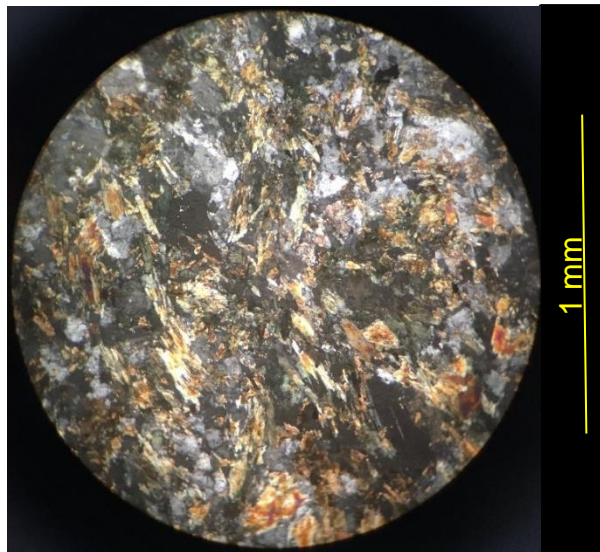
Fuente: Laboratorio de Petrología, Centro Universitario del Norte.

Figura 50. **Muestra 123 bajo luz polarizada plana, objetivo 10X**



Fuente: Laboratorio de Petrología, Centro Universitario del Norte.

Figura 51. **Muestra 123 bajo luz polarizada cruzada, objetivo 10X**



Fuente: Laboratorio de Petrología, Centro Universitario del Norte.

4.1.4. Depósitos piroclásticos de caída (Qpa)

Esta unidad consta de diversos eventos producto de la gran erupción del batolito Chocoyos, cubren gran parte de la superficie de la microcuenca y sus alrededores. Formó cerros redondeados y está presente en lo más alto del cerro Xiquichoy.

Se trata de una alternancia de estratos, que por lo general posee una coloración blanco-ocre. Se constituyen por fragmentos piroclásticos de caída provenientes de las expulsiones volcánicas antiguas; reciben su nombre lapilli ó ceniza en base a su tamaño. El espesor de esta unidad es de aproximadamente 200 metros.

La tonalidad blanquecina se da en los depósitos, como consecuencia de la sílice contenida en las pumitas, la mayor parte del tiempo subredondeadas, además se encuentran fragmentos líticos, biotitas y magnetita.

La unidad de depósitos piroclásticos de caída, se encuentra en contacto discordante con las unidades de lahar andesítico (Tv), lahar granítico (QTa), depósitos coluviales (Qcol), y depósitos aluviales (Qal).

Figura 52. **Afloramiento de depósitos piroclásticos de caída**



Fuente: caserío Palestina, municipio San Juan la Laguna.

Figura 53. **Capas de paleosuelo entre depósitos piroclásticos de caída**



Fuente: aldea Montecristo, municipio Santa María Visitación.

Se analizaron las propiedades escalares de los depósitos piroclásticos de caída. El material fue secado, cuarteado y analizado mediante lupa binocular para que los resultados devolvieran datos representativos.

Figura 54. **Minerales de óxido de hierro incrustados entre las pumitas**



Fuente: Asociación Vivamos Mejor.

Figura 55. **Depósitos piroclásticos de color blanco con líticos de andesita**



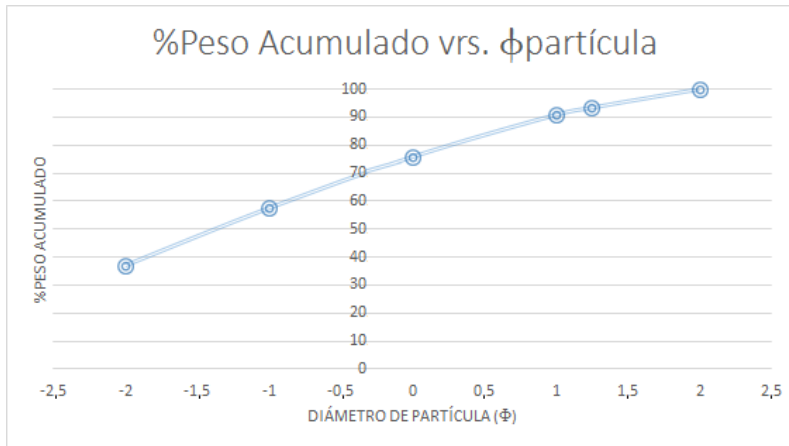
Fuente: Asociación Vivamos Mejor.

Tabla XXII. **Granulometría**

phi	mm	Peso en gr	Peso Individual (Porcentaje)	Peso Acumulado (Porcentaje)	Porcentaje que pasa
-2	4	67	34,01	34,01	65,99
-1	2	55	27,919	61,929	38,071
0	1	43	21,827	83,756	16,244
1	0,5	25	12,69	96,446	3,553
1,25	0,425	5	2,538	98,984	2,538
2	0,25	2	1,015	100	0

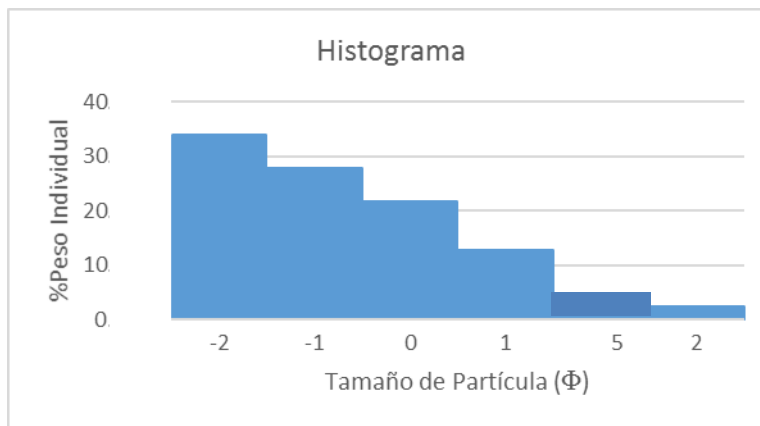
Fuente: elaboración propia.

Figura 56. **Peso acumulado contra diámetro de partículas**



Fuente: elaboración propia.

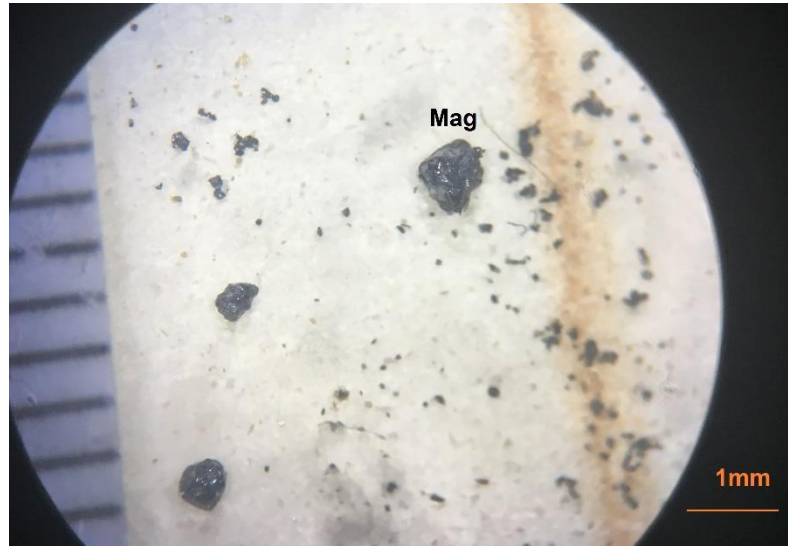
Figura 57. **Histograma con respecto al porcentaje de peso individual de partículas**



Fuente: elaboración propia.

Con los gráficos se puede decir que la muestra contiene lapilli fino a medio y estas partículas conforman poco más del 60 % de la muestra. Entre sus vesículas redondeadas, guardan óxidos de hierro y biotita.

Figura 58. **Minerales de óxido de hierro**



Fuente: Asociación Vivamos Mejor.

Figura 59. **Vesículas redondeadas de las pumitas presentes en la muestra**



Fuente: Asociación Vivamos Mejor.

Figura 60. **Líticos de andesita presentes en la muestra**



Fuente: Asociación Vivamos Mejor.

En el caso de la ceniza media - gruesa, se tienen vitroclastos alargados, fragmentos de cuarzo con su característico brillo vítreo y láminas de biotita.

Figura 61. **Ceniza media a gruesa bajo lupa binocular**



Fuente: Asociación Vivamos Mejor.

Figura 62. **Clases de tamaño para partículas volcánicas**

Límite del diámetro de partícula		Clase de tamaño Volcánico primario
mm	phi	
2048	-11	Bloque/bomba grueso(a)
2024	-10	
512	-9	Bloque/bomba medio(a)
256	-8	
128	-7	Bloque/bomba fino(a)
64	-6	
32	-5	Lapilli grueso
16	-4	
8	-3	Lapilli medio
4	-2	
2	-1	Lapilli fino
1	0	
		Ceniza muy gruesa
1/2	1	Ceniza gruesa
1/4	2	Ceniza media
1/8	3	Ceniza fina
1/16	4	Ceniza muy fina
1/32	5	
1/64	6	Ceniza extremadamente fina
1/128	7	
1/256	8	
1/512	9	

Fuente: ROMERO, Jorge et al. *Los depósitos de caída de tefra: Una breve revisión sobre su cuantificación y análisis para la clasificación de erupciones volcánicas explosivas, con ejemplos Latinoamericano.* p. 44.

4.1.5. Unidad de aluvión (Qal)

Se reconoce por bloques de rocas (graníticas, andesíticas, dacíticas, basálticas) de grandes dimensiones (superando 1m de ancho) en su mayoría subangulosos; arrastra cantos rodados, maduros texturalmente, producto de la fragmentación de bloques más grandes y que han recorrido grandes distancias.

Arenas limos y arcillas producto de la meteorización mecánica de los bloques anteriormente mencionados y de los depósitos piroclásticos que se desprenden de los escarpes que se encuentran a orillas de algún cauce fluvial.

Figura 63. **Aluvión a orillas del río Yatzá**



Fuente: río Yatzá en las faldas del cerro Xiquichoy.

4.1.6. Unidad de coluvión

Se constituye de material al pie de las laderas que se desprende de las mismas. Debido a que no han tenido mayor transporte (se considera únicamente la acción de la gravedad) se encuentran angulosos, no poseen madurez textural.

Figura 64. **Coluvión siendo cubierto por vegetación**



Fuente: cerro Xiquichoy.

4.2. Geología estructural

4.2.1. Zona de cizalla

Existe una zona indicando cizallamiento, atravesando el polígono de estudio de norte a sur desde el cerro Tzantem hasta el cerro Sak'abaj y semiparalela al río Yatzá. El mejor exponente es el cerro Sak'abaj, que presenta un fuerte cizallamiento durante todo el ascenso; planos de fracturamiento ortogonales a cada medio centímetro.

Figura 65. **Fuerte fracturamiento en las paredes del cerro Sak'abaj**



Fuente: cerro Sak'abaj, municipio Santa Clara la Laguna.

Figura 66. Lineamientos en color rojo subparalelos al río Yatzá



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis versión 10.3.

Mediante fotografías aéreas, puede evidenciarse como en el cerro Xiquichoy, la unidad de lahar cubre los rasgos de cizalla. Sin embargo, los bloques que componen dicha unidad muestran lineación mineral; no se encontraron indicadores cinemáticos.

4.2.2. Fallas

En el área se encuentran fallas de tipo normal en las unidades más antiguas, se identificaron por medio de los tectoglifos que persisten en las rocas. En los depósitos piroclásticos de caída cuaternarios no se pudieron identificar estrías, más que solo interpretar el movimiento.

Figura 67. **Fallamiento de tipo normal a orillas del río Yatzá**



Fuente: paredes del río Yatzá.

Figura 68. **Fallamiento de tipo normal**



Fuente: cerro Sak'abaj, municipio Santa Clara la Laguna.

4.3. Geomorfología

El relieve de la superficie terrestre es el resultado de la interacción de fuerzas endógenas y exógenas. Las fuerzas endógenas actúan como creadoras de grandes elevaciones y depresiones, producidas fundamentalmente por movimientos de componente vertical. Las fuerzas exógenas actúan como desencadenantes de una continua denudación que tiende a rebajar el relieve originado. Esta lucha constante se manifiesta a diferentes escalas a lo largo del tiempo geológico. El resultado se manifiesta en un conjunto de modelados erosivos y deposicionales, que presentan rasgos específicos en relación a los procesos actuantes en los diferentes ambientes morfogenéticos.

4.3.1. Formas asociadas a procesos endógenos

Son todos aquellos procesos que tienen su origen debido a fuerzas del interior de la corteza.

4.3.1.1. Superficie de apilamiento de pómez (SAP)

Como su nombre lo indica, se refiere a una zona donde los depósitos piroclásticos de caída se acumularon en grandes espesores, dando lugar a una morfología llana o pendiente muy suave.

Figura 69. **Superficie de apilamiento de pómez (SAP)**



Fuente: caserío Panyevan, municipio de San Juan la Laguna.

4.3.1.2. Superficie de apilamiento de pómez degradada (SAPD)

Difiere de la superficie de apilamiento de pómez, al sufrir una erosión hídrica, causando una acumulación de depósitos piroclásticos. Esto da lugar a pendientes suaves a medias.

Figura 70. **Superficie de apilamiento de pómez degradada**



Fuente: aldea Paquip, municipio Santa Clara la Laguna.

Figura 71. **Superficie de apilamiento de pómez degradada y cerro Ajaw**



Fuente: aldea Panyevan, municipio San Juan la Laguna.

4.3.2. Formas asociadas a procesos exógenos

Son todos aquellos procesos que se deben a agentes geológicos externos.

4.3.2.1. Piedemonte (Pm)

Se reconoce por material que se acumula al pie de una ladera, que se supone procede de la misma. Es común encontrarles en zonas bajas. El terreno se caracteriza por tener una pendiente media (entre 10° y 30°).

En el cerro Sak'abaj se identifica material que se ha acumulado al pie de una ladera y se le ha hecho un acercamiento en la figura 72.

Figura 72. Unidad geomorfológica piedemonte



Fuente: cerro Sak'abaj, municipio Santa Clara la Laguna.

4.3.3. Formas asociadas a procesos de denudación

Se refiere a los procesos que involucran meteorización a causa de agentes meteóricos.

4.3.3.1. Laderas de incisión fluvial (LIF)

Se identifican por una pendiente prominente de entre 30° y 50° , como su nombre lo indica, tienen su forma como resultado de la incisión fluvial. En el polígono de estudio, el cerro Xiquichoy está conformado por esta unidad, cabe mencionar que sus redes de drenaje tributan al río Yatzá.

Figura 73. **Laderas de incisión fluvial**



Fuente: cerro Xiquichoy, municipio de Santa María Visitación.

4.3.3.2. Laderas de incisión fluvial reciente (LIFR)

A diferencia de la unidad LIF, como su nombre lo indica, se modelan a causa de incisión fluvial cuaternaria. Tienen pendientes de entre 20° y 40° . En el caso del polígono de estudio, se encuentran frente al cerro Xiquichoy, se constituyen

de depósitos piroclásticos de caída y son altamente erosionables. Esto resulta en que sean áreas susceptibles a movimientos de ladera y tengan una forma redondeada.

Figura 74. **Laderas de incisión fluvial reciente (LIFR)**



Fuente: municipio de San Juan la Laguna.

4.3.3.3. Cerro (Ce)

Topográficamente, puede distinguirse debido a que tiene mayor elevación que las zonas aledañas. Esta unidad está presente en los bordes del polígono de estudio, asociados a relictos del colapso Atitlán II y cubiertos por depósitos piroclásticos.

Figura 75. **Cerro**



Fuente: municipio Santa Clara la Laguna.

Figura 76. **Cerro Nariz del Indio**



Fuente: municipio Santa Clara la Laguna.

4.3.3.4. Superficie de cumbre (SC)

Se identifica por no poseer cresta, en su lugar, la erosión tomó lugar en la parte superior; posee pendientes suaves. El caserío Montecristo está asentado sobre esta unidad.

Figura 77. Superficie de cumbre (SC)



Fuente: caserío Montecristo, municipio Santa María Visitación.

Figura 78. Caserío Montecristo



Fuente: www.googleearth.com. Consulta: enero de 2017.

4.3.4. Formas asociadas a movimientos de ladera

Son indicadores geomorfológicos, visibles al momento que se desarrolla un movimiento de masa.

4.3.4.1. Cicatriz de deslizamiento (CiD)

Se refiere a la pared vertical (o subvertical) que corresponde al plano de rotura. Existen numerosas evidencias de esta unidad e incluso se ha digitalizado un mapa únicamente para marcar los movimientos de ladera en el polígono de estudio.

4.3.4.2. Cuerpo de deslizamiento (CuD)

Es la zona del material desplazado por un deslizamiento. En los últimos diez años, sin importar la estación, el material se encuentra depositado aguas abajo a causa de que el material deslizado se ha incorporado a las corrientes fluviales, y depositado aguas abajo.

4.3.4.3. Cabecera de deslizamiento (CaD)

Se refiere al límite del plano de rotura del terreno en un movimiento de masa. En el polígono de estudio se encuentran varias cicatrices, a causa de que no son eventos recientes. En la figura 79, se evidencia el material desplazado (CiD) clasificado como un movimiento de origen antrópico. Suceso ocurrido en mayo de 2016, en el municipio de San Juan la Laguna.

Figura 79. **Cabecera de deslizamiento (CaD)**



Fuente: caserío Cipresales, municipio San Juan la Laguna.

Figura 80. **Formas asociadas a movimientos de ladera (CiD)**



Fuente: caserío Montecristo, municipio Santa María Visitación.

Figura 81. **Formas asociadas a movimientos de ladera**



Fuente: municipio Santa Clara la Laguna.

4.3.5. Formas asociadas a procesos fluvio-torrenciales

Resultan por erosión a causa de circulación de agua superficial.

4.3.5.1. Barranco (B)

Suelen ser zonas con excavación profunda a causa de la circulación de agua. Son frecuentes en el cerro Xiquichoy. En la figura 82, con una línea punteada se marca la unidad de barranco entre la unidad de LIF, los hay de diferentes dimensiones.

Figura 82. **Barrancos o abarrancamientos**



Fuente: cerro Xiquichoy, municipio Santa María Visitación.

4.3.5.2. Terraza (Te)

Se sitúan a un costado de los cauces fluviales, originadas por erosión y acumulación de materiales; con frecuencia proceden de aguas arriba. Cabe resaltar que eventualmente podrían ser zonas inundables y pueden encontrarse a lo largo del cauce principal del río Yatzá. En la figura 83, se señala con una línea punteada una terraza que se encuentra escalonada.

Figura 83. **Terraza**



Fuente: orillas del río Yatzá.

4.3.5.3. **Depósitos de canal reciente (DCR)**

Son las zonas aluviales activas, erosionan y acumulan depósitos aluviales.

Figura 84. **Zonas aluviales activas**



Fuente: orillas del río Yatzá.

Figura 85. **Depósitos de canal reciente (DCR)**



Fuente: orillas del río Yatzá.

4.3.6. Unidad antrópica

Se refiere a las actividades que involucran intervención de mano humana.

4.3.6.1. Canteras

La extracción de materiales a cielo abierto es un tipo de disturbio antrópico. En el caso de los depósitos piroclásticos de caída, son comercializados como áridos para la construcción. Se emplean en carreteras y fábricas de bloques de mampostería, entre otros.

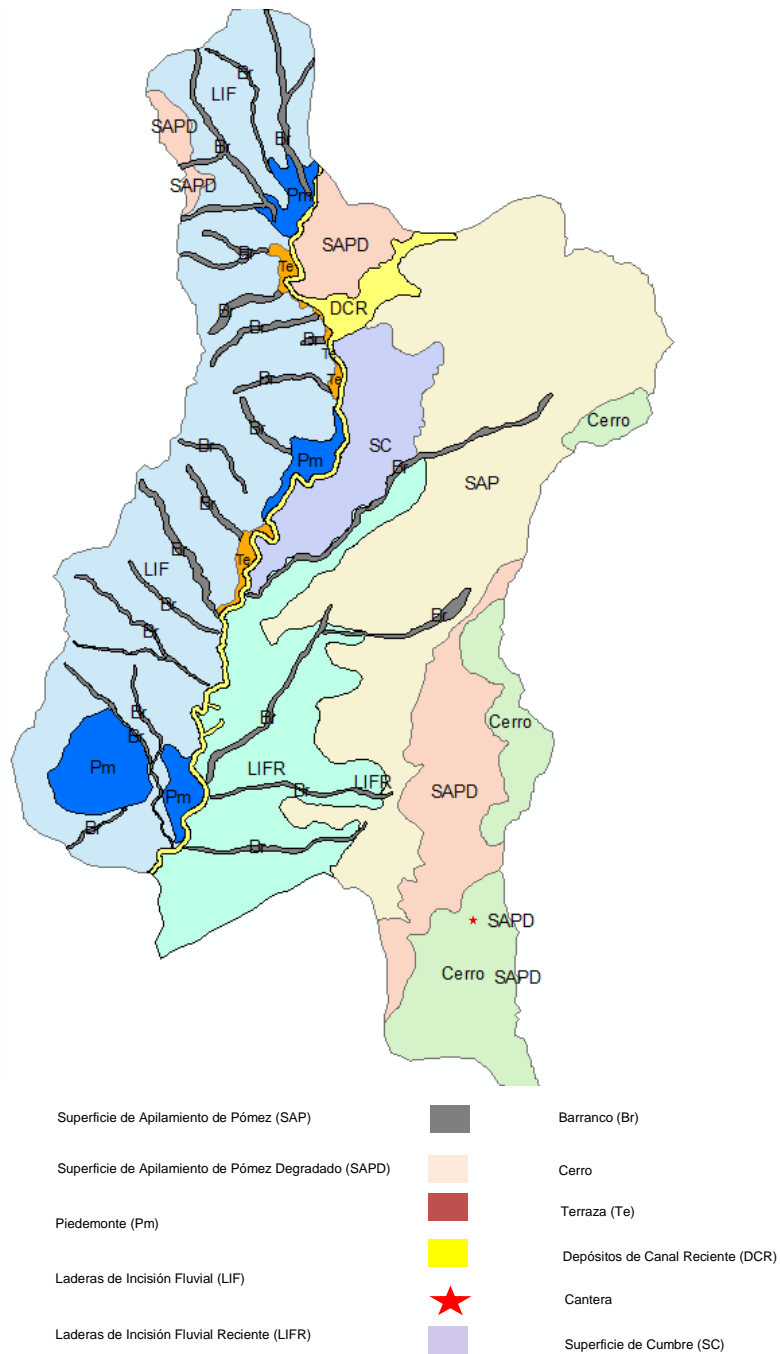
En los alrededores de Santa Clara y San Juan la Laguna se pueden observar varias excavaciones artesanales en la orilla de las carreteras o senderos; no tienen mayor profundidad. Sin embargo, existen dos canteras de dimensiones cartografiables; comercializan con este material y abastecen al municipio.

Figura 86. **Cantera artesanal**



Fuente: San Juan la Laguna.

Figura 87. **Unidades geomorfológicas en el polígono de estudio**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis 10.3.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Tratamiento de datos

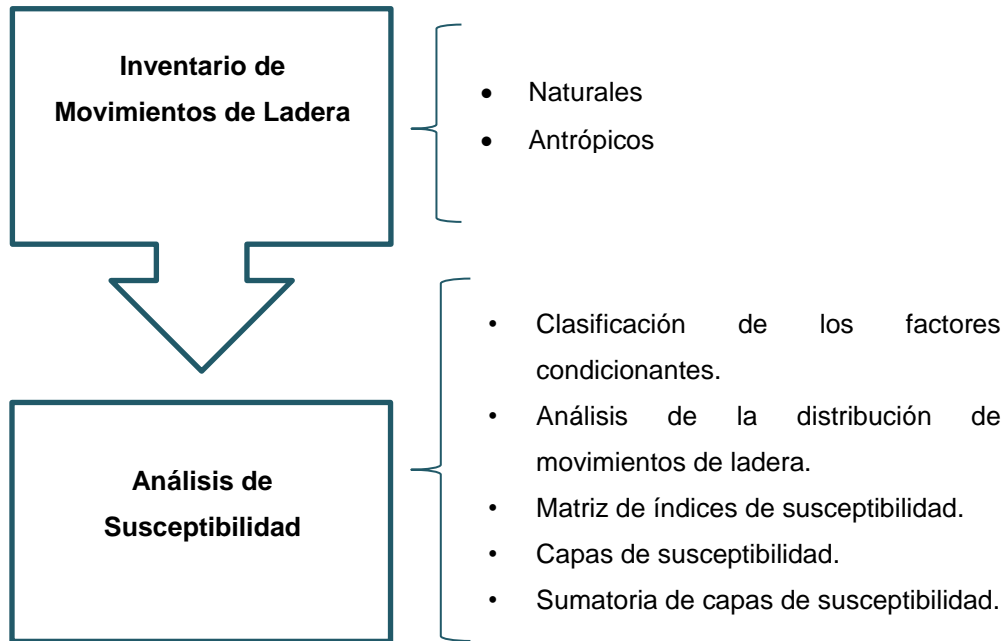
Esta etapa consistió en la elaboración de un mapa de susceptibilidad a movimientos de ladera basado en la guía metodológica para la elaboración de mapas de susceptibilidad a movimientos de ladera propuesto por Geólogos del Mundo (GM). El método estadístico bivariante es el que mejor se ajusta a la metodología utilizada, ya que toma en cuenta los factores condicionantes de forma independiente; al superponerse, se obtiene la inestabilidad del terreno.

Tabla XXIII. **Factores condicionantes**

FACTOR GEOLÓGICO	Para el análisis del factor geológico se ha creado una capa de geología a partir de la cartografía geológica.
FACTOR GEOMORFOLÓGICO	El análisis del factor geomorfológico se ha realizado a partir de la cartografía geomorfológica.
FACTOR ESTRUCTURAL	El factor estructural se ha tenido en cuenta a partir de la interpretación y localización de fallas tomando como referencia los trabajos elaborados por Bonis S. et al (1970) y el trabajo de campo y fotointerpretación realizado.
FACTOR DE USOS DEL SUELO	Para el análisis de usos del suelo se ha utilizado el mapa de usos del suelo elaborado por el MAGA (Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación) en el año 2010.
FACTOR DE PENDIENTES	La capa de pendientes del terreno se ha generado a partir de un MDT con software ArcGis 10.3.
FACTOR DE ORIENTACIONES	La capa de orientaciones de ladera se ha generado a partir de un MDT mediante el software ArcGis.

Fuente: PARICIO, Sergi. *Caracterización geotemática de la microcuenca de Tzozomá*, Vivamos Mejor. p.49.

Figura 88. **Esquema de la metodología**



Fuente: elaboración propia.

A continuación, se especifica el procedimiento detallado para el tratamiento de datos:

5.1.1. Inventario de movimientos de ladera

El conteo estadístico se realiza para los movimientos de ladera de origen natural y antrópico con tratamiento de datos geoespaciales (imágenes satelitales, ortofotos). El inventario de movimientos de ladera comprende 10 años (2006 - 2016).

5.1.2. Clasificación de los factores condicionantes

El análisis de la distribución de movimientos de ladera se logra estudiando cada factor por separado. Una vez realizado el conteo de movimientos de masa, se realiza un análisis estadístico de la distribución espacial de los movimientos de ladera en cada capa.

La matriz de índices de susceptibilidad se resuelve introduciendo en una hoja de cálculo el número de movimientos de ladera ocurridos dentro de cada rango y el área que ocupa cada rango. Luego se divide el número de deslizamientos de cada rango entre el área que ocupa cada rango, obteniéndose un índice que debe relativizarse a 1, de modo que solo haya valores entre 0 y 1.

Los índices determinados en el apartado anterior se introducen en cada capa de factores condicionantes, logrando así dar un valor a las capas de susceptibilidad.

La sumatoria de capas de susceptibilidad, teniendo cada capa por separado con sus respectivos valores, se procede a realizar una integración de todas ellas.

Por último, debe seleccionarse una hipótesis numérica, para acertar en el pronóstico de deslizamiento en función de un número mínimo de casos conocidos.

5.2. Grados de susceptibilidad

La metodología aplicada propone una zonificación territorial de 5 grados de susceptibilidad: muy alta, alta, media, baja y muy baja.

Las recomendaciones para cada zona en función del grado de susceptibilidad propuestas, se describen a continuación.

5.2.1. Zona de susceptibilidad al deslizamiento muy alta (ZSDMA)

Se considera que no es apta para realizar ninguna actividad antrópica, incluyendo el paso peatonal, cultivar, actividad ganadera, extracción de áridos, minería, instalación de infraestructura (abastecimiento, saneamiento, telefonía, eléctricas).

5.2.2. Zona de susceptibilidad al deslizamiento alta (ZSDA)

Se considera que es apta para actividades de reforestación con especies adecuadas al entorno. No es apta para construcción de viviendas, actividades ganaderas, cultivos, extracción de áridos, minería, instalación de infraestructura (abastecimiento, saneamiento, telefonía, eléctricas).

5.2.3. Zona de susceptibilidad al deslizamiento media (ZSDM)

Es apta para actividades de reforestación con especies adecuadas al entorno. También es apta para actividades agrícolas, ganaderas y de instalación de infraestructura (siempre con técnicas ingenieriles previas). No es apta para la construcción de viviendas ni extracción de áridos.

5.2.4. Zona de susceptibilidad al deslizamiento baja (ZSDB)

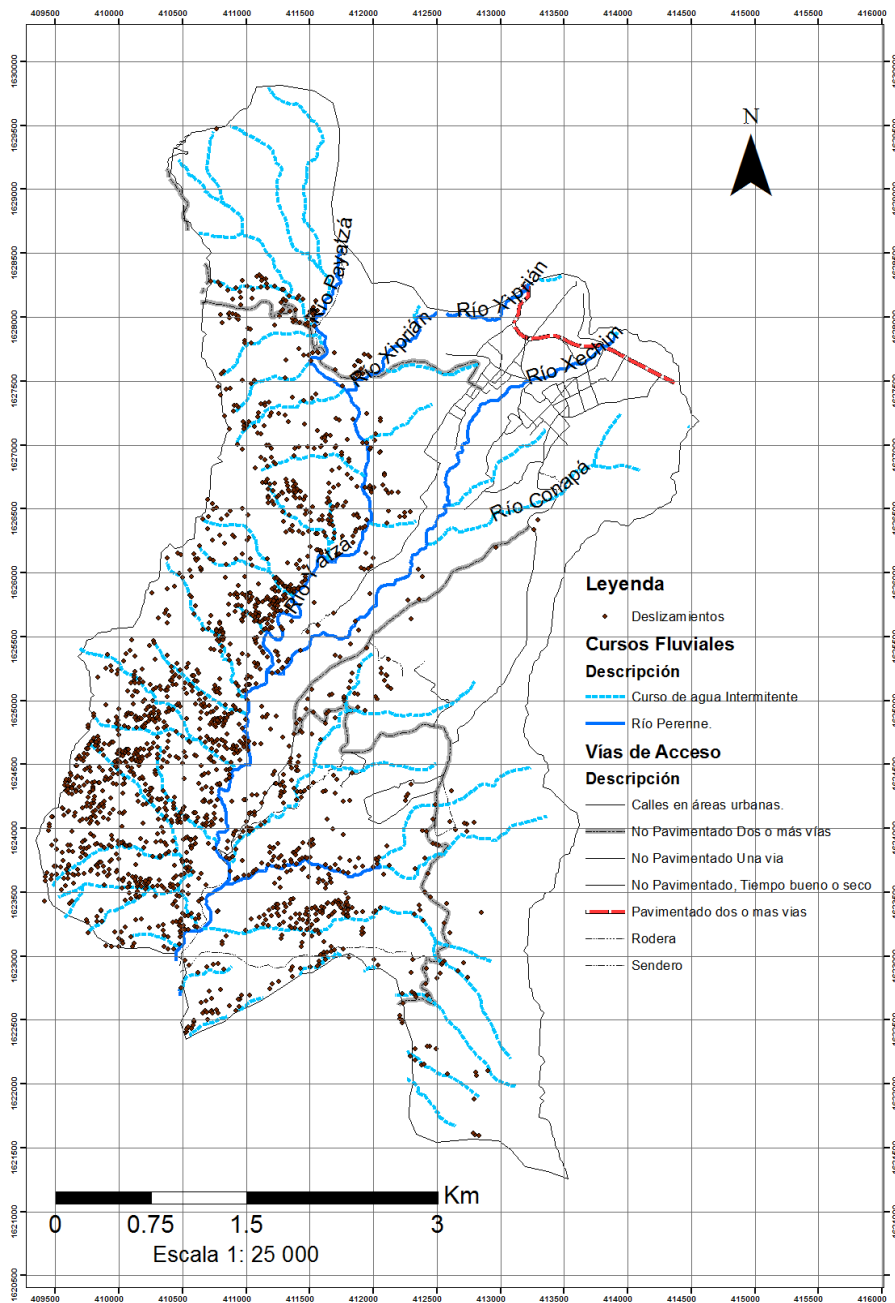
Al igual que ZSDMB, son aptas para realizar actividades de reforestación, construcción de viviendas, actividades agrícolas, ganaderas, extracción minera y/o áridos y la instalación de infraestructuras varias.

5.3. Resultados

El total de movimientos de ladera de origen antrópico y natural se muestra en la figura 89, con un total de 1 810 movimientos de ladera.

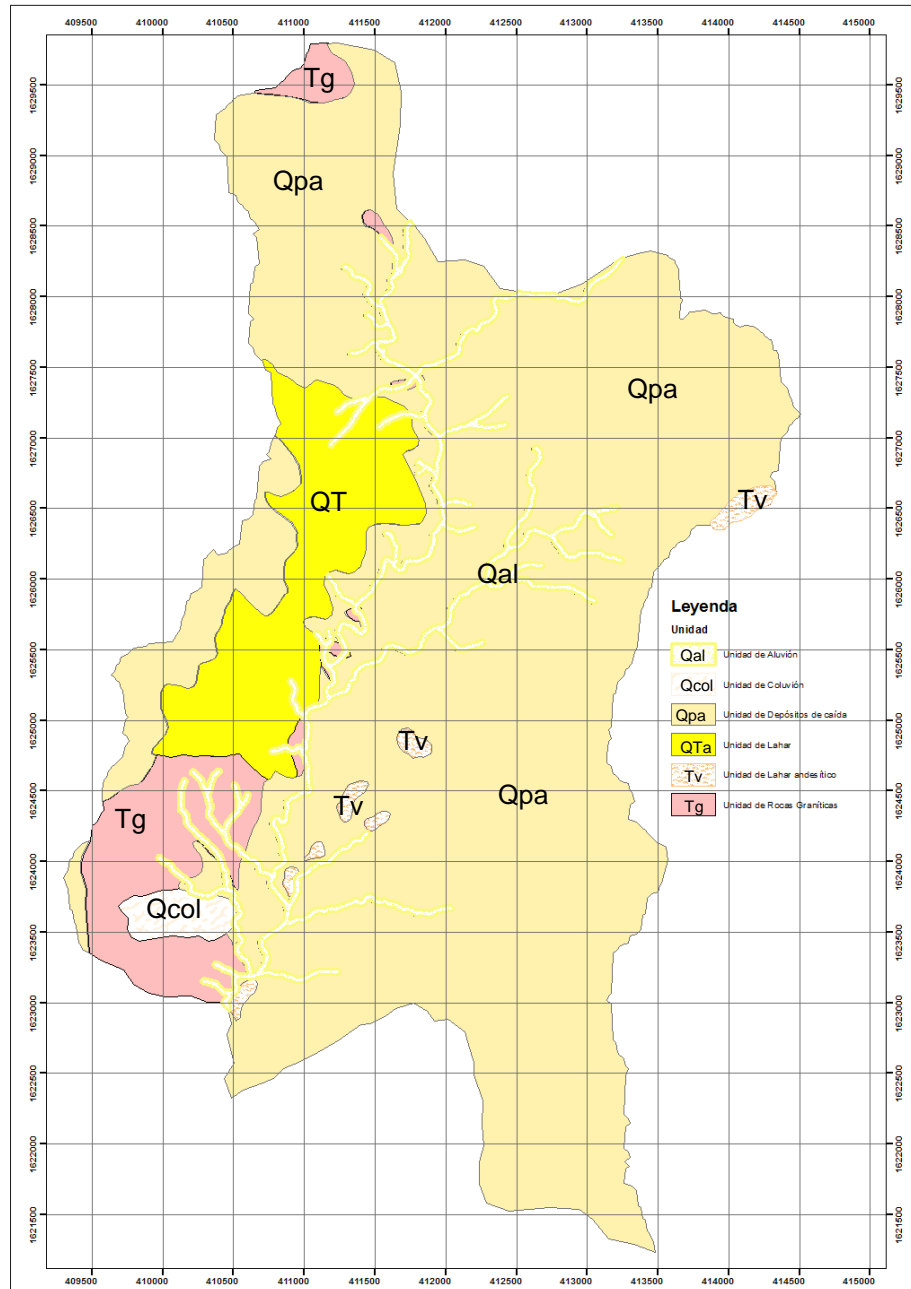
Las capas de geología (figura 90), geomorfología (figura 91), usos del suelo (figura 92), orientaciones (figura 93), pendientes (figura 94), y estructural (figura 95) fueron elaborados por separado mediante el *software* ArcGis versión 10.3.

Figura 89. Inventario de movimientos de ladera (2006-2016)



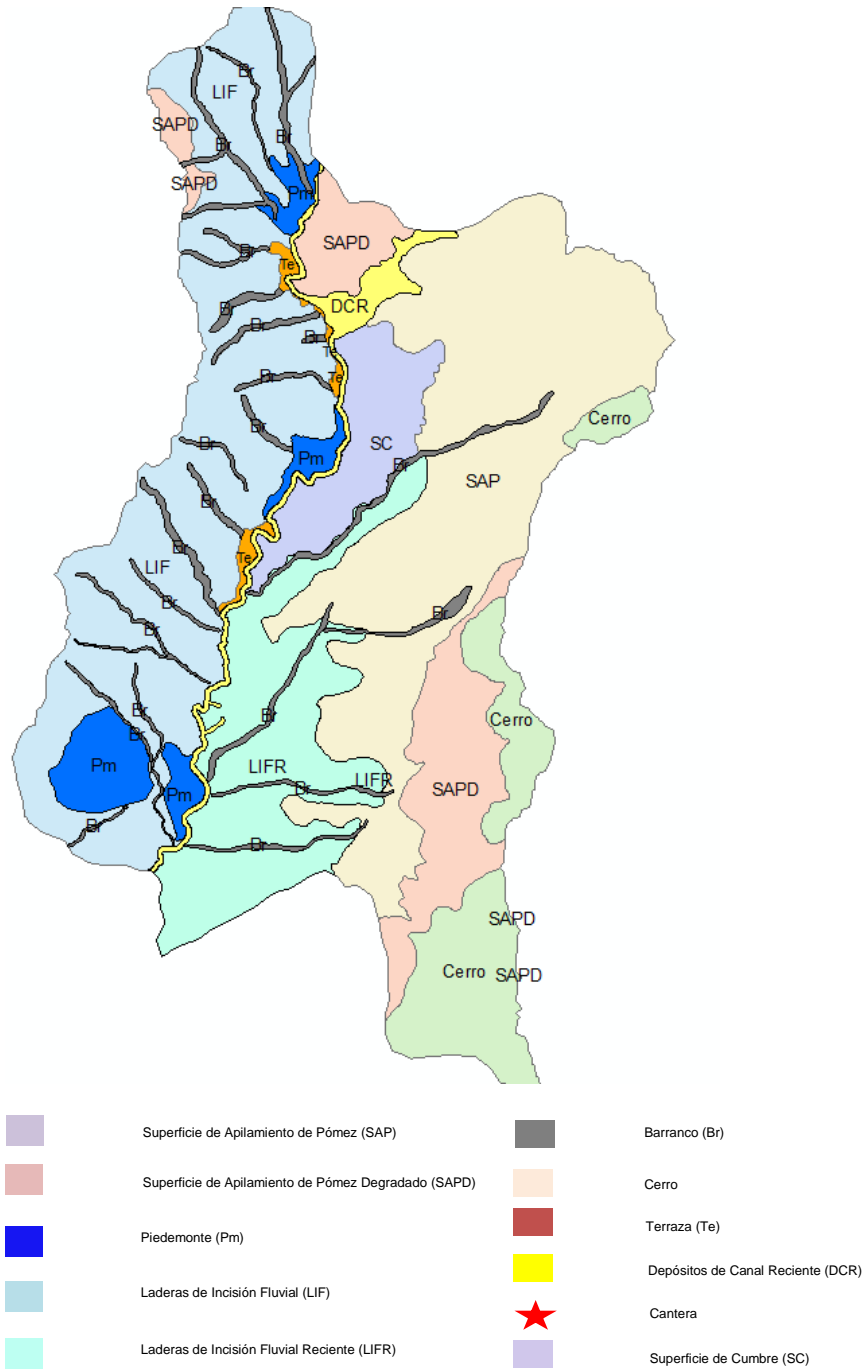
Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis versión 10.3.

Figura 90. Capa de geología



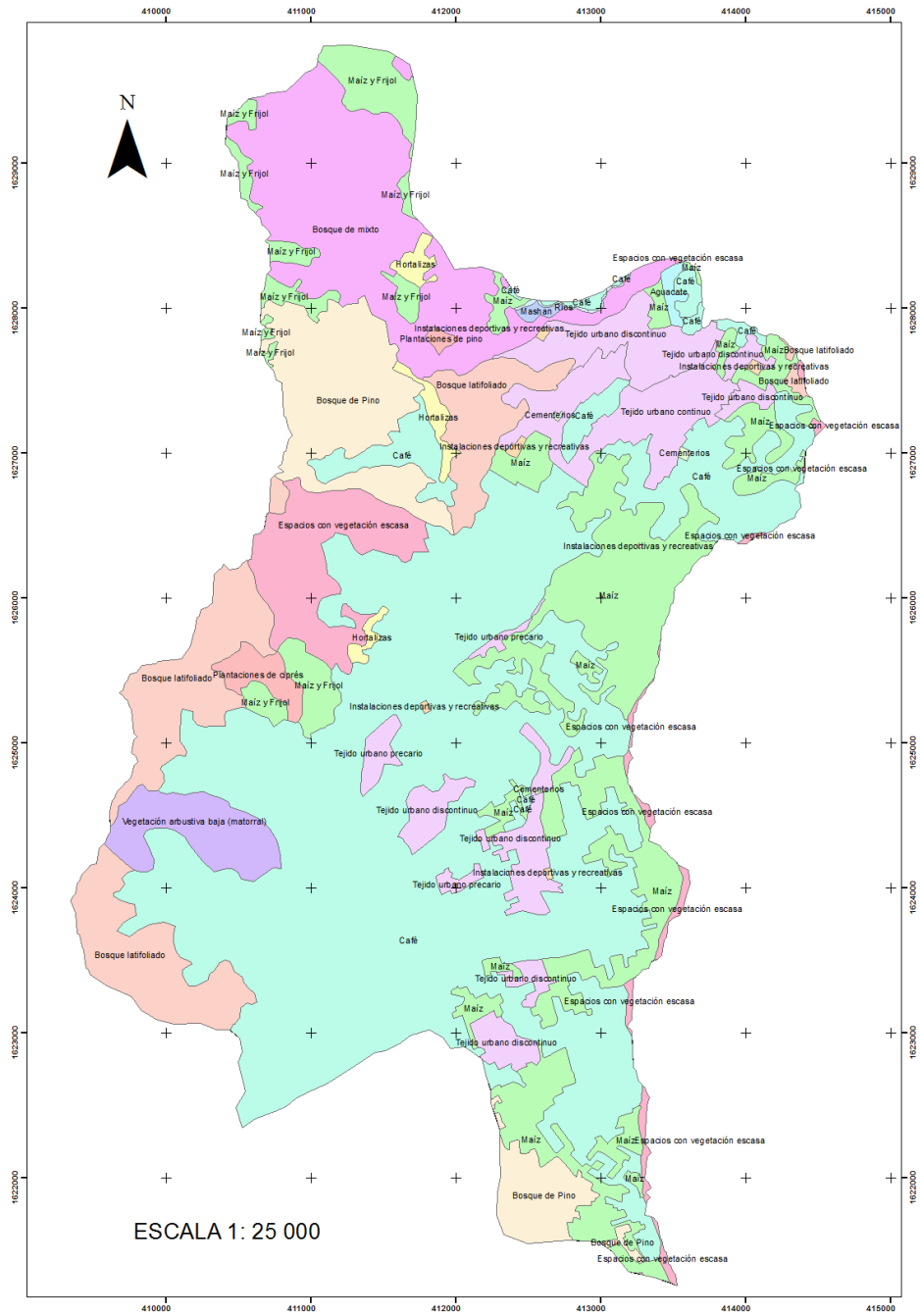
Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis versión 10.3.

Figura 91. Capa de geomorfología



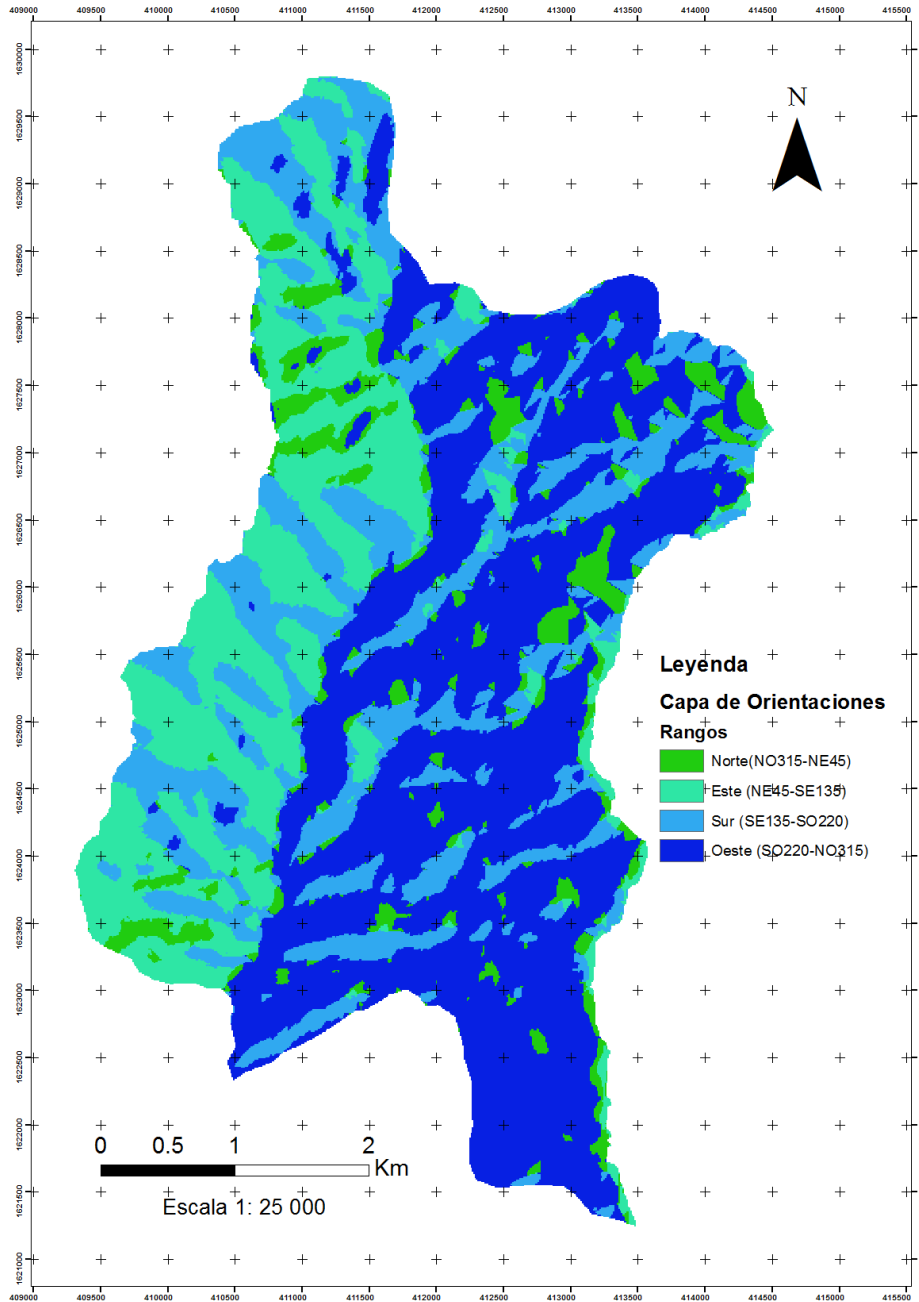
Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis versión 10.3.

Figura 92. Capa de uso del suelo



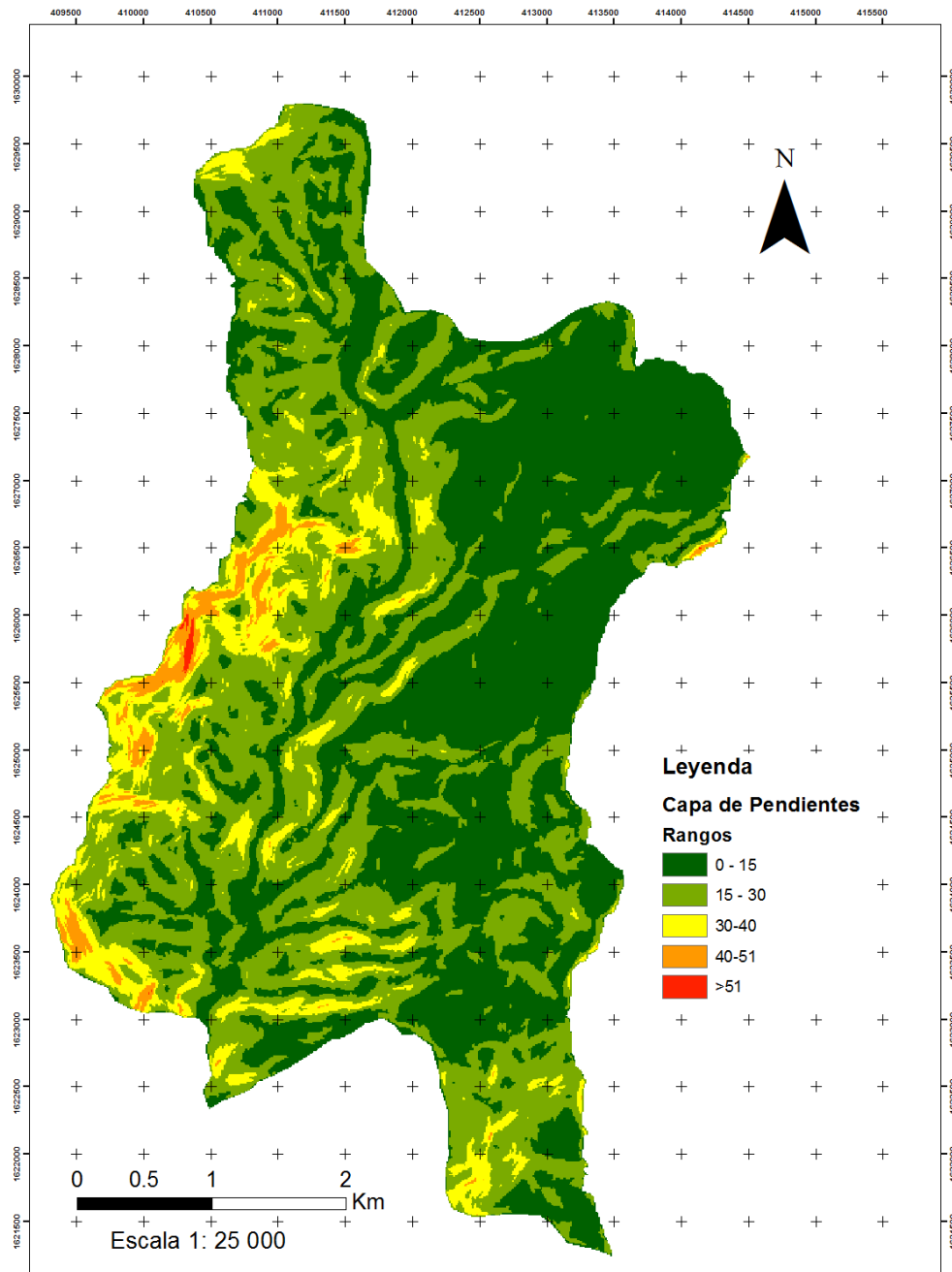
Fuente: elaboración propia, empleando ArcGIS versión 10.3.

Figura 93. **Capa de orientaciones**



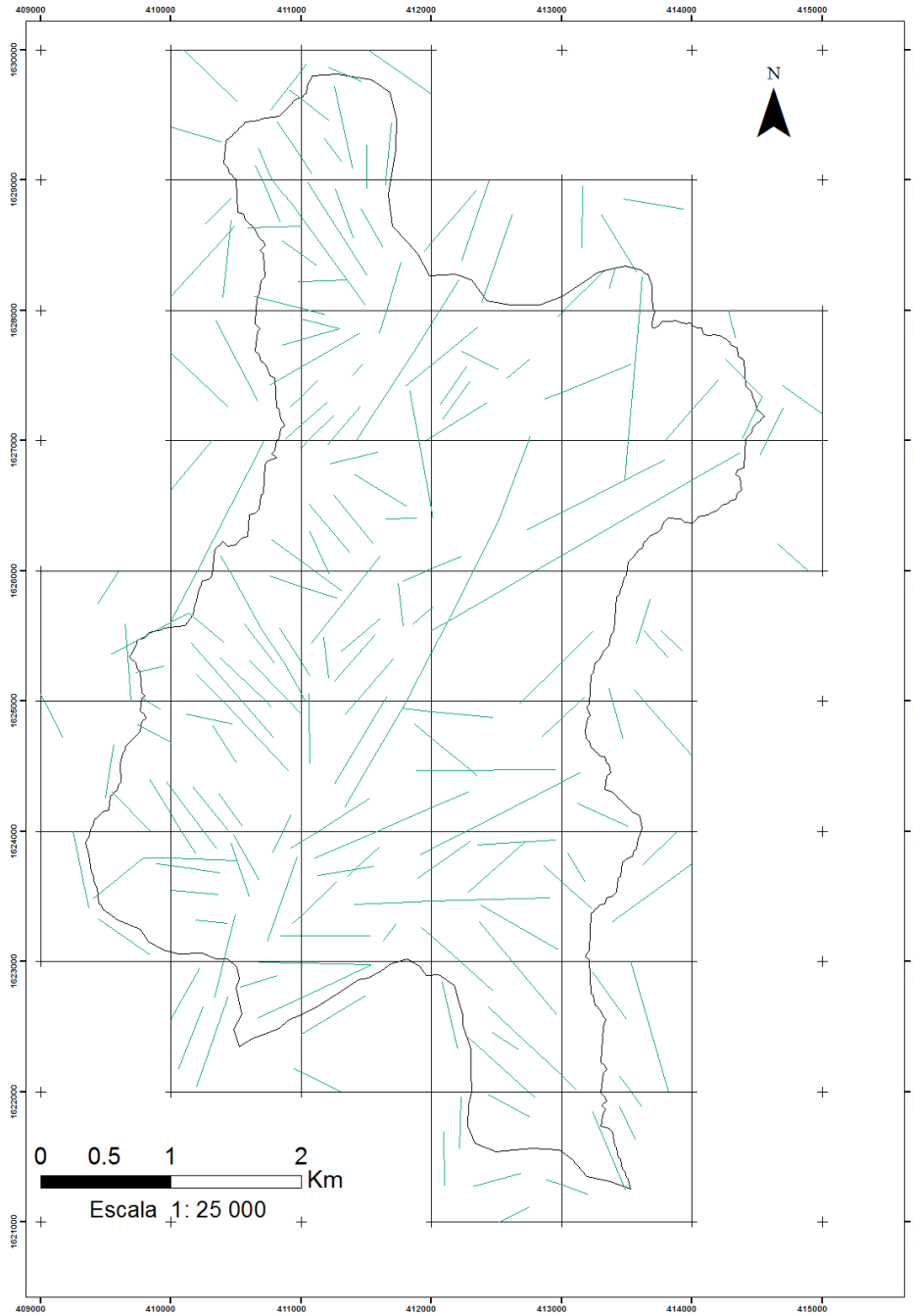
Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis versión 10.3.

Figura 94. **Capa de pendientes**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis versión 10.3.

Figura 95. **Capa de lineamientos**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis versión 10.3.

5.4. Análisis entre movimientos de ladera y factores activadores

Las capas se separaron en categorías o rangos para darle a cada unidad un valor diferenciado. En la tabla XXIV se puede consultar el número de movimientos de ladera reportados para cada rango de cada factor determinante. En la tabla XXV se presenta el área en metros cuadrados que ocupa cada rango de cada factor condicionante.

Para la obtención de los índices de susceptibilidad, se introdujo en una tabla electrónica el número de movimientos de ladera (D) ocurridos dentro de cada rango y el área que ocupa cada rango (A), para los diferentes factores condicionantes.

A continuación, se dividió el número de deslizamientos de cada rango, entre el área que ocupa cada rango, obteniéndose un índice para cada rango.

$$\frac{D}{A} = I$$

Posteriormente estos índices (I) se normalizan a 1 (Pr), de manera que los índices de susceptibilidad obtenidos, tengan un valor entre 0 y 1, en cada uno de los rangos para cada factor condicionante.

$$\frac{I}{I_{max}} = Pr$$

Tabla XXIV. **Movimientos de ladera en cada capa**

	Geomorfo.	Litología	Uso del Suelo	Estructural	Pendientes	Orientaciones
Rango 1	135	21	135	0	480	132
Rango 2	9	73	9	25	986	714
Rango 3	56	141	56	197	277	766
Rango 4	922	354	922	448	66	198
Rango 5	300	420	300	464	1	
Rango 6	204	801	204	419		
Rango 7	61		61	196		
Rango 8	45		45	61		
Rango 9	47		47			
Rango 10	31		31			
total	1 810	1 810	1 810	1 810	1 810	1 810

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Área (m²) ocupada por cada rango**

	Geomorfo.	Litología	Uso del Suelo	Estructural	Pendientes	Orientaciones
Rango 1	998 177,895	172 102,720	40 754,512	698 173,607	10 716 734,772	698 173,607
Rango 2	1 901 417,652	233 192,951	1 968 242,123	3 091 313,344	9 104 905,524	3 091 313,344
Rango 3	555 866,798	1 121 340,714	1 514 303,374	4 704 708,755	2 033 240,166	4 704 708,755
Rango 4	5 921 705,227	1 504 725,690	1 988 051,578	4 418 043,008	420 247,309	4 418 043,008
Rango 5	2 682 980,319	2 053 883,146	9 620 477,657	4 607 487,266	26 005,357	4 607 487,266
Rango 6	885 630,545	17 215 875,880	10 056,406	3 424 474,151		3 424 474,151
Rango 7	5 957 805,993		816 468,880	1 049 014,242		1 049 014,242
Rango 8	2 155 026,593		164 422,677	307 916,014		307 916,014
Rango 9	1 113 041,180		31 125,258			
Rango 10	130 669,896		2 842 912,210			
Rango 11			730 171,841			
Rango 12			24 916,378			
Rango 13			220,782			
Rango 14			145 660,726			
Rango 15			21 332,999			
Rango 16			11 722,832			
Rango 17			688 269,791			
Rango 18			1 078 342,608			
Rango 19			142 771,906			
Rango 20			460 905,816			
total	22 301 130,364	22 301 130,364	22 301 130,364	22 301 130,364	22 301 130,364	22 301 130,364

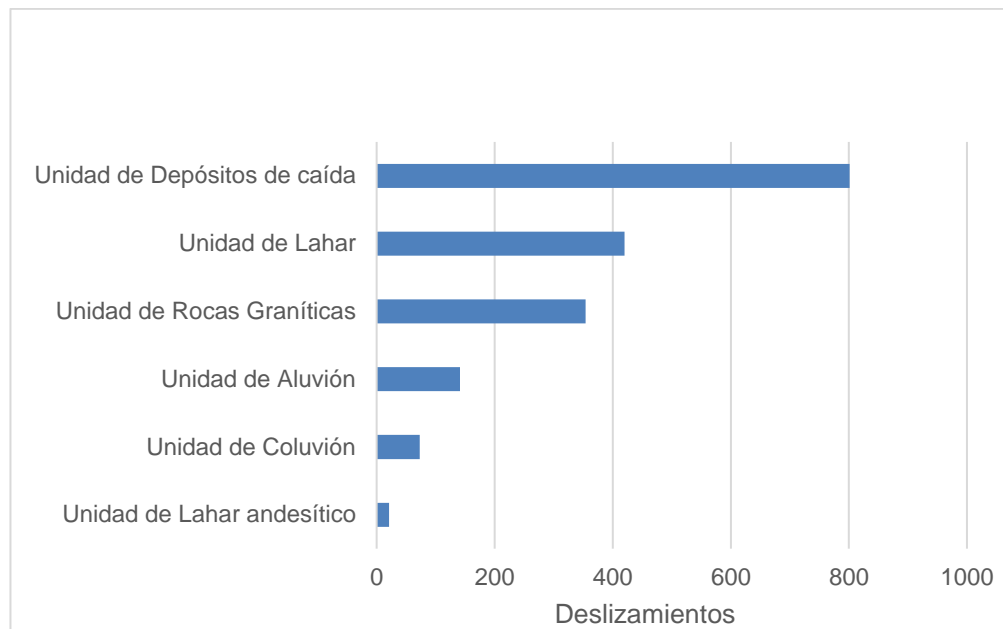
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. Índice de susceptibilidad para la capa de geología

COD	Unidad	Deslizamientos	Área (m ²)	I=D/A
1	Lahar andesítico	21	172 102,720	1,22E-04
2	Coluvión	73	233 192,951	3,13E-04
3	Aluvión	141	1 121 340,714	1,26E-04
4	Rocas graníticas	354	1 504 725,690	2,35E-04
5	Lahar	420	2 053 883,146	2,04E-04
6	Dep. Piroclásticos de Caída	801	17 215 875,880	4,65E-05

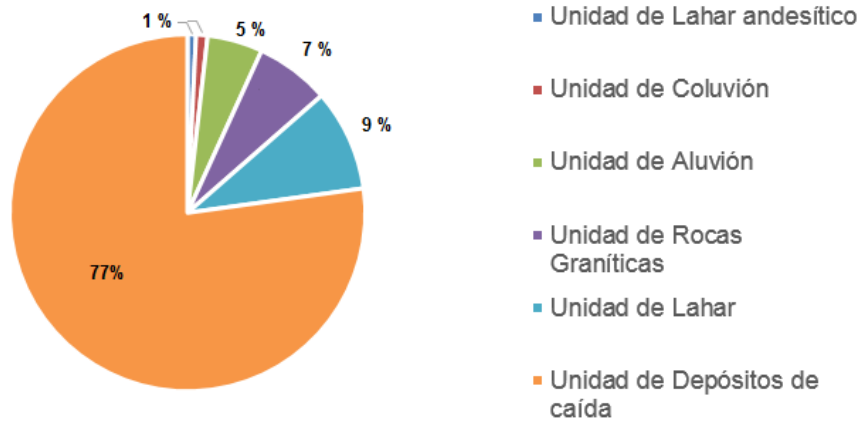
Fuente: elaboración propia.

Figura 96. Deslizamientos que alberga la capa de geología



Fuente: elaboración propia.

Figura 97. Área (m²) de los rangos, en la capa geología



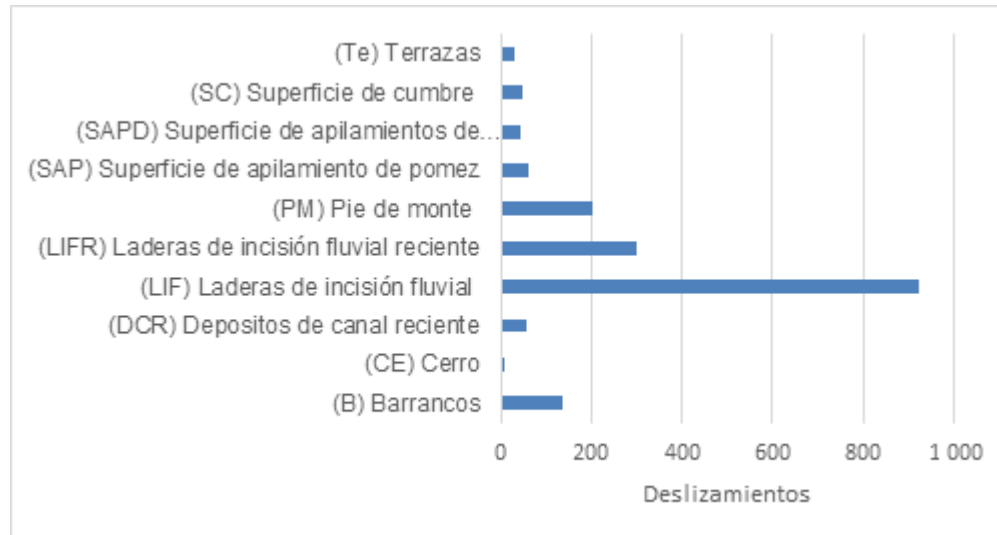
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. Índice de susceptibilidad para la capa de geomorfología

COD	Rango	Deslizamientos	Área	I=D/A
1	Barrancos	135	998 177,896	1,35E-04
2	Cerro	9	1 901 417,652	4,73E-06
3	Depositos de canal reciente	56	555 866,798	1,01E-04
4	Laderas de incisión fluvial	922	5 921 705,228	1,56E-04
5	Laderas de incisión fluvial reciente	300	2 682 980,320	1,12E-04
6	Pie de monte	204	885 630,545	2,30E-04
7	Superficie de apilamiento de pomez	61	5 957 805,994	1,02E-05
8	Superficie de apilamientos de pomez degradado	45	2 155 026,593	2,09E-05
9	Superficie de cumbre	47	1 113 041,181	4,22E-05
10	Terrazas	31	130 669,897	2,37E-04

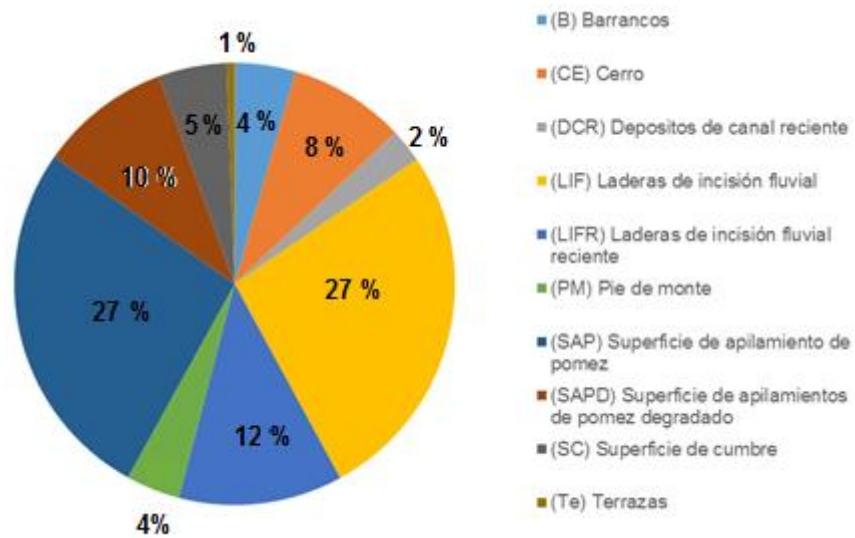
Fuente: elaboración propia.

Figura 98. **Deslizamientos que alberga la capa de geomorfología**



Fuente: elaboración propia.

Figura 99. **Área (m²) de los rangos, en la capa geomorfología**



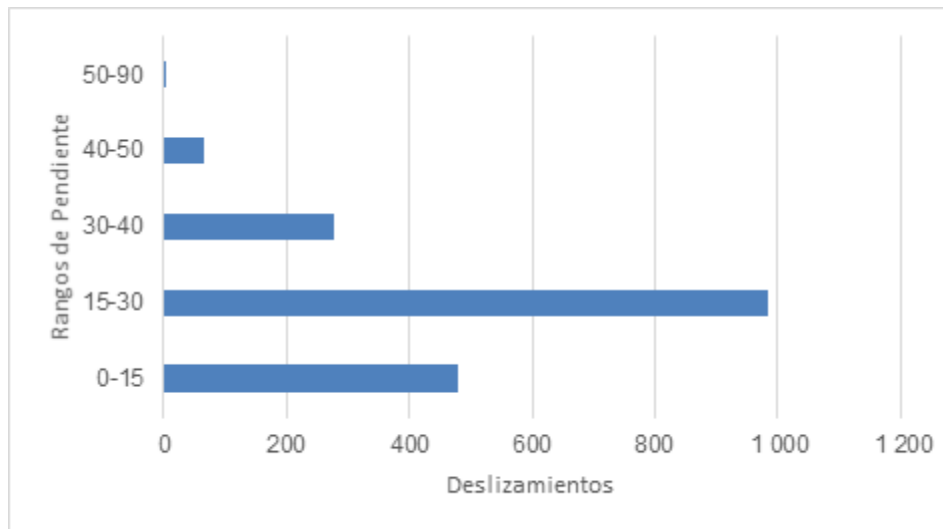
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. Índice de susceptibilidad para la capa de pendientes

COD	Pendiente	Deslizamientos	Área	D/A
1	0-15	480	10 716 734,7	4,48E-05
2	15-30	986	9 104 905,52	1,08E-04
3	30-40	277	2 033 240,16	1,36E-04
4	40-50	66	420 247,309	1,57E-04
5	50-90	1	26 005,357	3,85E-05

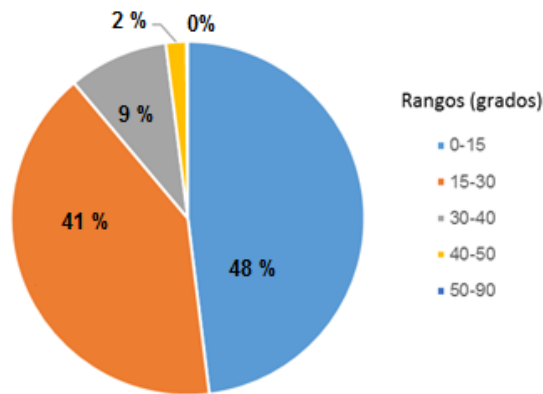
Fuente: elaboración propia.

Figura 100. Deslizamientos que alberga la capa pendientes



Fuente: elaboración propia.

Figura 101. Área (m²) de los rangos, en la capa pendientes



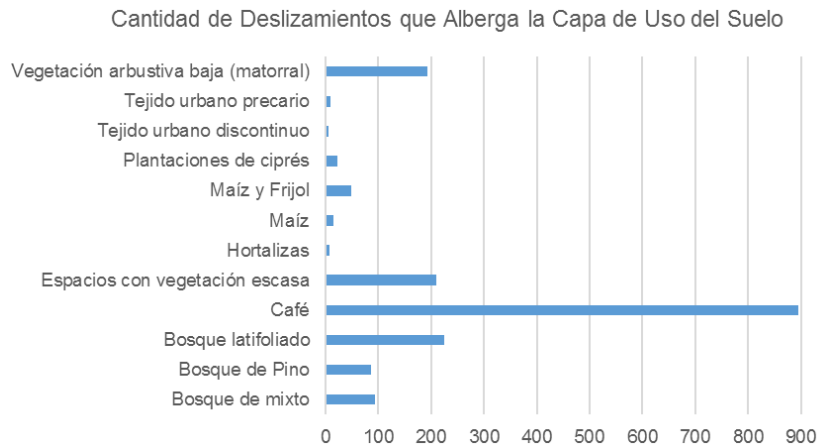
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. Índice de susceptibilidad para la capa de uso del suelo

COD	Uso de Suelo	Deslizamientos	Area	D/A
1	Aguacate	0	40 754,512	
5	Bosque de mixto	94	1 968 242,123	4,78E-05
3	Bosque de Pino	86	1 514 303,374	5,68E-05
4	Bosque latifoliado	224	1 988 051,578	1,13E-04
6	Café	894	9 620 477,657	9,29E-05
2	Cementerios	0	10 056,406	
8	Espacios con vegetación es	210	816 468,880	2,57E-04
9	Hortalizas	8	164 422,677	4,87E-05
2	Ins. deportivas y recreativas	0	31 125,258	0
10	Maíz	15	2 842 912,210	5,28E-06
11	Maíz y Frijol	49	730 171,841	6,71E-05
11	Mashan	0	24 916,378	
12	Pastos naturales	0	220,782	
13	Plantaciones de ciprés	23	145 660,726	1,58E-04
13	Plantaciones de pino	0	21 332,999	
14	Ríos	0	11 722,832	
16	Tejido urbano continuo	0	688 269,791	
17	Tejido urbano discontinuo	5	1 078 342,608	4,64E-06
18	Tejido urbano precario	9	142 771,906	6,30E-05
19	Vegetación arbustiva baja (r	193	460 905,816	4,19E-04

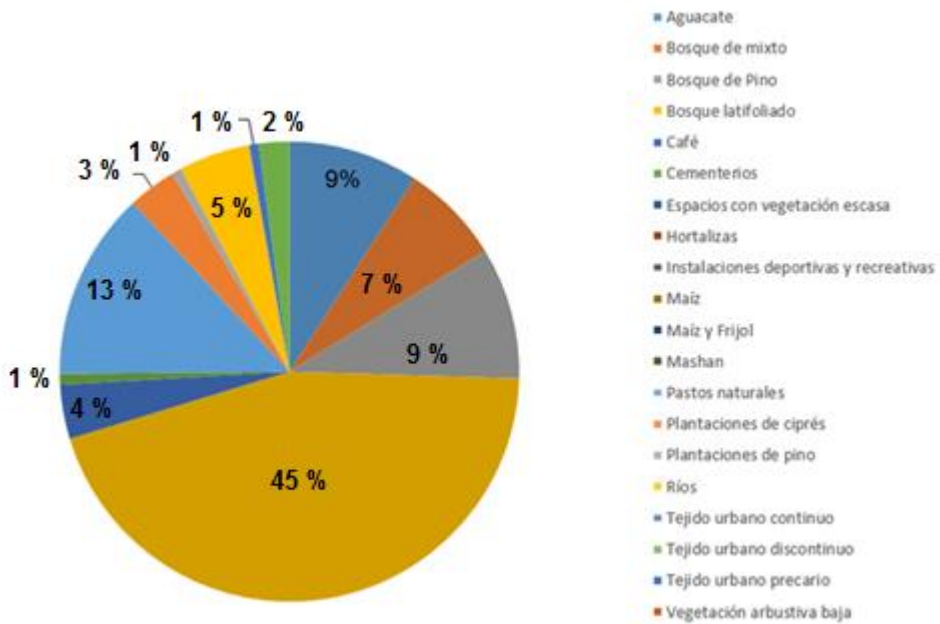
Fuente: elaboración propia.

Figura 102. **Deslizamientos que alberga la capa de uso del suelo**



Fuente: elaboración propia.

Figura 103. **Área (m²) de los rangos, en la capa de uso del suelo**



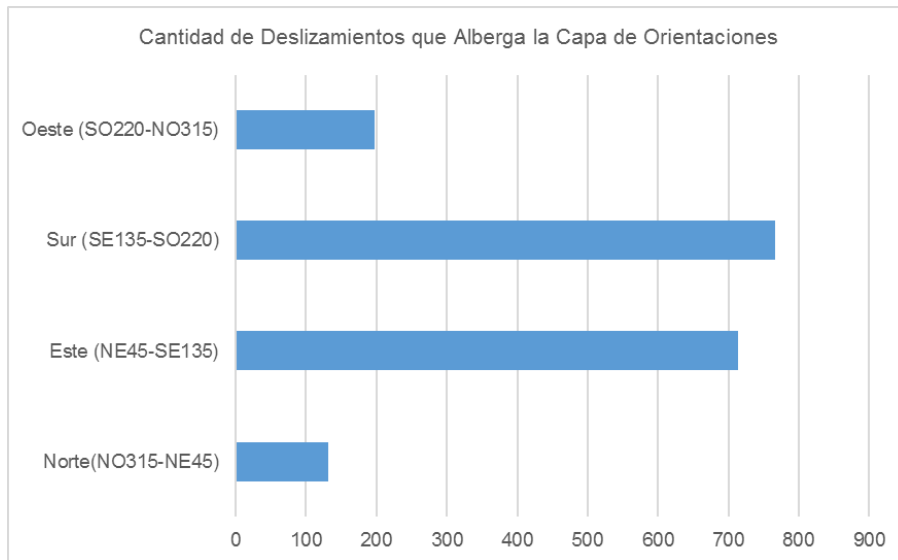
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. Índice de susceptibilidad para la capa de orientaciones

COD	Orientación	Deslizamientos	Área	D/A
1	Norte	132	4 115 778,289	3,21E-05
2	Este	714	4 983 467,199	1,43E-04
3	Sur	766	5 737 994,687	1,33E-04
4	Oeste	198	7 463 962,862	2,65E-05

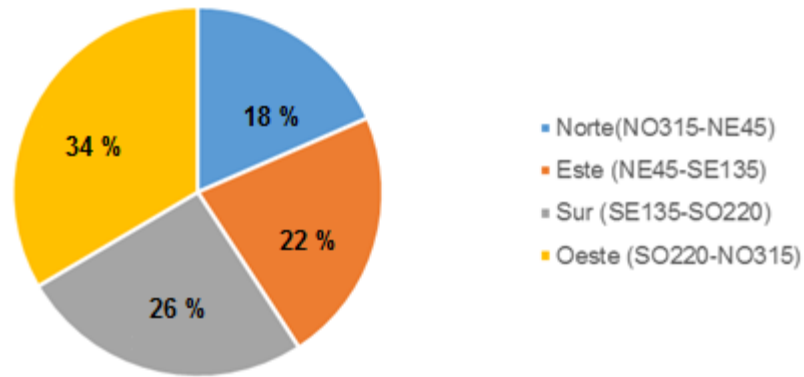
Fuente: elaboración propia.

Figura 104. Deslizamientos que alberga la capa de orientaciones



Fuente: elaboración propia.

Figura 105. Área (m²) de los rangos, en la capa de orientaciones



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. Índice de susceptibilidad para la capa de estructural

COD	Rangos	Deslizamientos	Área	D/A
1	0,7 - 1,4	0	698 173,607	0
2	1,4 - 2,1	25	3 091 313,344	8,09E-06
3	2,1 - 2,8	197	4 704 708,755	4,19E-05
4	2,8 - 3,5	448	4 418 043,008	1,01E-04
5	3,5 - 4,2	464	4 607 487,266	1,01E-04
6	4,2 - 4,9	419	3 424 474,151	1,22E-04
7	4,9 - 5,6	196	1 049 014,242	1,87E-04
8	5,6 - 6,3	61	307 916,014	1,98E-04

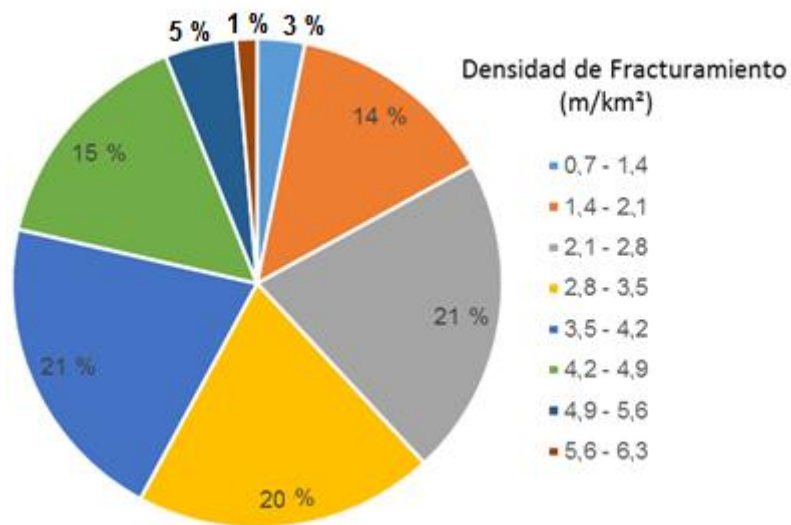
Fuente: elaboración propia.

Figura 106. **Deslizamientos que alberga la capa de estructural**



Fuente: elaboración propia.

Figura 107. **Área (m²) de los rangos, en la capa de estructural**



Fuente: elaboración propia.

Una vez se tiene el índice de susceptibilidad, se lleva a cabo el proceso de relativización de índices (entre 0 -1), en cada uno de los rangos para cada factor condicionante.

Tabla XXXII. Índices ponderados

Litología		
Rango	I	Normalización
1	0,00012202	0,11653
2	0,0003130	0,2989687
3	0,00012574	0,1200
4	0,00023	0,2246
5	0,00020449	0,19529
6	0,00004652	0,044434
Sumatoria	0,001047	1

Geomorfología		
Rango	I	Normalización
1	0,000135	0,12890
2	4,73E-06	0,0045114
3	0,0001	0,096022
4	0,00015	0,148401
5	0,000111	0,106575
6	0,00023	0,21954
7	0,00001	0,009758
8	0,000020	0,019902
9	0,000042	0,040247
10	0,000237	0,22612
Sumatoria	0,0010	1

Pendientes		
Rango	I	Normalización
1	0,0000447	0,09238
2	0,000108	0,22336
3	0,00013	0,281001
4	0,00015	0,323933
5	0,000038	0,07931
Sumatoria	0,0004848	1

Continuación tabla XXXII.

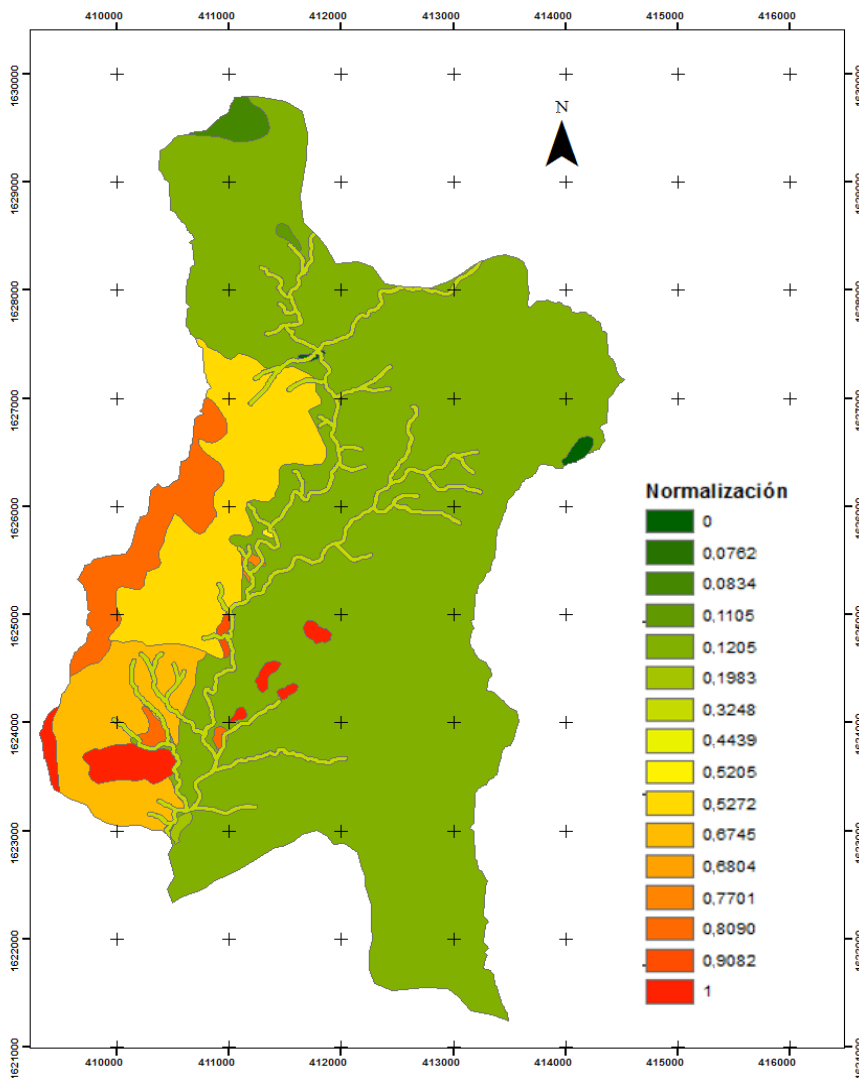
Orientaciones		
Rango	I	Normalización
1	3,21E-05	0,0956
2	1,43E-04	0,42721
3	1,33E-04	0,39805
4	2,65E-05	0,079099
Sumatoria	3,35E-04	1
Uso del Suelo		
Rango	I	Normalización
1	0	0
2	4,78E-05	0,035835
3	5,68E-05	0,042613
4	1,13E-04	0,0845443
5	9,29E-05	0,0697276
6	0	0
7	2,57E-04	0,1929940
8	4,86E-05	0,0365083
9	0	0
10	5,27E-06	0,00395905
11	6,710E-05	0,0503541
12	0	0
13	0	0
14	1,58E-04	0,1184812
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	4,64E-06	0,003479
19	6,30E-05	0,0473003
20	4,19E-04	0,3142023
Sumatoria	1,33E-03	1
Estructural		
Rango	I	Normalización
1	0	0
2	8,09E-06	1,06E-02
3	4,19E-05	5,51E-02
4	1,01E-04	1,34E-01
5	1,01E-04	1,33E-01
6	1,22E-04	1,61E-01
7	1,87E-04	2,46E-01
8	1,98E-04	2,61E-01
Sumatoria	7,59E-04	1

Fuente: elaboración propia.

5.5. Sumatoria de capas de susceptibilidad

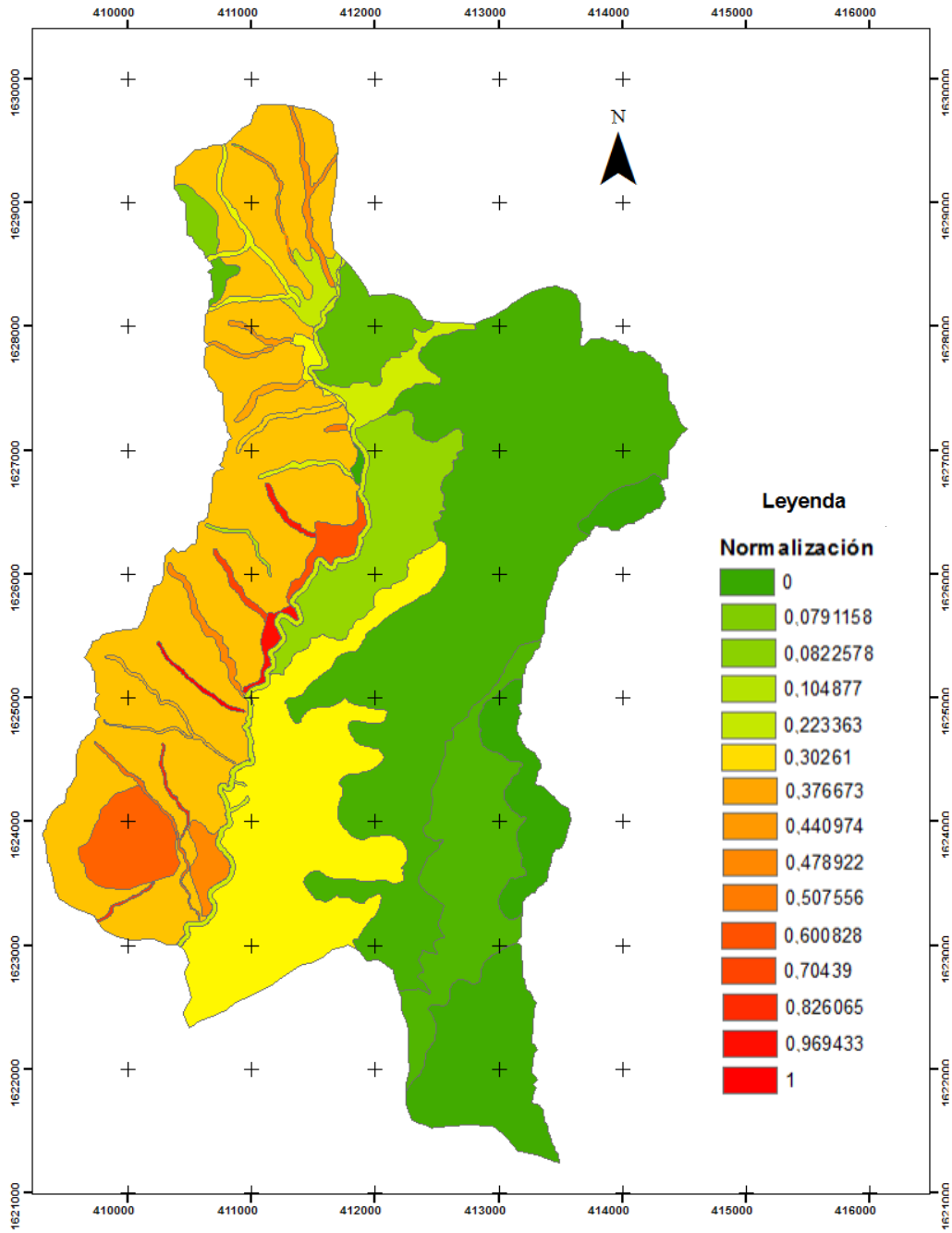
Una vez obtenidos los índices ponderados para cada categoría, los valores fueron introducidos en los mapas de factores condicionantes. De esta manera se representaron los índices de susceptibilidad en diferentes categorías.

Figura 108. **Capa de litología**



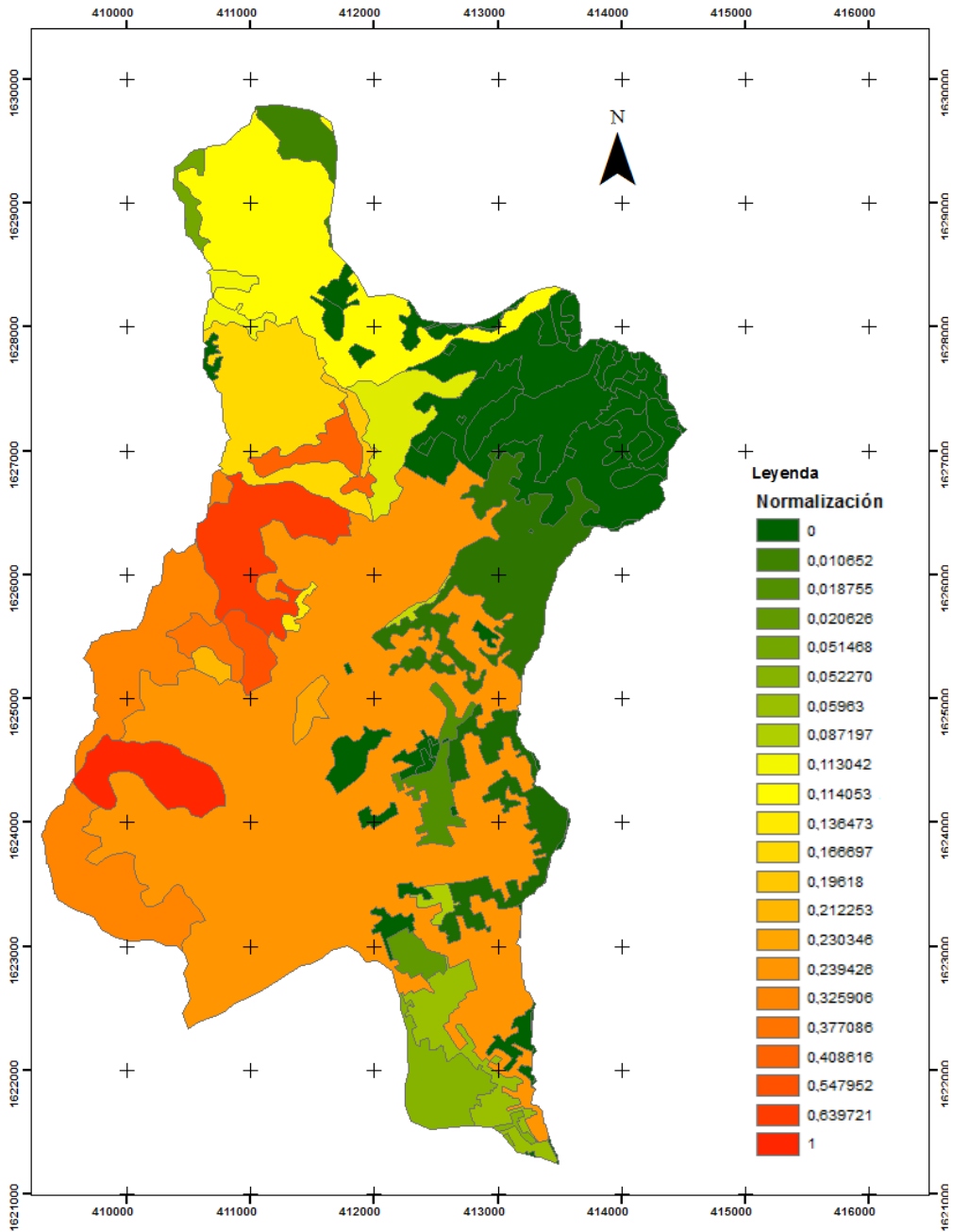
Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis versión 10.3.

Figura 109. Capa de geomorfología



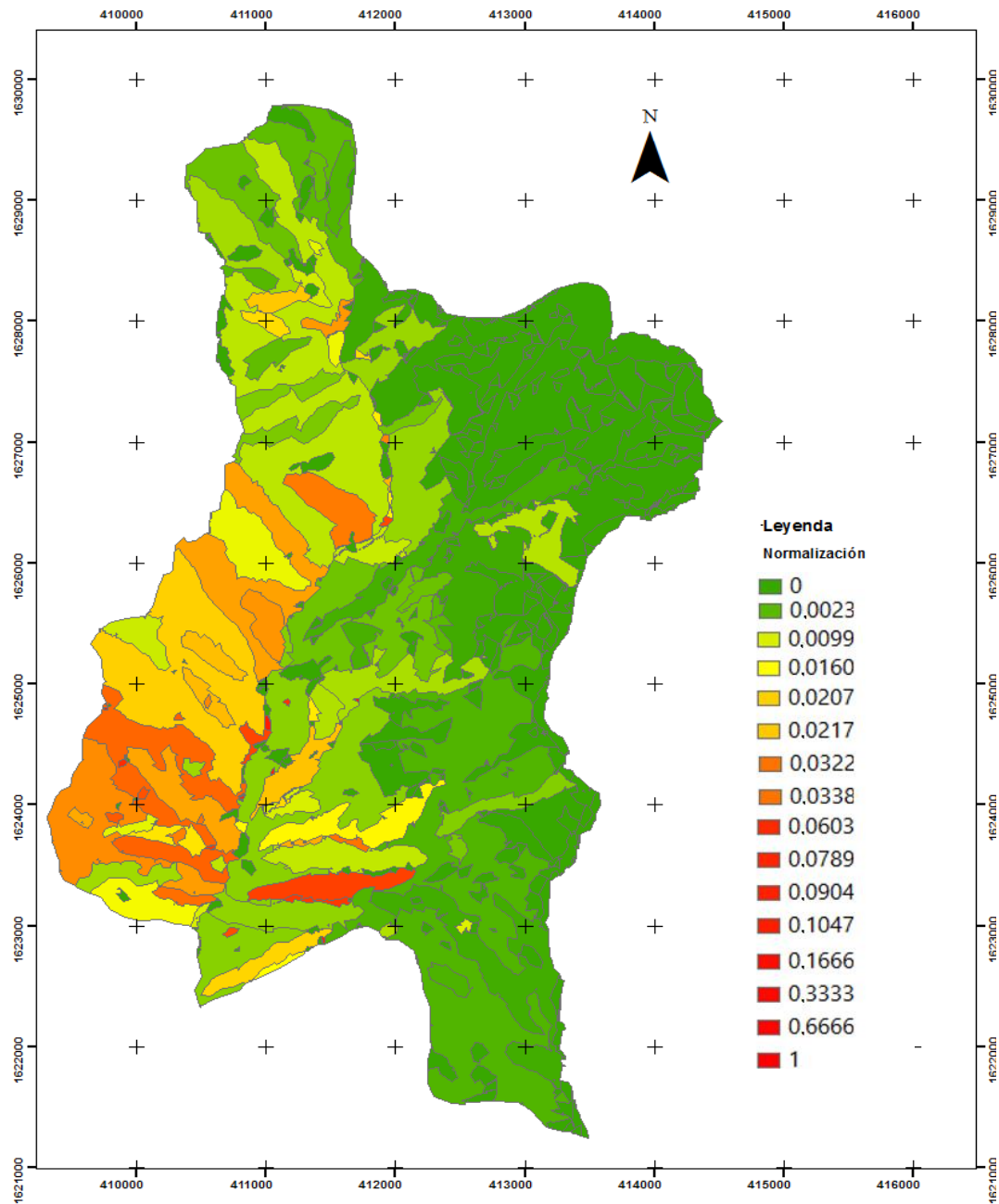
Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis versión 10.3.

Figura 110. Capa de uso del suelo



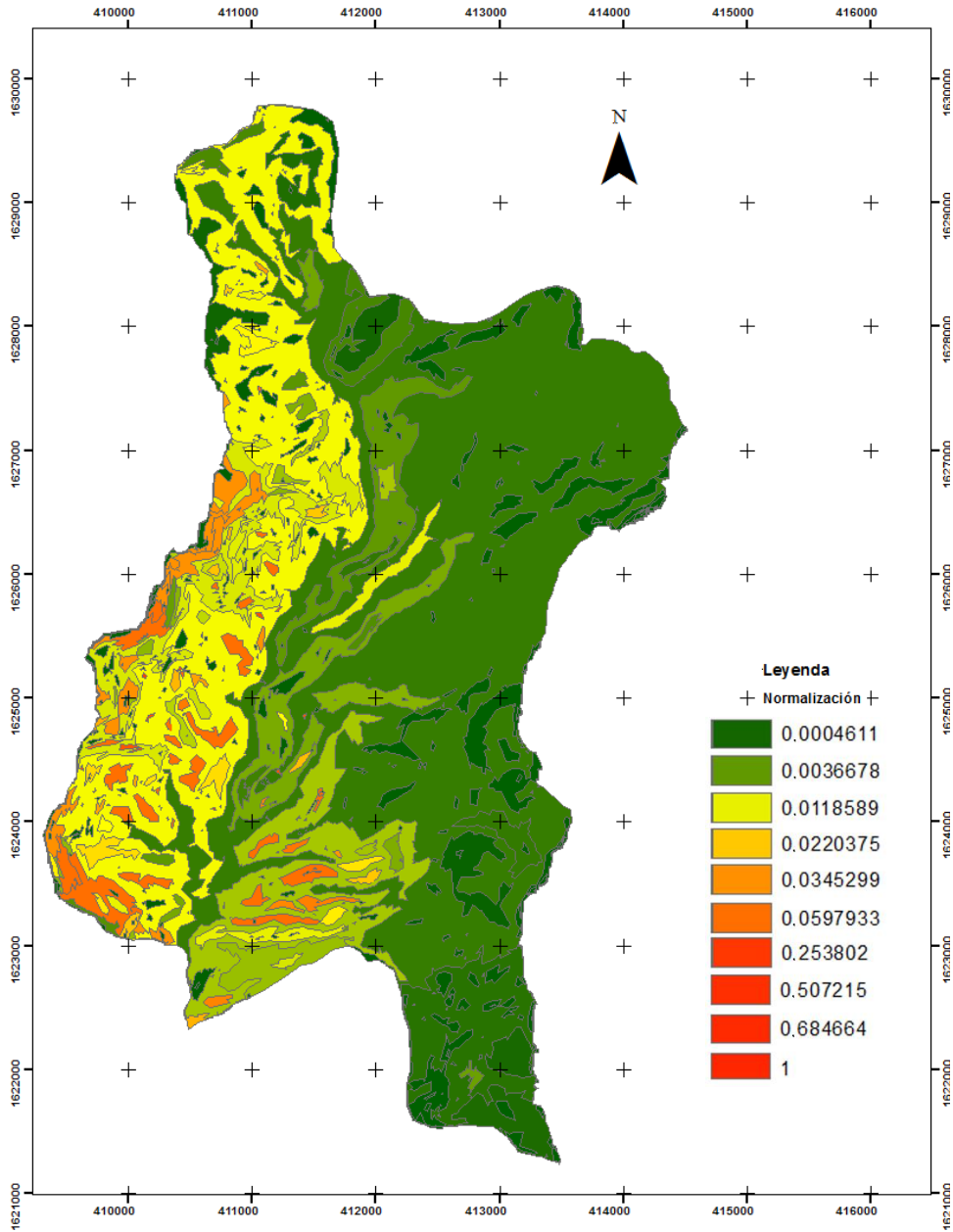
Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis versión 10.3.

Figura 111. Capa de orientaciones



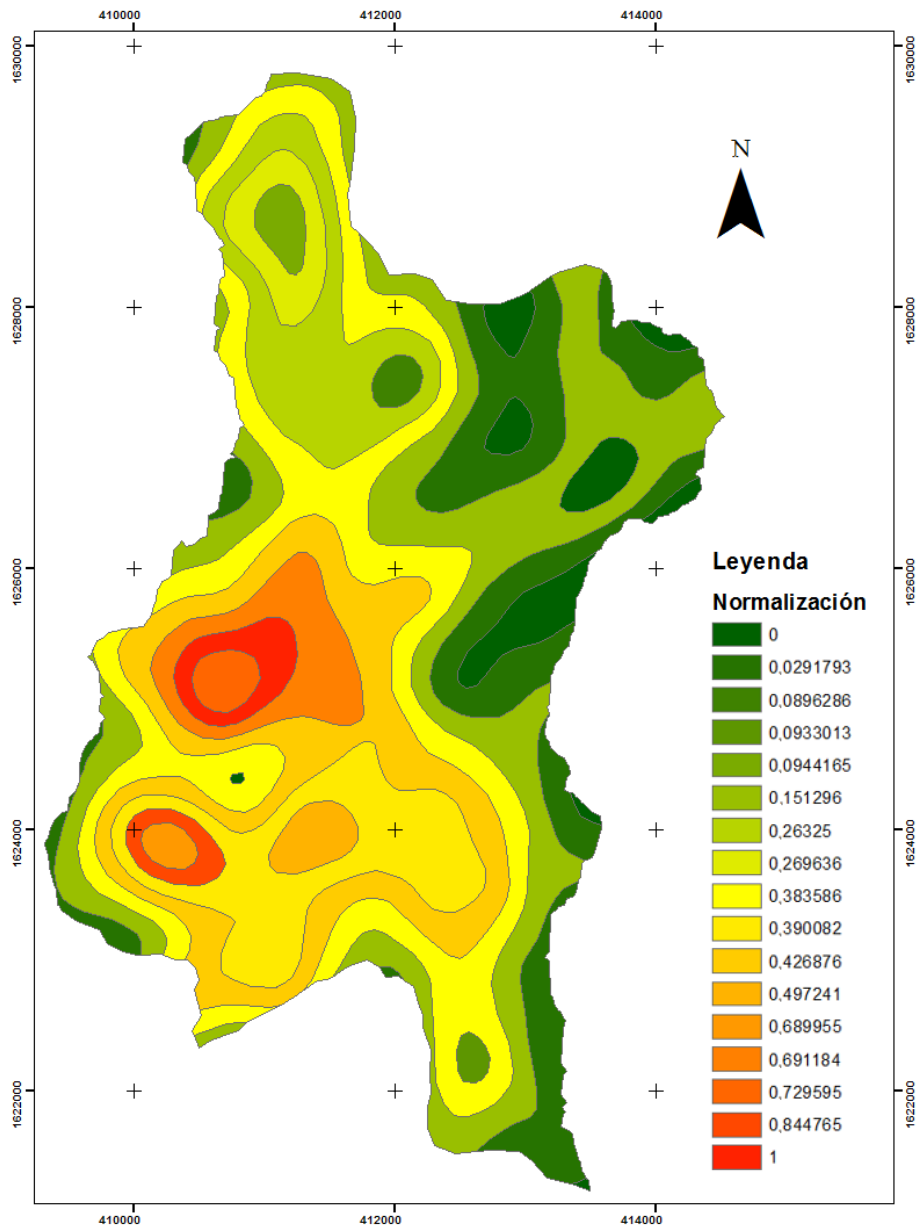
Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis versión 10.3.

Figura 112. Capa de pendientes



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis versión 10.3.

Figura 113. Capa de estructural



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis versión 10.3.

5.6. Mapa de susceptibilidad

Se suman las capas obtenidas, utilizando una serie de hipótesis centradas en los diferentes pesos de cada uno de los factores condicionantes. Se trabajó con 5 hipótesis diferentes.

Se realizó la sumatoria de capas para cada una de las cinco hipótesis, se eligió la hipótesis que desplegaba el índice de susceptibilidad (I) más alto.

Tabla XXXIII. **Peso de cada hipótesis para cada factor**

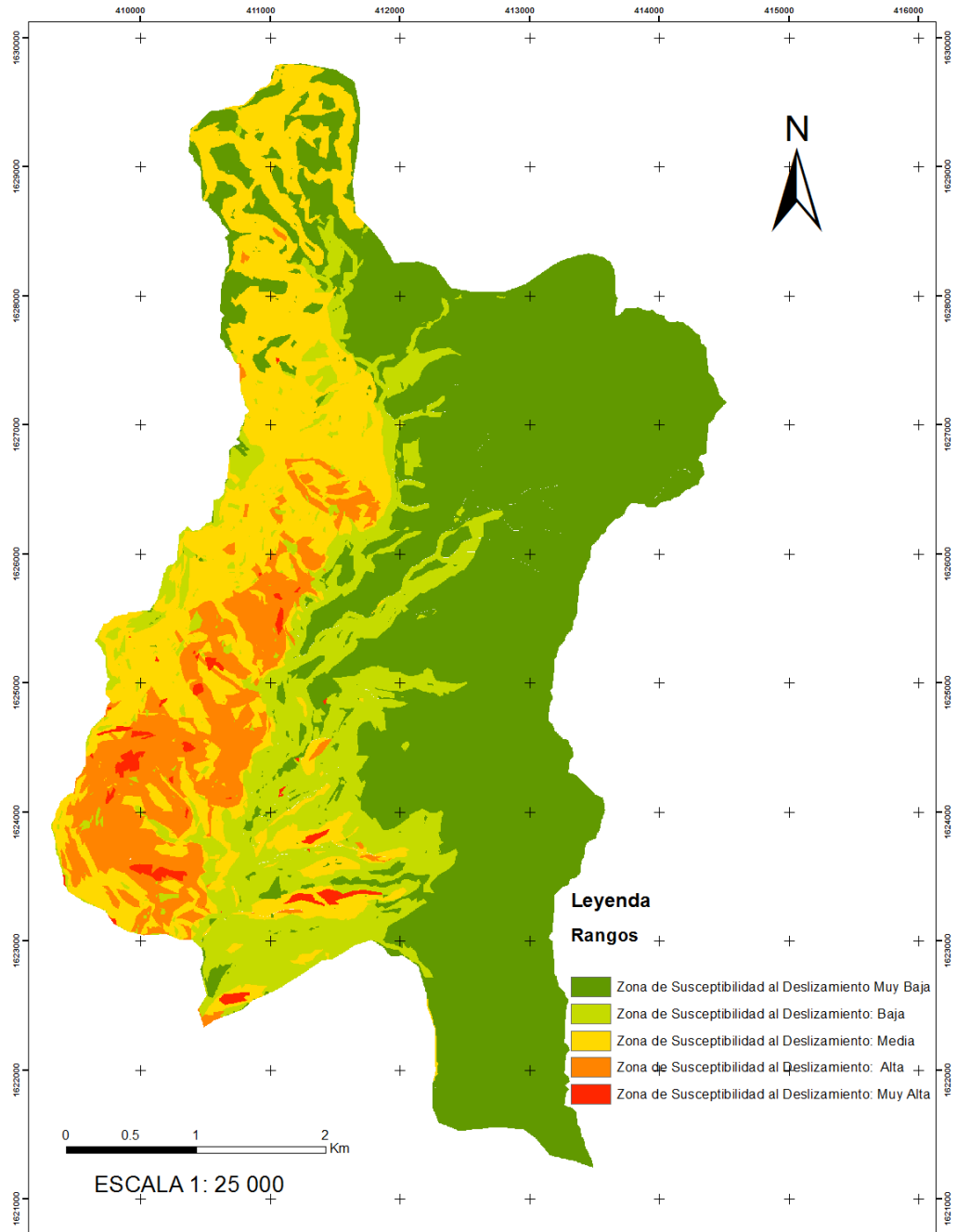
% FACT. CONDICIONATE	HIPÓTESIS				
	A	B	C	D	E
LITOLÓGIA	15	15	10	10	10
GEOMORFOLOGÍA	15	10	10	5	6
USOS DEL SUELO	5	5	2	2	3
PENDIENTES	50	60	70	75	74
ORIENTACIONES	10	5	3	3	3
ESTRUCTURAL	5	5	5	5	4

Fuente: elaboración propia.

La hipótesis D es la que más se ajustó a la realidad, ya que, para las categorías de susceptibilidad alta y muy alta, es en la que se evidenció el mayor número de deslizamientos.

Con esto, se procedió a procesar los datos para obtener el mapa de susceptibilidad que más se ajusta a la realidad.

Figura 114. Mapa de susceptibilidad a movimientos de ladera

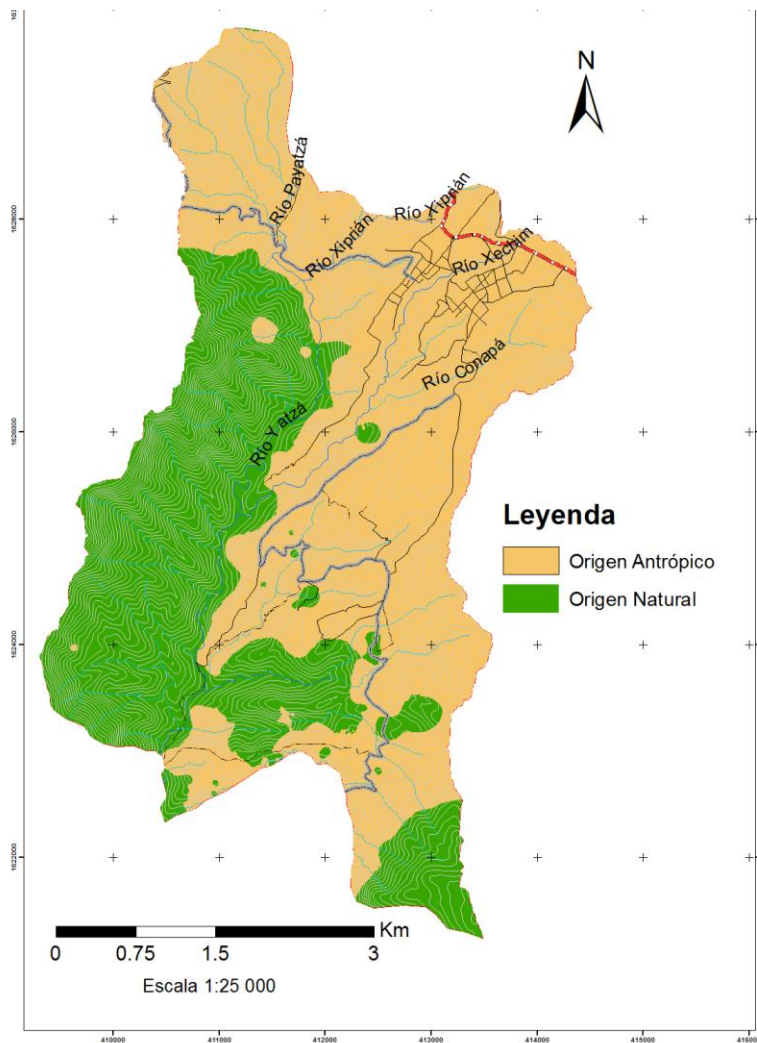


Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis versión 10.3.

5.7. Interpolación de movimientos de ladera

Los movimientos de ladera inventariados fueron clasificados en: antrópicos y naturales. Al tener estos datos, se realizó una interpolación de datos que permitiera conocer las áreas de influencia que tenían estos movimientos.

Figura 115. Interpolación de movimientos de ladera según su origen



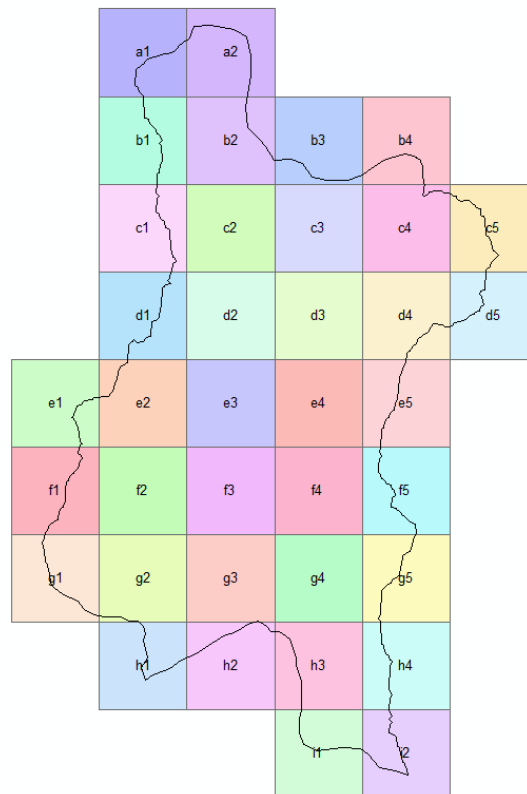
Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis versión 10.3.

Los deslizamientos de origen antrópico están relacionados con carreteras, caminos y veredas que realizan sin ningún estudio geotécnico ni la consultoría de un ingeniero civil.

5.8. Análisis de orientación entre deslizamientos y lineamientos

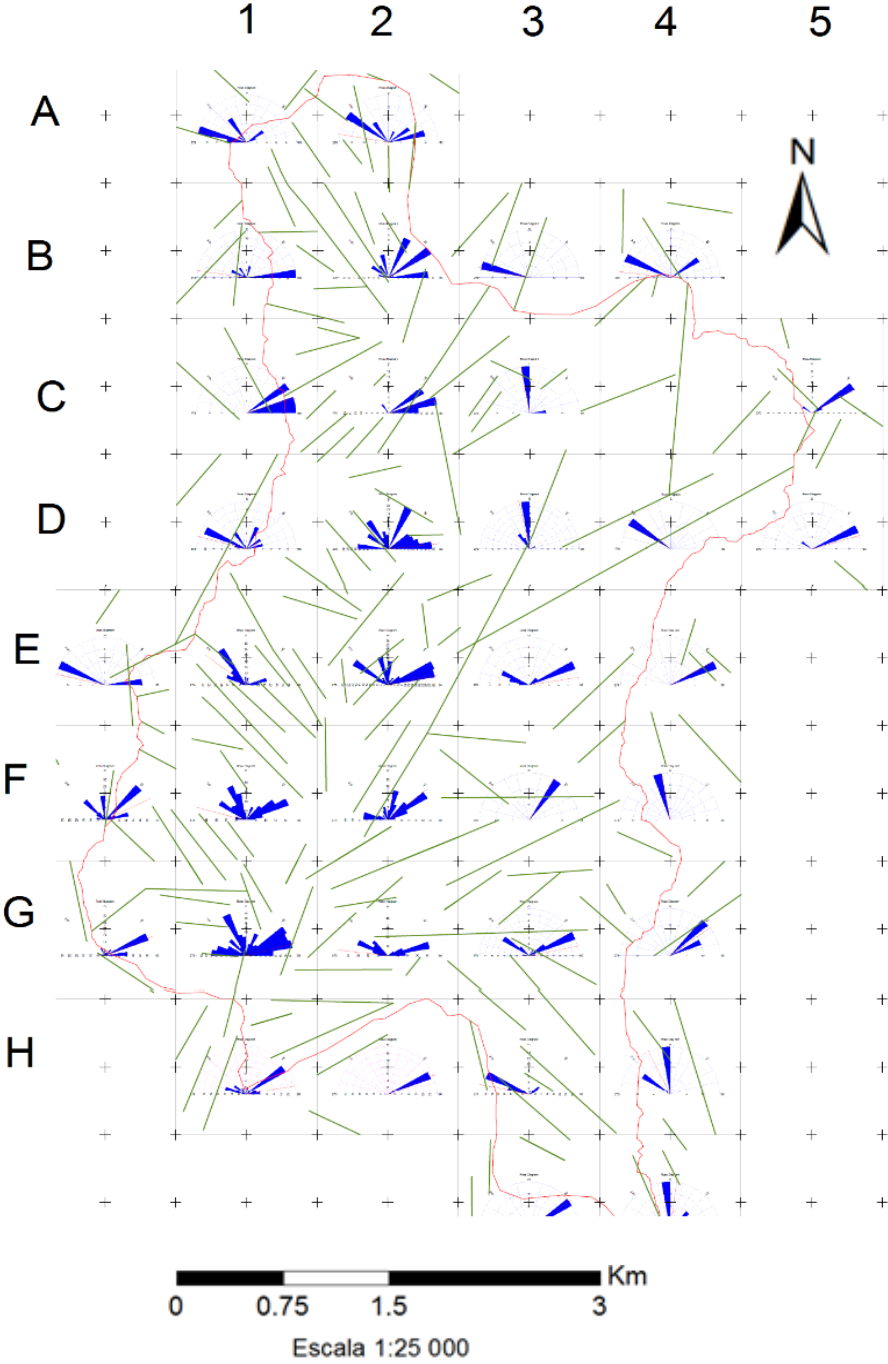
Se llevó a cabo un exhaustivo trabajo de fotointerpretación para la identificación de los lineamientos presentes en el polígono de estudio. Fueron digitalizados, medidos y cuantificados por kilómetro cuadrado a manera de obtener un mapa de lineamientos por kilómetro cuadrado.

Figura 116. Análisis de lineamientos por kilómetro cuadrado



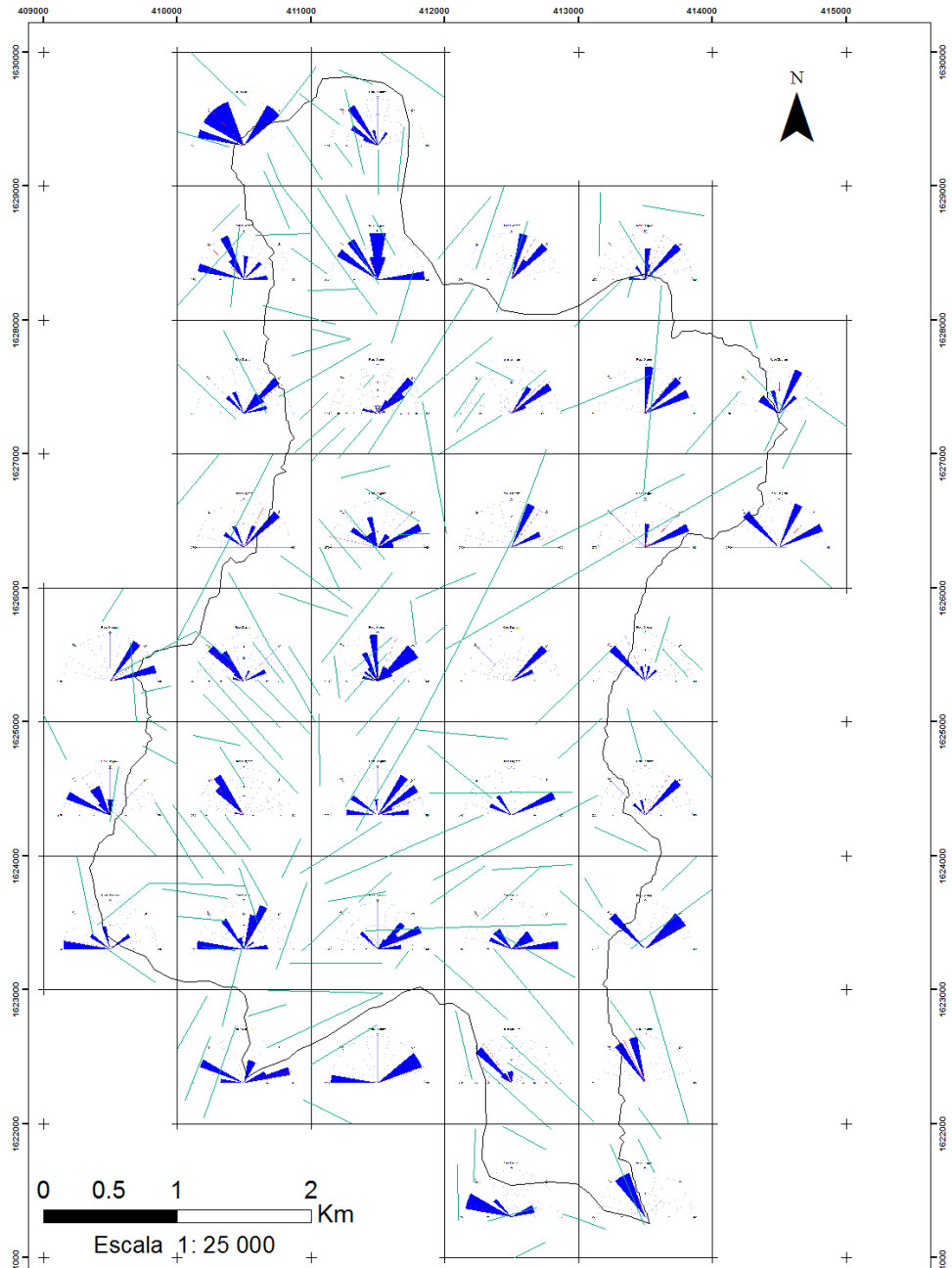
Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis versión 10.3.

Figura 117. Orientación media de 1 810 deslizamientos inventariados



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis versión 10.3.

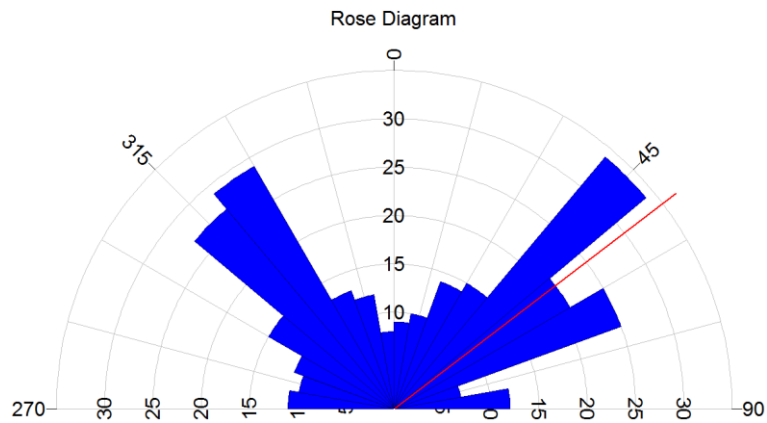
Figura 118. Lineamientos por kilómetro cuadrado



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis versión 10.3.

Se procesó cada una de las rosetas individualmente para presentar una roseta general indicando las orientaciones preferenciales de todos los lineamientos presentes en el polígono de estudio.

Figura 119. **Dos familias preferenciales de lineamientos**



Fuente: elaboración propia, empleando DIPS.

CONCLUSIONES

1. Un mapa de susceptibilidad a movimientos de ladera, servirá de base para guiar un plan de ordenamiento territorial en los municipios que contienen la microcuenca Yatzá. Es conveniente que se siga un crecimiento urbano estructurado sin extenderse al oeste del polígono de estudio.
2. Se realizó la evaluación de la susceptibilidad por movimientos de ladera en la microcuenca Yatzá, determinando 5 grados de susceptibilidad. El grado de susceptibilidad media – alta se asocia a zonas relacionadas con la zona de cizalla (cerro Tzantem, Xiquichoy y Sak'abaj). Adicional a eso, se comprueba la hipótesis, donde los antiguos eventos laháricos del polígono de estudio, actualmente, tienden a colapso; el material sigue desprendiéndose, propiciando gran cantidad de movimientos de ladera.
3. Los sectores catalogados con grado de susceptibilidad baja, son áreas relativamente planas, abarcan los principales cascos urbanos y actividad antrópica. Se tuvo un total de 480 movimientos de ladera para una pendiente de entre 0 y 15 grados. Esto se debe a que las partes más llanas del polígono conforman más del 70 % del área del mismo. En esta área debe centrarse el ordenamiento territorial.
4. Los movimientos de ladera encontrados en el polígono de estudio, revelan la mayor cantidad de ocurrencia en la unidad geomorfológica: laderas de incisión fluvial con un conteo de 922; esta unidad se concentra en los cerros Tzamatzán, Xiquichoy y Sak'abaj. Seguido por laderas de incisión fluvial reciente con 300 movimientos contabilizados y estas están ubicadas

en jurisdicción de San Juan la Laguna y Santa Clara la Laguna. Están asociadas a materiales no consolidados que propician la inestabilidad del terreno.

5. Al contrastar la orientación que tenían los deslizamientos y la orientación de los lineamientos, se puede notar como el 86 % de los movimientos de masa que han tenido lugar en el polígono de estudio fueron influenciados por estos. Es evidente el control estructural que ejercen dichos lineamientos y también que es una zona de gran actividad sísmica.

RECOMENDACIONES

1. Divulgar los resultados del mapa de susceptibilidad generado para que en el futuro también las municipalidades consideren la opinión de un profesional, antes de realizar cualquier inversión de infraestructura relacionada a edificación, vías de comunicación, telecomunicaciones, energéticas, entre otras.
2. Delimitar las áreas de inestabilidad por municipio, para una posterior adopción de medidas remediales y desarrollo de cartografía a detalle de susceptibilidad al alcance por movimientos de ladera; definir áreas que pueden ser afectadas por el alcance de movimientos de masa (aún si tienen baja susceptibilidad).
3. Los pobladores que desarrollan sus actividades agrícolas en las cercanías del río Yatzá, deben ser educadas con un plan de mitigación para que pueda aplicarse en la reducción de riesgos ante desastres naturales.
4. En las zonas de susceptibilidad media-alta podrían desencadenarse flujos de lodo, cuando se encuentran asociados a nacimientos de agua; por lo que se recomienda desarrollar un plan de ordenamiento territorial y se planifique no asentar poblados en estas áreas en un futuro.
5. Desarrollar programas de reforestación con las especies adecuadas a la zona.

6. Al momento que se generen movimientos de ladera, elaborar una base de datos con información sobre la zona de ruptura, zona de acumulación, litología, dimensiones e información de testigos. Identificar y clasificar el tipo de comportamiento que tuvo un movimiento de ladera, esto ayudaría a conocer más sobre el mecanismo de rotura y así seleccionar medidas de contención adecuadas. Considerar el uso de drones si la condición climática y del terreno pudieran afectar la integridad de vidas humanas.
7. Realizar un estudio completo de suelos en las cercanías del poblado de Montecristo y Patún, para tener un panorama más amplio del comportamiento y características del material del que se componen las laderas.
8. Realizar un análisis de susceptibilidad cada 2 años, para una adopción de medidas remediales en caso los factores condicionantes tuvieran una modificación; esto conllevaría a una variación en la susceptibilidad en la zona, por lo general aumentándola.

BIBLIOGRAFÍA

1. ANBALAGAN, Rathinam. *Landslide Hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain*. India: Elsevier Publishers, 1992. 277 p.
2. BUCKNAM, Robert et al. *Deslizamientos de tierra Inducidos por el Huracán Mitch en Guatemala*. Estados Unidos: USGS, 2001. 55 p.
3. COROMINIAS, Juan. *Criterios para la confección de mapas de peligrosidad de movimientos de ladera*. España: CTPS, 1988. 22 p.
4. GARCÍA YAGÜE, Juan. *Clasificación tipológica de los movimientos de ladera. Simposio sobre Taludes y Laderas Inestables*. España: Andorra la Vella, 1997. 79 p.
5. GUTIERREZ ELORZA, Mateo. *Geomorfología*. España: Pearson Educación, 2008. 542 p.
6. HILEY, George et al. *Dynamics of Slow-Moving Landslides from Permanent Scatterer Analysis*. Estados Unidos: American Association for the Advancement of Science AAAS, 2011. p.72.
7. IRIGARAY, Clemente et al. *Methodology for the analysis of landslide determinant factors by means of a G.I.S Application to the Colmenar area (Málaga, Spain)*. España: Universidad de Granada, 2005. 112 p.

8. JIMÉNEZ PERÁLVAREZ, Juan. *Análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante un SIG en la cuenca vertiente al embalse de Rules*. España: Universidad de Granada, 2005. 119 p.
9. MEDINA, Byron. *Deslizamientos e Impactos Ambientales de los Huracanes Mitch y Stan en Guatemala*. Guatemala: Fundación Defensores de la Naturaleza, 2007. 49 p.
10. NEWHALL, Christopher. *Geology of the Lake Atitlán Region. Western Guatemala*. Holanda: Elsevier Publishers, 1987. 52 p.
11. NUÑEZ ÁLVAREZ, Laura. *Informe Complementario de la Cartografía Geológica y Geomorfológica de la Cuenca del Lago Atitlán*. Guatemala: Geólogos del Mundo y Asociación Vivamos Mejor, 2012. 51 p.
12. SENDRA LÓPEZ, Gemma. *Estudio Hidrogeológico preliminar de la parte alta de la microcuenca de Tzozomá*. Guatemala: Asociación Vivamos Mejor, 2012. 92 p.
13. USGS. *Volcano Hazards Program*. [en línea]. <http://volcanoes.usgs.gov/Hazards/What/Lahars/Santiaguito_89>. [Consulta: 15 de marzo de 2016]

APÉNDICES

Apéndice 1. Ficha técnica

HOJA DE EVALUACIÓN DE DESLIZAMIENTOS DE TIERRA



Fecha: _____ Hora: _____ Waypoint _____

DATOS DEL DESLIZAMIENTO

1. FECHA DE OCURRENCIA Y UBICACIÓN

Fecha en que ocurrió el deslizamiento _____ Sistema de Coordenadas: GTM

Municipio, Caserío/Barrio _____

2. CONDICIONES TOPOGRÁFICAS Y GEOMÉTRICAS

Altura de la Corona (msnm) _____ Base del Talud (T) _____ msnm

Grietas: si () no () ¿dónde? _____

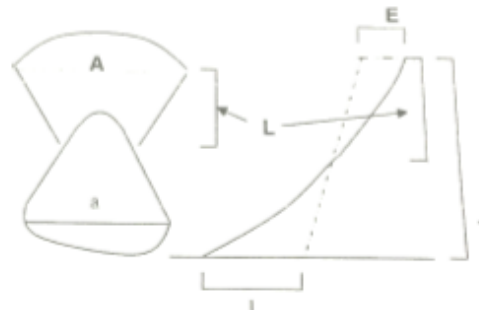
Abertura _____ Longitud _____ Profundidad _____

Medidas de la superficie de ruptura:

Ancho (A) _____ (m)

Largo (L) _____ (m)

Espesor (E) _____ (m)



3. MATERIAL DESLIZADO

Suelo ()

Rocas ()

Relleno ()

Basura y ripio ()

Árboles ()

Otros _____

4. FACTORES GENERADORES

Acumulación de sobrecargas () Cortes de caminos y/o construcción ()

Lluvias () Sismos ()

Escorrentía Superficial ()

Otros _____

Continuación apéndice 1.

5. EVALUACIÓN DE DAÑOS

Carreteras/caminos	()	Viviendas	()
Acueductos	()	Tendido eléctrico	()
Personas heridas	()	Fallecidos	()
Cultivos	()	Otros	()

Factor	Unidad	Desc
Geomorfología	Abarrancamiento	
	Barra	
	Cerro	
	Coladas de lava	
	Cono Volcánico	
	Cresta Redondeada	
	Glacis	
	Ladera de Incisión Fluvial	
	Piedemonte	
	Superficie de apilamiento de pómez	
	Superficie de cumbre	
	Superficie de erosión lacustre	
	Terraza	
Otro:		

Factor	Unidad	Desc
Uso del Suelo	Cultivos Arbóreos	
	Áreas turísticas, arqueológicas, cementerios	
	Bosque de coníferas	
	Bosque latifoliado	
	Bosque Mixto	
	Café	
	Cultivos anuales	
	Vegetación escasa	
	Hortalizas, brócoli, frijol, flores, zanahoria, repollo, arveja, papa, cebolla	
	Maíz	
	Mosaico de cultivos	
	Pastos	
	Vegetación baja (matorral)	
Otro:		

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Inventario de nacimientos de agua

No	Waypoint	Coordenadas GTM		Nombre y Observaciones
1	94	411174	1629410	No tiene; vereda abajo del cerro Tzantem.
2	96	411422	1629345	No tiene; vereda abajo del cerro Tzantem. Flujo entre un suelo café con micas doradas.
3	116	412221	1626380	Sector San Vicente, aldea Montecristo, municipio de Santa María Visitación; perenne.
4	195	411655	1627396	No tiene; fluye hacia el río Yatzá en la vereda que lleva al "cerro de la cruz", Santa María Visitación.
5	246	411124	1625560	No tiene nombre; aflora entre las siembras, en las faldas del cerro Xiquichoy.
6	249	411106	1625470	No tiene nombre; alimenta al río Yatzá. Se usa en siembras y se ubica en las faldas del cerro Xiquichoy.
7	306	412424	1627652	No tiene nombre; perenne, está en propiedad privada a orilla de la carretera hacia el caserío Chuipoj.
8	327	410494	1624681	No tiene nombre; está en terrenos privados no circulados. Cerro Xiquichoy.
9	353	411812	1627145	Agua Tibia; drena a río Yatzá.
10	436	412819	1624934	Tanque de agua potable de San Juan la Laguna.

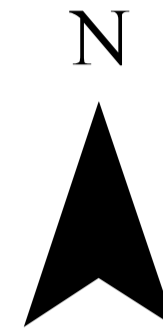
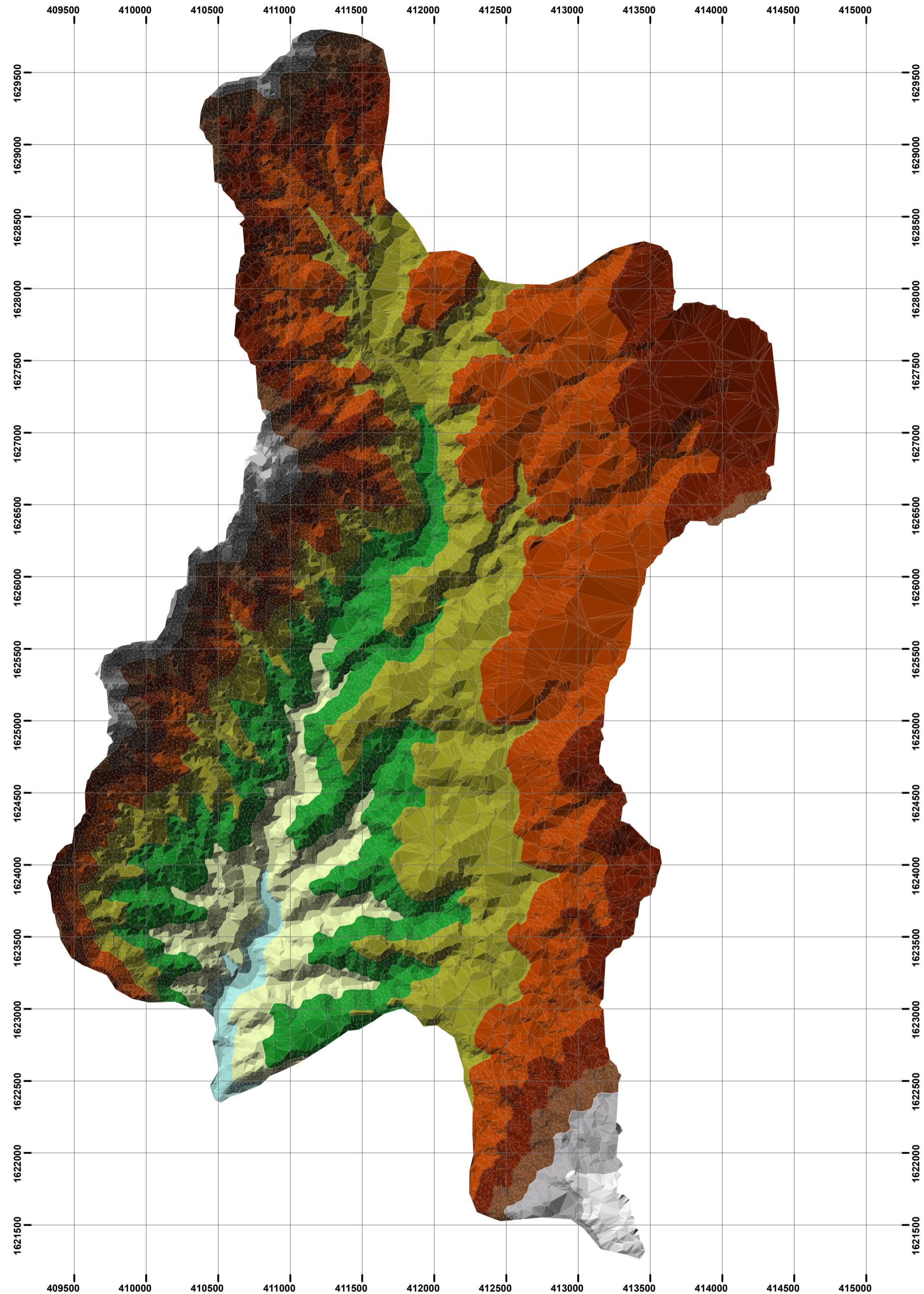
Fuente: elaboración propia.

Observaciones: todos los nacimientos están en jurisdicción del municipio de Santa María Visitación. En el caso del municipio de San Juan la Laguna, se tienen tanques de captación de concreto reforzado; el agua no recibe ningún tratamiento. Y en el caso del municipio de Santa Clara la Laguna, el agua que se distribuye en la red, es captada más al norte, fuera del polígono de estudio.

Apéndice 3. **Mapa de elevaciones**

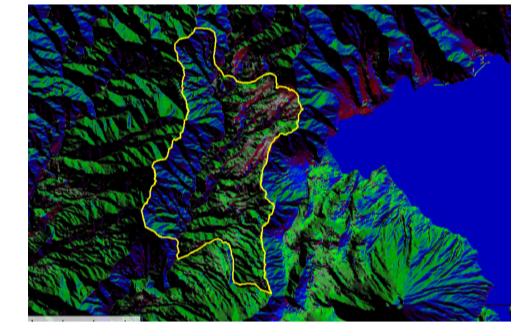
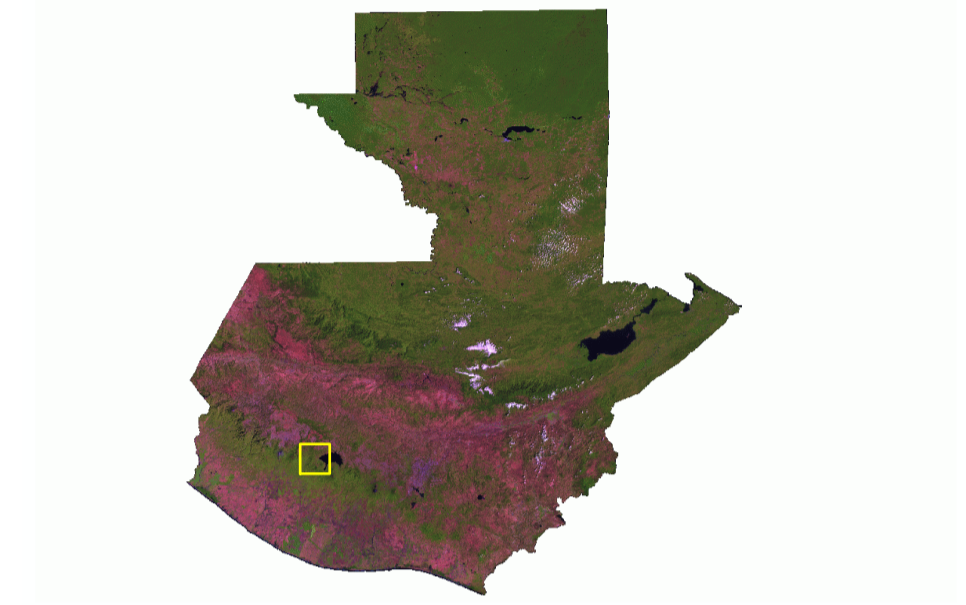
Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis versión 10.3.

Mapa de Elevaciones

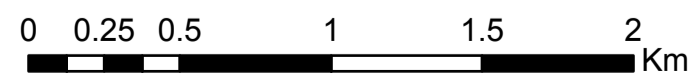


Leyenda
Elevación
(m.s.n.m)

	2348.89 - 2440
	2257.78 - 2348.89
	2166.67 - 2257.78
	2075.55 - 2166.67
	1984.44 - 2075.55
	1893.33 - 1984.44
	1802.22 - 1893.33
	1711.11 - 1802.22
	1620 - 1711.11



1860 I	1960 IV	1960 I
1860 II	1960 III	1960 II
1859 I	1959 IV	1959 I

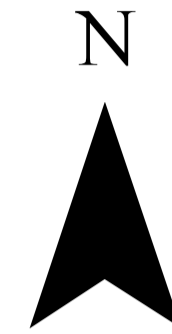


 UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE INGENIERÍA		
Análisis de susceptibilidad a movimientos de ladera en microcuenca Yatzá, departamento de Sololá.		
Contiene:	Mapa de Elevaciones	Escala Numérica: 1: 25 000
Trabajo realizado por:	Rocío Marisol Palacios Castellanos	
Proyección: Guatemala Transversal Mercator (GTM)	Referencia Espacial: WGS 1984 UTM ZONA 15N	Revisado por:

Apéndice 4. **Inventario de movimientos de ladera**

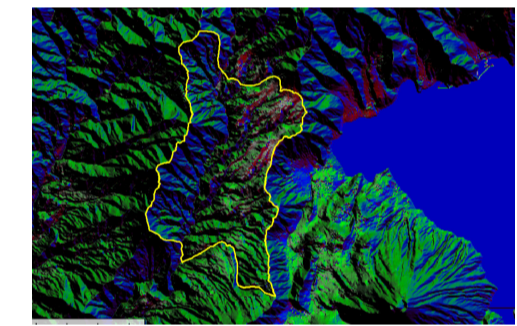
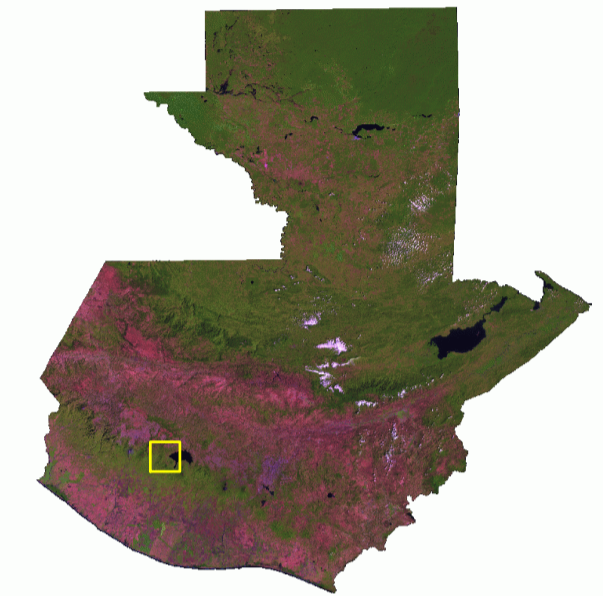
Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis versión 10.3.

Inventario de Movimientos de Ladera




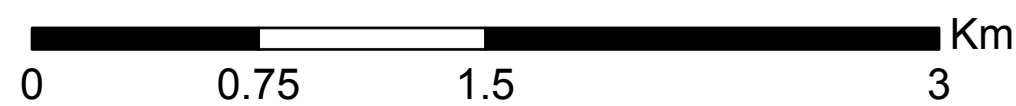
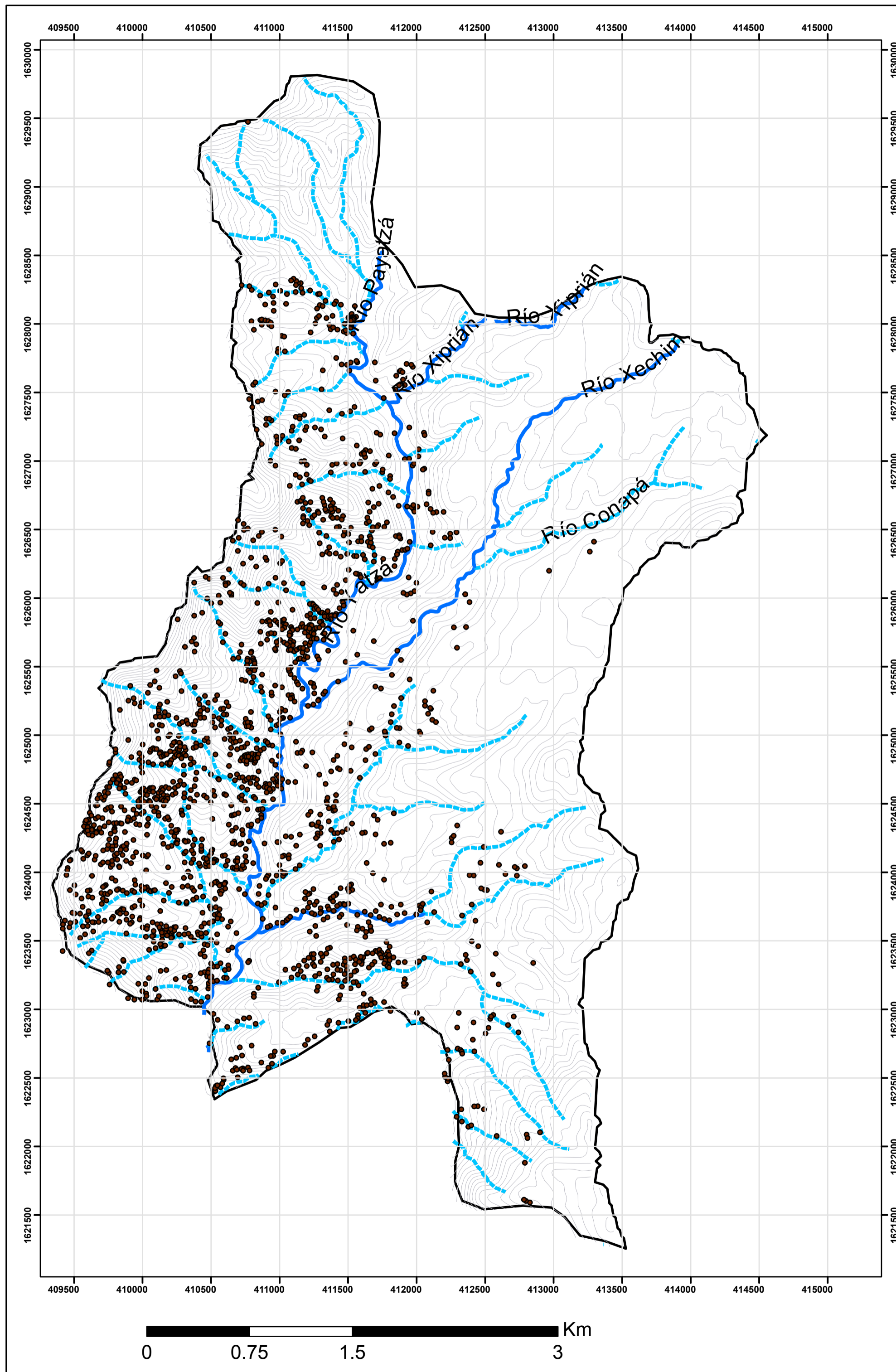
Simbología

- Deslizamientos
- Cauces Intermitentes
- Cauces Perennes
- Curvas de Nivel
- Polígono de Estudio



1860 I	1960 IV	1960 I
1860 II	1960 III	1960 II
1859 I	1959 IV	1959 I

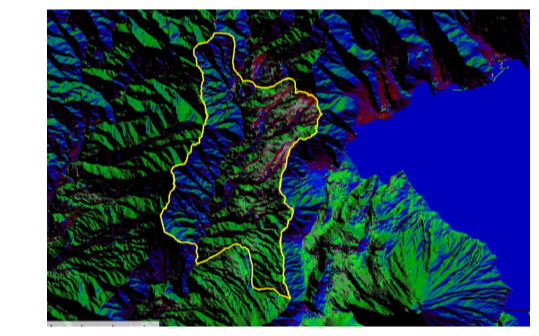
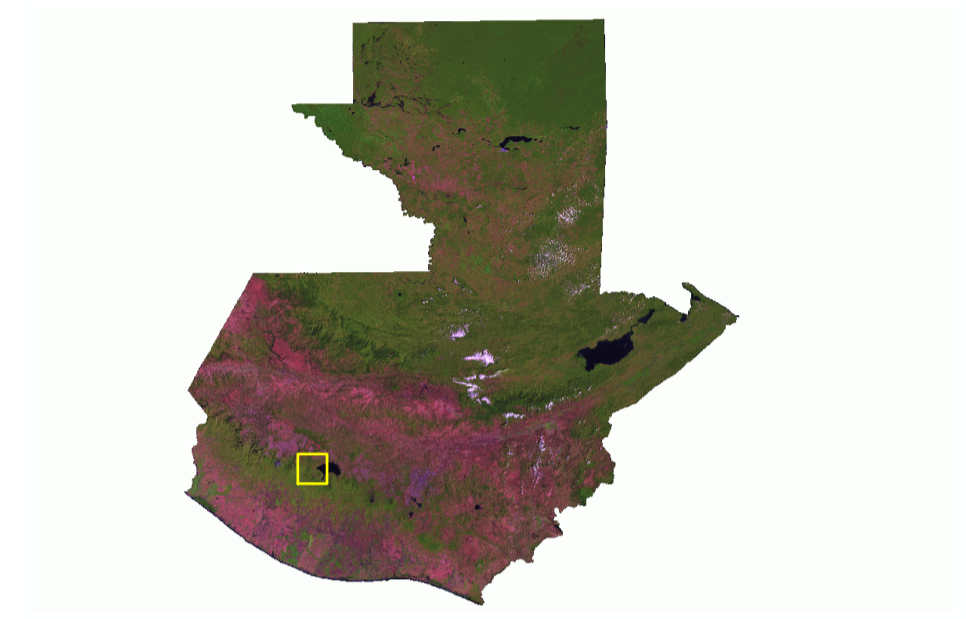
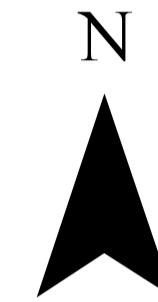
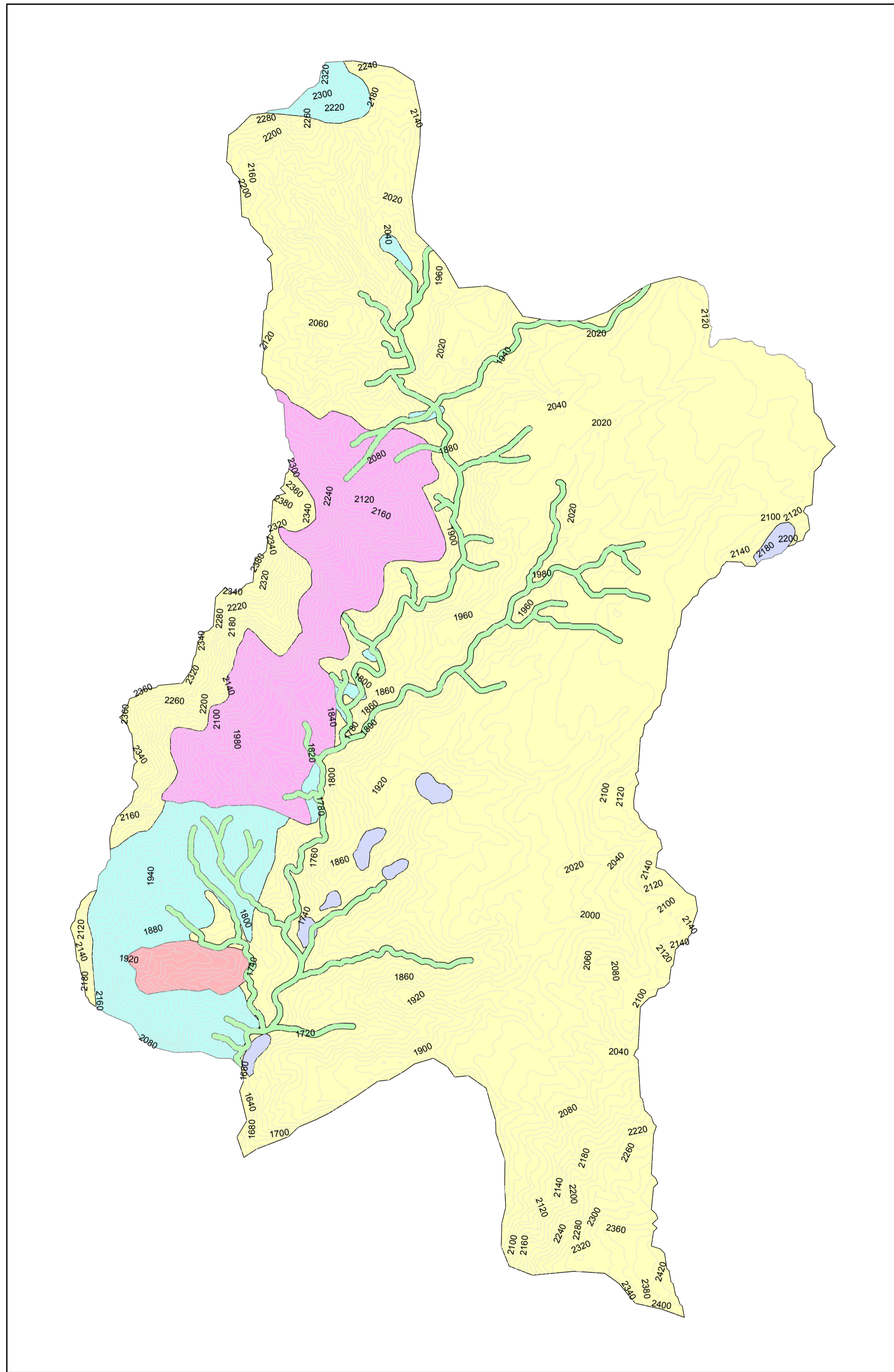
 UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE INGENIERÍA		
Análisis de susceptibilidad a movimientos de ladera en microcuenca Yatzá, departamento de Sololá.		
Contiene: Inventario de Movimientos de Ladera	Escala Numérica: 1: 25 000	
Trabajo realizado por: Rocío Marisol Palacios Castellanos		
Proyección: Guatemala Transversal Mercator (GTM)	Referencia Espacial: WGS 1984 UTM ZONA 15N	Revisado por:



Apéndice 5. **Capas de susceptibilidad**

Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis versión 10.3.

Mapa de Litología



Leyenda

- curvas de nivel
- Capa de Litología**
- Unidad**
- Unidad de Aluvión
- Unidad de Coluvión
- Unidad de Depósitos de caída
- Unidad de Lahar
- Unidad de Lahar andesítico
- Unidad de Rocas Graníticas

1860 I	1960 IV	1960 I
1860 II	1960 III	1960 II
1859 I	1959 IV	1959 I

 UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE INGENIERÍA		
Análisis de susceptibilidad a movimientos de ladera en microcuenca Yatzá, departamento de Sololá.		
Contiene:	Mapa de Litología	Escala Numérica: 1: 25 000
Trabajo realizado por: Rocío Marisol Palacios Castellanos		
Proyección: Guatemala Transversal Mercator (GTM)	Referencia Espacial: WGS 1984 UTM ZONA 15N	Revisado por:

Mapa Geomorfológico



Leyenda

Formas Asociadas a Procesos Endógenos

- Superficie de Apilamiento de Pómez (SAP)
- Superficie de Apilamiento de Pómez Degradado (SAPD)

Formas Asociadas a Procesos Exógenos

- Pie de Monte (Pm)

Formas Asociadas a Procesos de Denudación

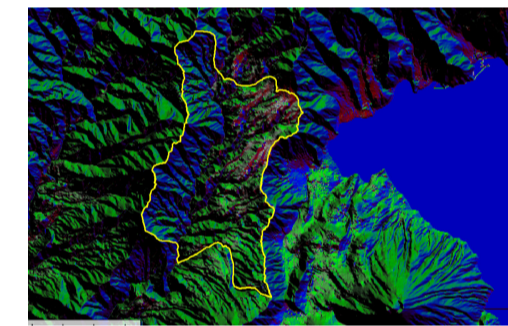
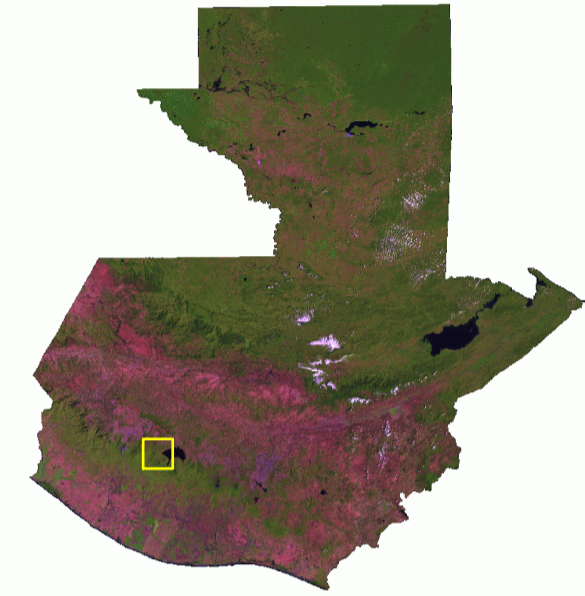
- Laderas de Incisión Fluvial (LIF)
- Laderas de Incisión Fluvial Reciente (LIFR)
- Superficie de Cumbre (SC)
- Cerro (Ce)

Formas Asociadas a Procesos Fluvio-Torrenciales

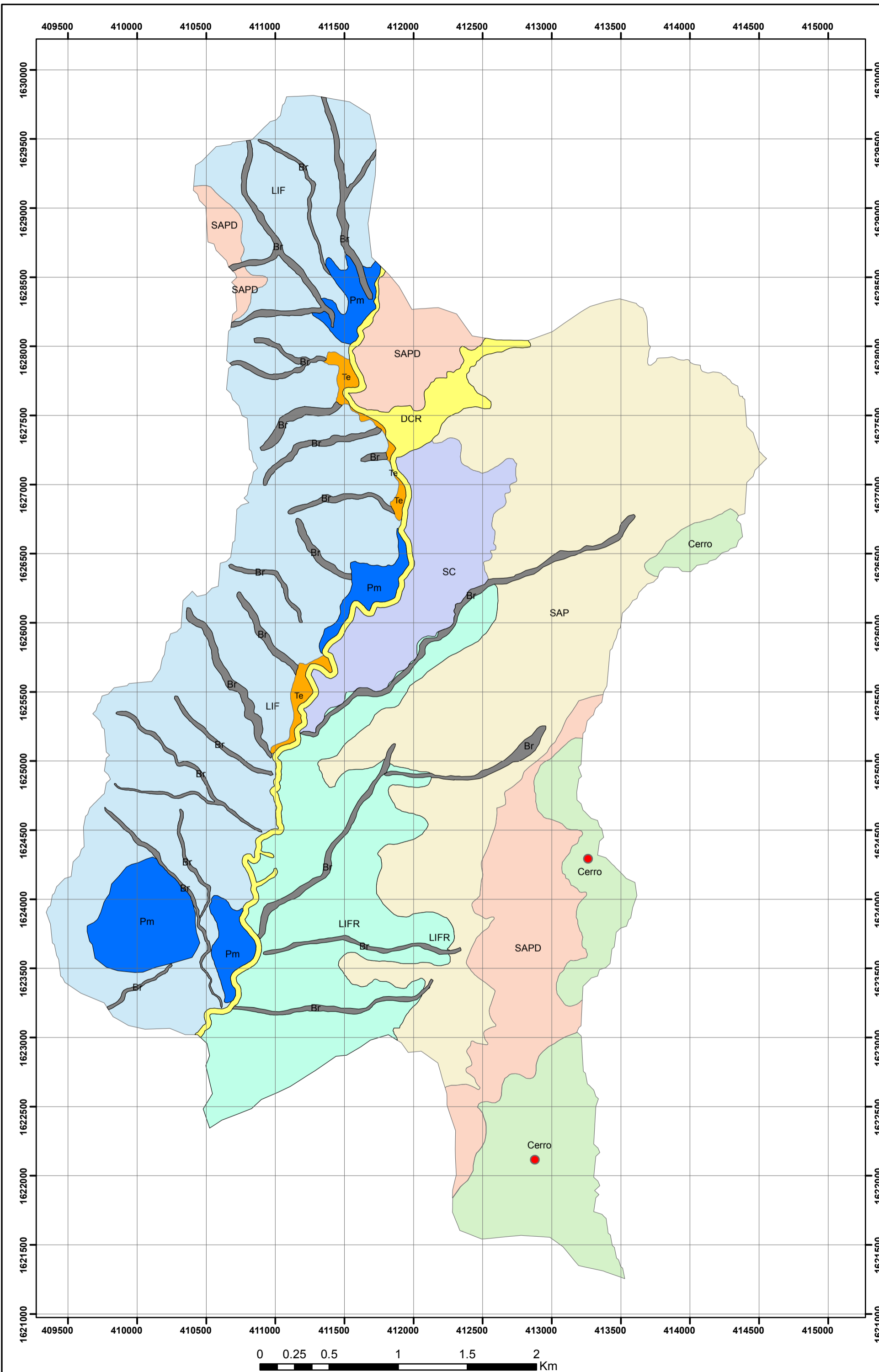
- Barrancos (Br)
- Terraza (Te)
- Depósitos de Canal Reciente (DCR)

Formas Asociadas a la Actividad Antrópica

- Cantera

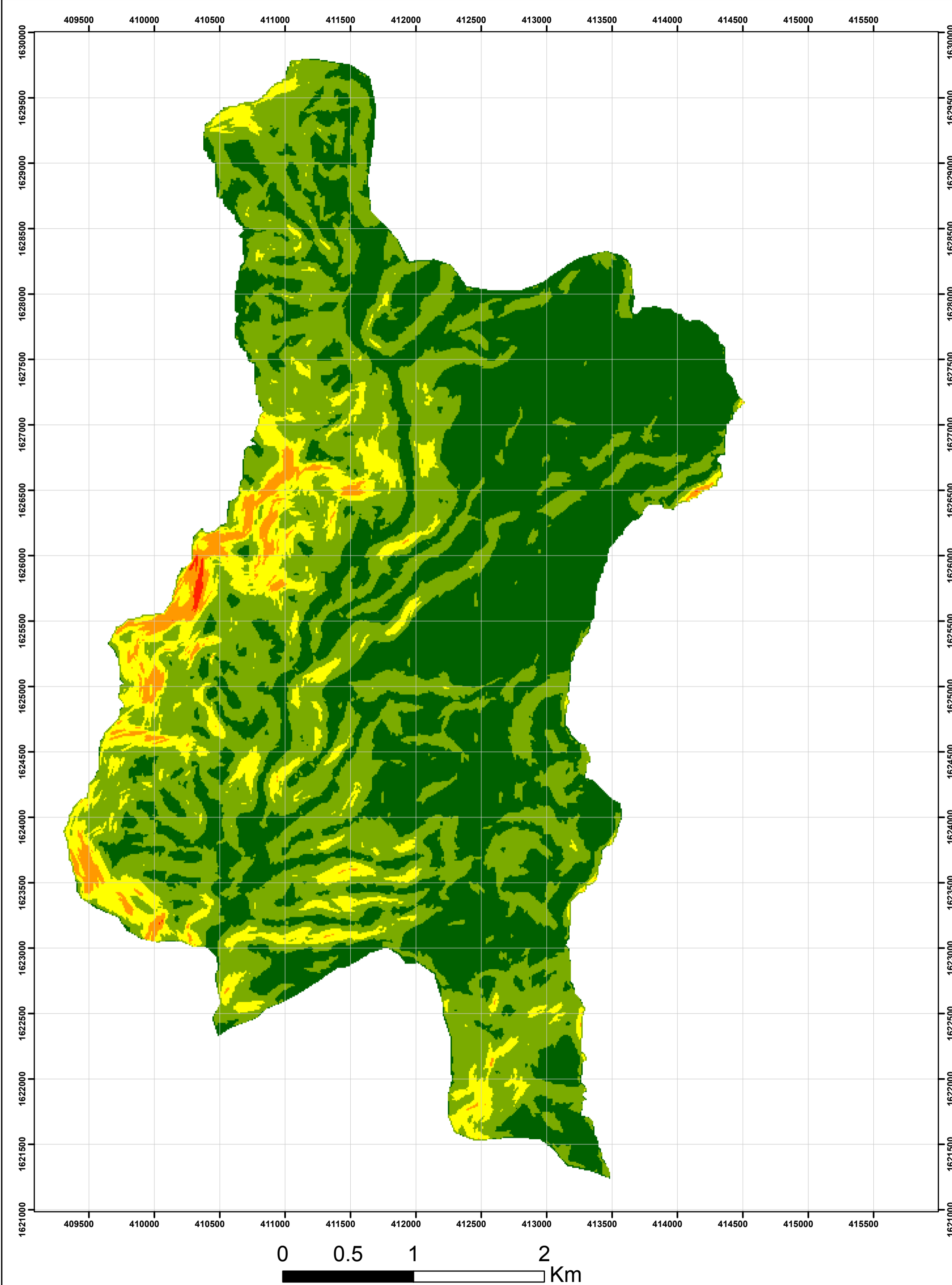


1860 I	1960 IV	1960 I
1860 II	1960 III	1960 II
1859 I	1959 IV	1959 I



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE INGENIERÍA		
Análisis de susceptibilidad a movimientos de ladera en microcuenca Yatzá, departamento de Sololá.		
Contiene:	Escala Numérica:	
Mapa de Geomorfología	1: 25 000	
Trabajo realizado por:		
Rocío Marisol Palacios Castellanos		
Proyección:	Referencia Espacial:	Revisado por:
Guatemala Transversal Mercator (GTM)	WGS 1984 UTM ZONA 15N	

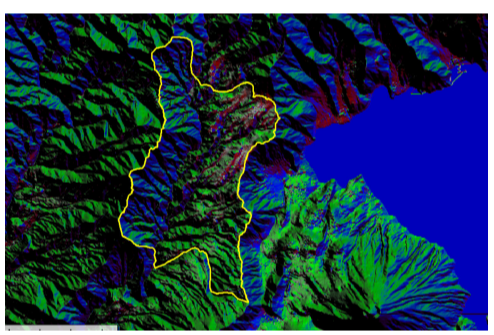
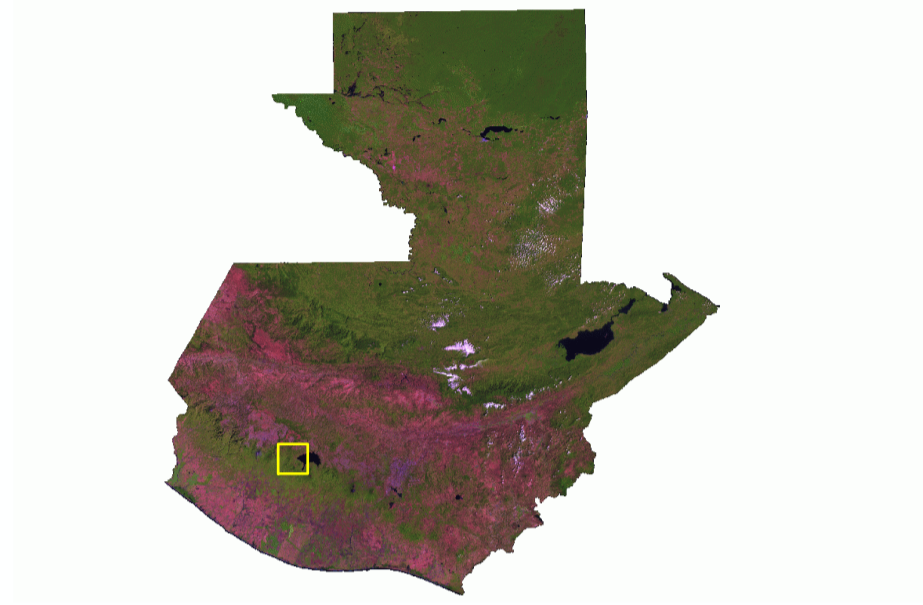
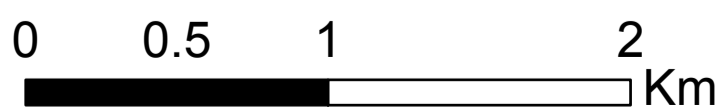
Mapa de Pendientes




Leyenda

Rangos (grados°)

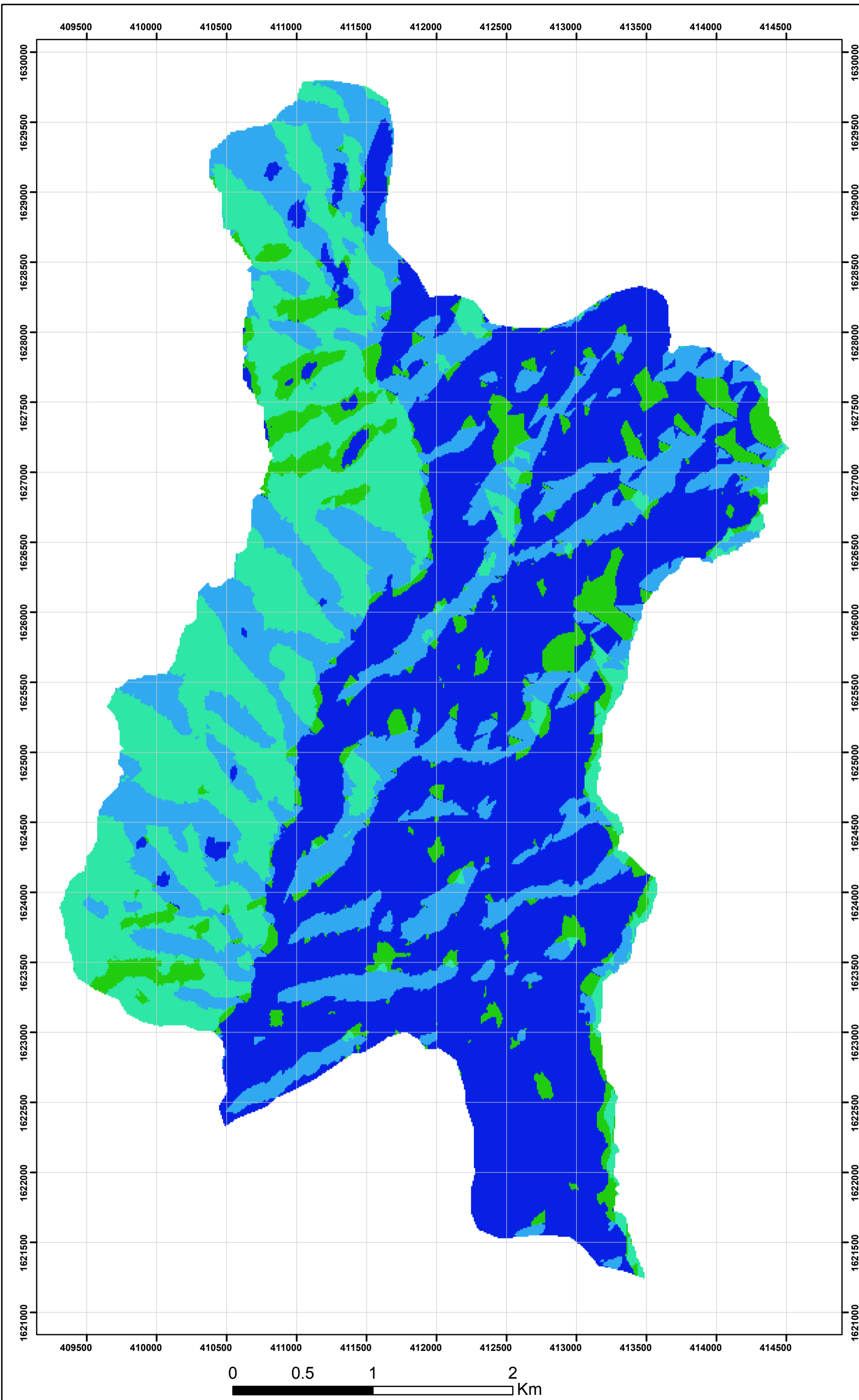
- 0 - 15
- 15 - 30
- 30-40
- 40-51
- >51



1860 I	1960 IV	1960 I
1860 II	1960 III	1960 II
1859 I	1959 IV	1959 I

 UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE INGENIERÍA		
Análisis de susceptibilidad a movimientos de ladera en microcuenca Yatzá, departamento de Sololá.		
Contiene:	Mapa de Pendientes	Escala Numérica: 1: 25 000
Trabajo realizado por: Rocío Marisol Palacios Castellanos		
Proyección: Guatemala Transversal Mercator (GTM)	Referencia Espacial: WGS 1984 UTM ZONA 15N	Revisado por:

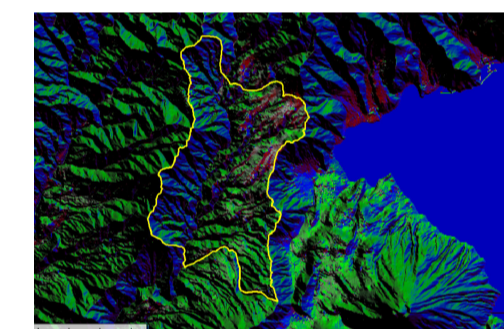
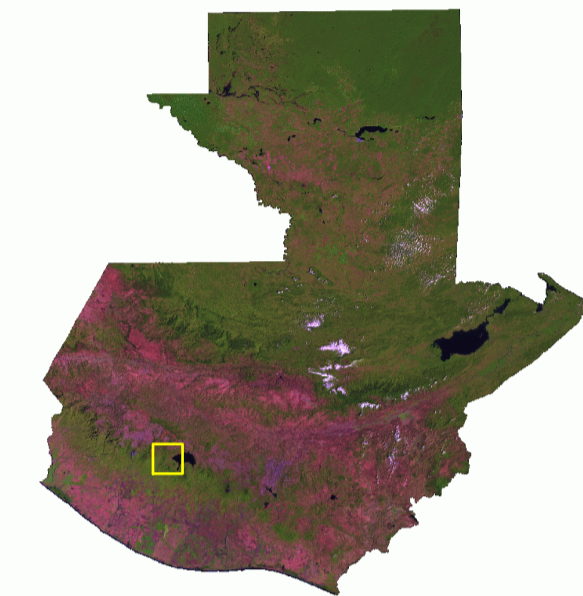
Mapa de Orientaciones




Leyenda

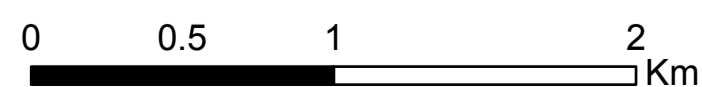
Rangos

- Norte(NO315-NE45)
- Este (NE45-SE135)
- Sur (SE135-SO220)
- Oeste (SO220-NO315)

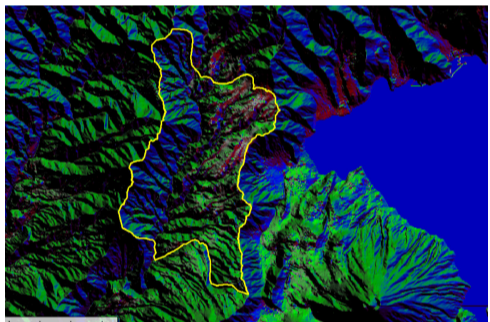
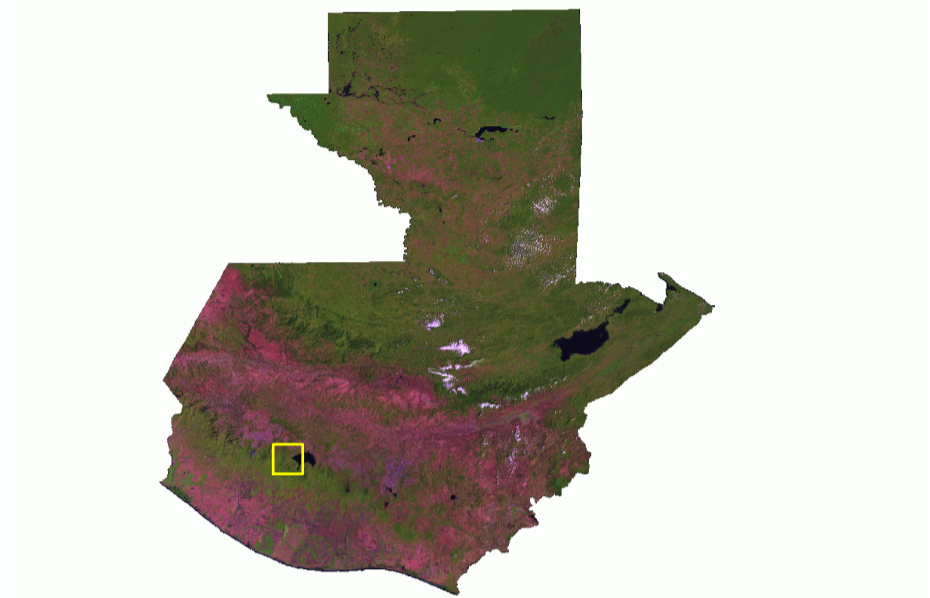


1960 I	1960 IV	1960 I
1960 II	1960 III	1960 II
1959 I	1959 IV	1959 I

 UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE INGENIERÍA		
Análisis de susceptibilidad a movimientos de ladera en microcuenca Yatzá, departamento de Sololá.		
Contiene: Mapa de Orientaciones	Escala Numérica: 1: 25 000	
Trabajo realizado por: Rocío Marisol Palacios Castellanos		
Proyección: Guatemala Transversal Mercator (GTM)	Referencia Espacial: WGS 1984 UTM ZONA 15N	Revisado por:



Mapa de Usos del Suelo

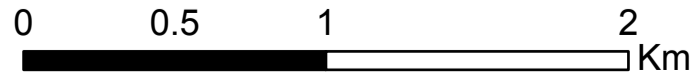
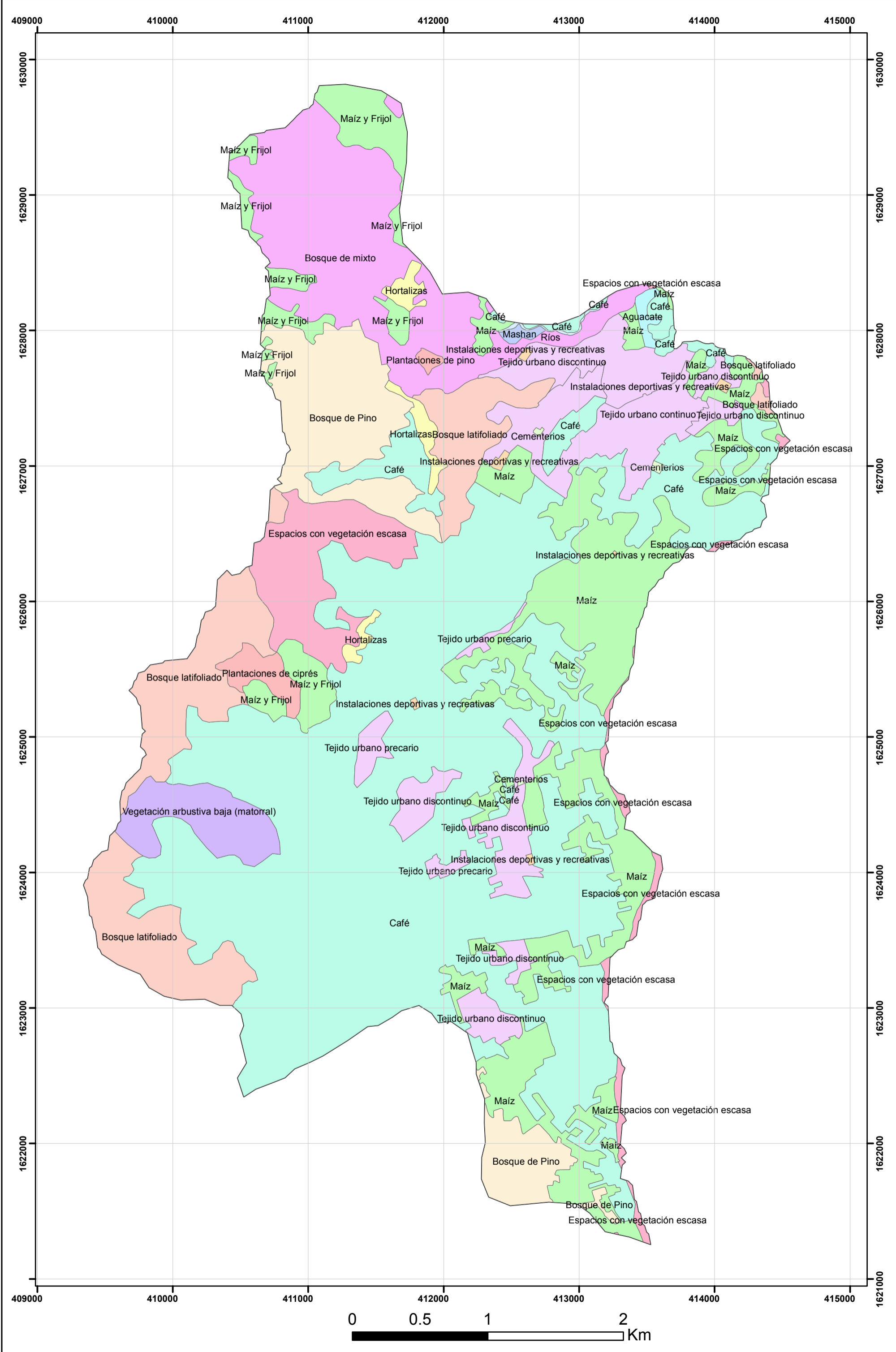


1960 I	1960 IV	1960 I
1960 II	1960 III	1960 II
1959 I	1959 IV	1959 I

Legenda

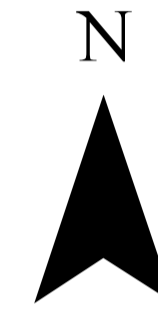
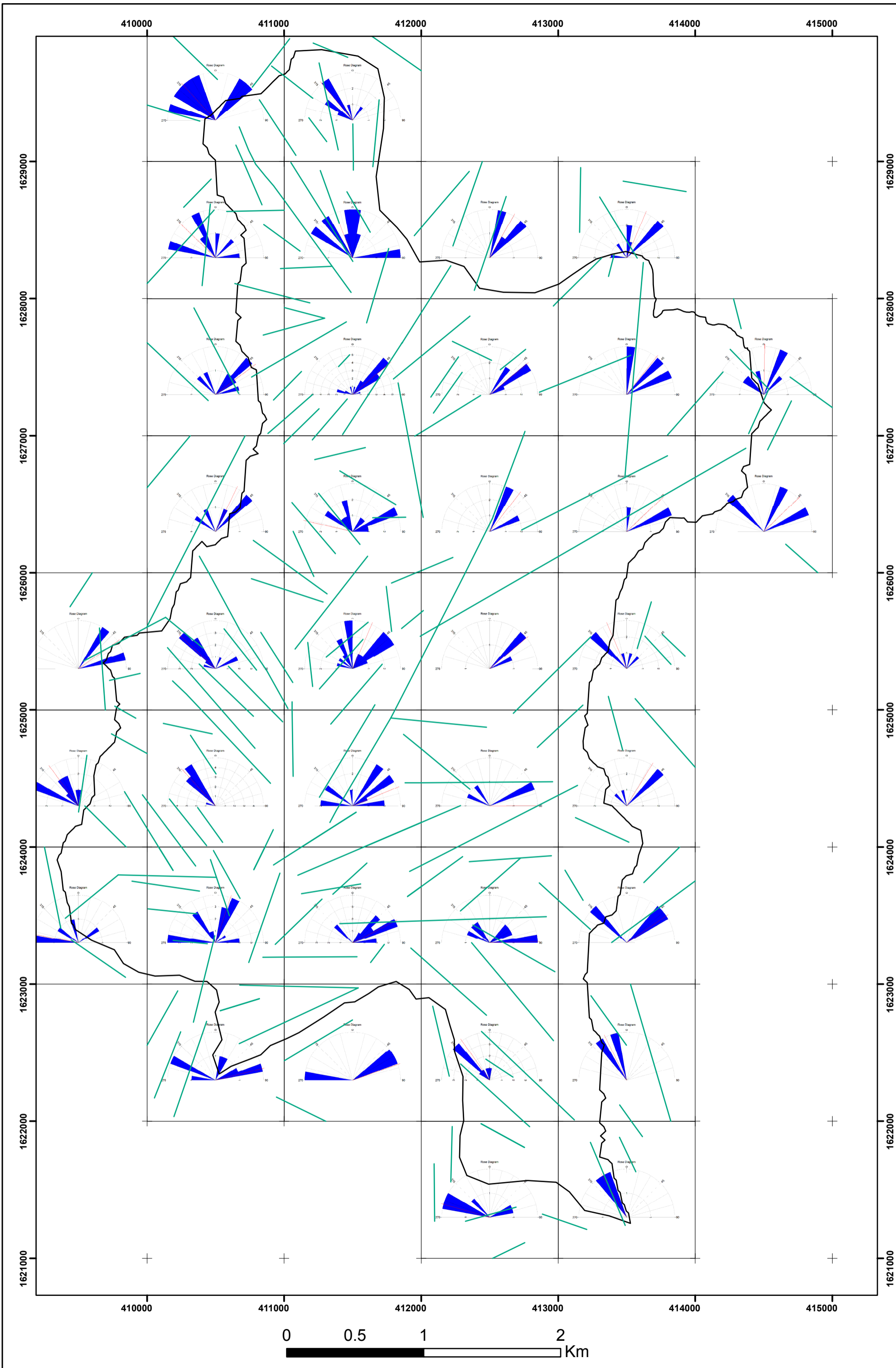
RANGOS

- Zonas Urbanizadas
- Zonas comerciales/redes de comunicación
- Zonas verdes artificiales, no agrícolas
- Granos básicos
- Hortalizas
- Cultivos permanentes herbáceos
- Café
- Cultivos permanentes arbóreos
- Bosque latifoliado
- Bosques de coníferas
- Bosque Mixto
- Plantaciones de bosque monoespecíficos
- Vegetación arbustiva baja (matorral)
- Espacios abiertos sin o con poca vegetación
- Aguas continentales



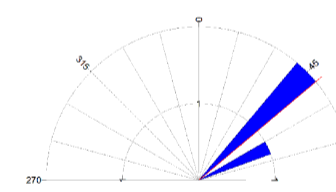
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE INGENIERÍA		
Análisis de susceptibilidad a movimientos de ladera en microcuenca Yatzá, departamento de Sololá.		
Contiene:	Mapa de Uso del Suelo	Escala Numérica: 1: 25 000
Trabajo realizado por: Rocío Marisol Palacios Castellanos		
Proyección: Guatemala Transversal Mercator (GTM)	Referencia Espacial: WGS 1984 UTM ZONA 15N	Revisado por:

Mapa de Lineamientos

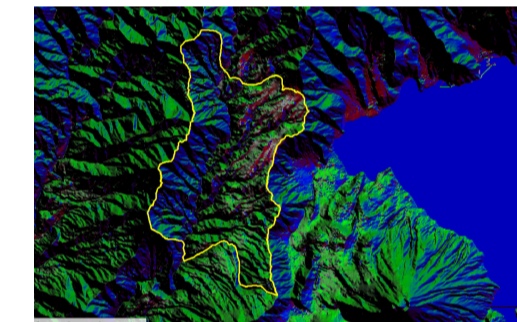
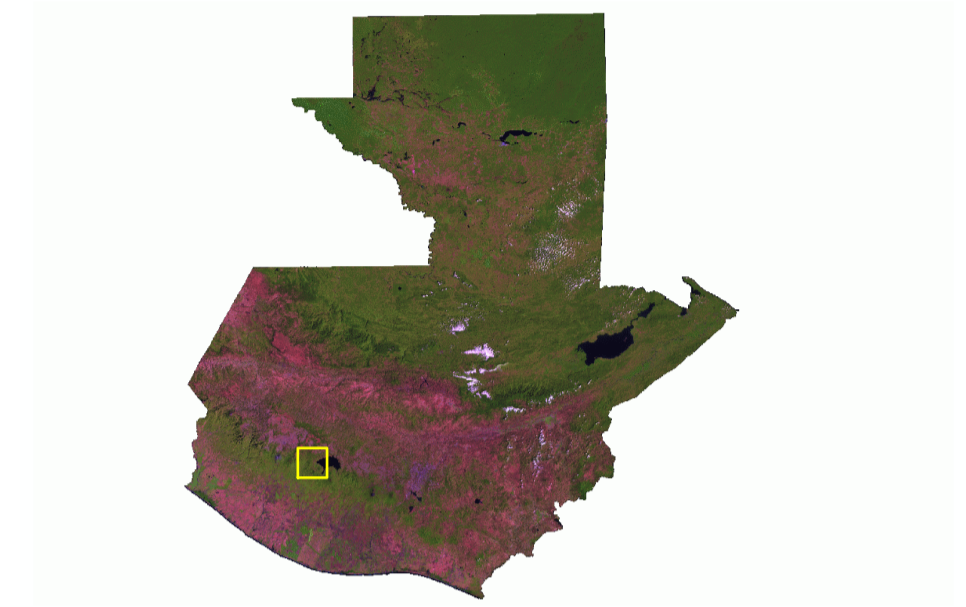


Simbología


 Lineamientos



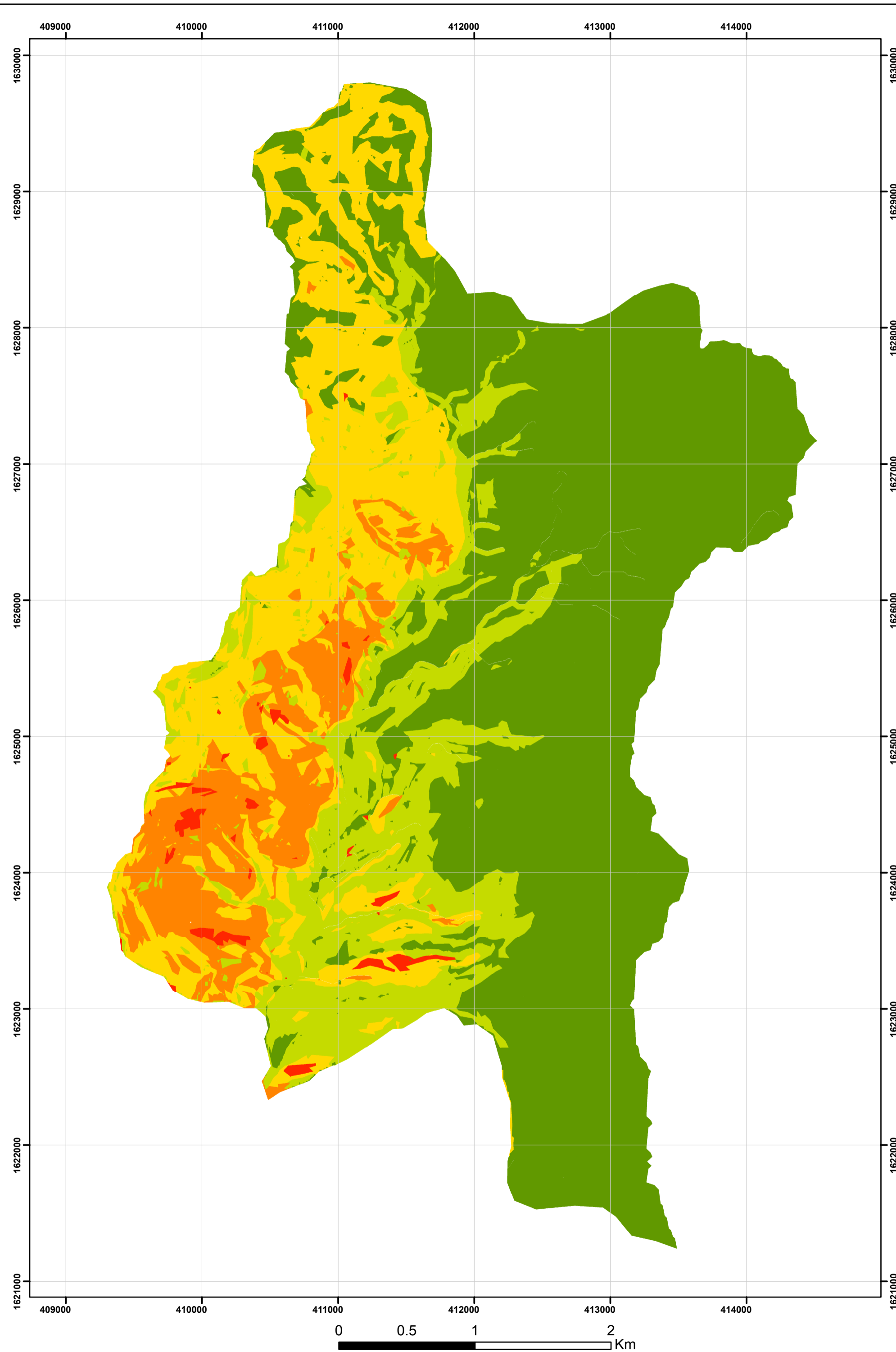
Orientaciones
Preferenciales
por Km²



1860 I	1960 IV	1960 I
1860 II	1960 III	1960 II
1859 I	1959 IV	1959 I

 UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE INGENIERÍA		
Análisis de susceptibilidad a movimientos de ladera en microcuenca Yatzá, departamento de Sololá.		
Contiene: Mapa de Lineamientos	Escala Numérica: 1: 25 000	
Trabajo realizado por: Rocío Marisol Palacios Castellanos		
Proyección: Guatemala Transversal Mercator (GTM)	Referencia Espacial: WGS 1984 UTM ZONA 15N	Revisado por:

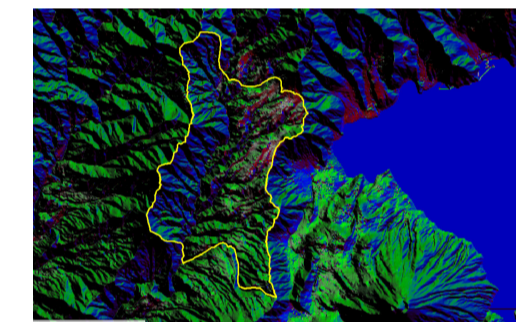
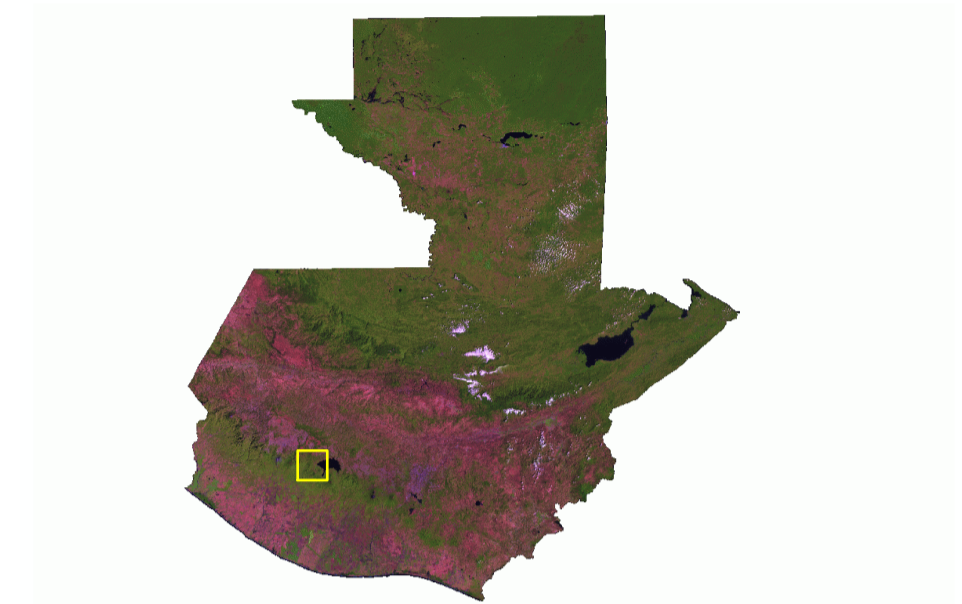
Mapa de Susceptibilidad




Leyenda

Zona de Susceptibilidad al Deslizamiento:

- Muy Baja
- Baja
- Media
- Alta
- Muy Alta



1860 I	1960 IV	1960 I
1860 II	1960 III	1960 II
1859 I	1959 IV	1959 I

 UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE INGENIERÍA		
Análisis de susceptibilidad a movimientos de ladera en microcuenca Yatzá, departamento de Sololá.		
Contiene:	Mapa de Susceptibilidad	Escala Numérica: 1: 25 000
Trabajo realizado por:	Rocío Marisol Palacios Castellanos	
Proyección:	Referencia Espacial:	Revisado por:
Guatemala Transversal Mercator (GTM)	WGS 1984 UTM ZONA 15N	