

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE
CARRERA DE INGENIERO GEÓLOGO

TRABAJO DE GRADUACION



INFORME FINAL DEL TRABAJO DE GRADUACION

ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE LADERA
EN LOS ALREDEDORES DEL CAMPO GEOTÉRMICO ZUNIL I,
ZUNIL, QUETZALTENANGO GUATEMALA.

DÉLMAR MISAEL VILLATORO MARTÍNEZ

COBÁN, ALTA VERAPAZ, MARZO DE 2015.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE
CARRERA DE INGENIERO GEÓLOGO

TRABAJO DE GRADUACIÓN

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE GRADUACION
ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE LADERA
EN LOS ALREDEDORES DEL CAMPO GEOTÉRMICO ZUNIL I,
ZUNIL, QUETZALTENANGO GUATEMALA.

PRESENTADO AL HONORABLE CONSEJO DIRECTIVO DEL
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE

POR

DÉLMAR MISAEL VILLATORO MARTÍNEZ
CARNÉ 200011230

COMO REQUISITO PREVIO A OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO GEÓLOGO

COBÁN, ALTA VERAPAZ, MARZO DE 2015.

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

RECTOR MAGNÍFICO

Dr. Carlos Guillermo Alvarado Cerezo

CONSEJO DIRECTIVO

PRESIDENTE:	Lic. Zoot. M.A. Fredy Giovani Macz Choc
SECRETARIA:	Licda. T.S. Floricelda Chiquín Yoj
REPRESENTANTE DE DOCENTES:	Ing. Geol. César Fernando Monterroso Rey
REPRESENTANTE EGRESADOS:	Ing. Agr. Julio Oswaldo Méndez Morales
REPRESENTANTES ESTUDIANTILES:	PEM. Hugo Francisco Ruano Rivera Br. Marco Tulio Medina Perez

COORDINADOR ACADÉMICO

Lic. Zoot. Erwin Gonzalo Eskenasy Morales

COORDINADOR DE LA CARRERA

Ing. Geol. Sergio David Morán Ical

COMISIÓN DE TRABAJOS DE GRADUACIÓN

COORDINADOR:	Ing. Geol. Bernie Castillo Moeschler
SECRETARIA:	Ing. Geol. Silvia Cortez Bendfeldt
VOCAL:	Ing. Geol. MSc. Osmín Jared Vásquez Hernández

REVISORA DE REDACCIÓN Y ESTILO

Ing. Quim. Verónica Beatriz Juárez Jiménez

REVISOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Ing. Geol. MSc. Fernando Monterroso Rey

ASESOR

Ing. Geol. MSc. Osmín Jared Vásquez Hernández

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



Ref. 15-CG-112/2014
06 de marzo de 2014

**CENTRO UNIVERSITARIO
DEL NORTE – CUNOR –
CARRERA GEOLOGÍA**

Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz
Telefax: 7952-1064 y 7956-6600 Ext. 209
Guatemala, C. A.
E-mail: geologiausac@gmail.com

Señores
Comisión Trabajos de Graduación
Carrera Geología
CUNOR

Respetables Señores:

Por este medio informo a ustedes que he procedido a la **ASESORÍA** del informe final de Trabajo de Graduación del T.U. **GEOL. DÉLMAR MISAEL VILLATORO MARTÍNEZ**, carné No. **200011230**, titulado: **“ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE LADERA EN LOS ALREDEDORES DEL CAMPO GEOTÉRMICO ZUNIL I, ZUNIL, QUETZALTENANGO GUATEMALA”**, el cual considero llena los requisitos establecidos para su aprobación, por lo que someto a consideración de ustedes dicho informe.

Atentamente

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing. Osmín Jared Vásquez Hernández
Docente Asesor
Carrera Geología, CUNOR



c.c. archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



**CENTRO UNIVERSITARIO
DEL NORTE – CUNOR –
CARRERA GEOLOGÍA**

Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz
Telefax: 7952-1064 y 7956-6600 Ext. 209
Guatemala, C. A.
E-mail: geologiausac@gmail.com

Ref. 15-CG-242/2014
07 de agosto de 2014

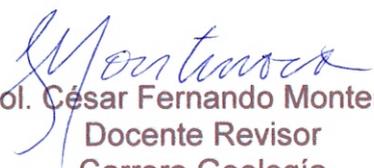
Señores
Comisión Trabajos de Graduación
Carrera Geología
CUNOR

Respetables Señores:

Por este medio informo a ustedes que he procedido a la **REVISIÓN** del informe final de Trabajo de Graduación del T.U. **GEOL. DÉLMAR MISAEL VILLATORO MARTÍNEZ**, carné No. **200011230**, titulado: **“ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE LADERA EN LOS ALREDEDORES DEL CAMPO GEOTÉRMICO ZUNIL I, ZUNIL, QUETZALTENANGO GUATEMALA”**, el cual considero llena los requisitos establecidos para su aprobación, por lo que someto a consideración de ustedes dicho informe.

Atentamente

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing. Geol. César Fernando Monterroso Rey
Docente Revisor
Carrera Geología
CUNOR



c.c. archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



**CENTRO UNIVERSITARIO
DEL NORTE – CUNOR –
CARRERA GEOLOGÍA**

Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz

Telefax: 7952-1064 y 7956-6600 Ext. 209

Guatemala, C. A.

E-mail: geologiausac@gmail.com

Ref. 15-CG-280/2014
13 de noviembre de 2014

Señores
Comisión Trabajos de Graduación
Carrera Geología
CUNOR

Respetables Señores:

Por este medio remito el informe Final de Trabajo de Graduación a nivel de grado titulado: **“ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE LADERA EN LOS ALREDEDORES DEL CAMPO GEOTÉRMICO ZUNIL I, ZUNIL, QUETZALTENANGO GUATEMALA”**, realizado por el (la) T.U. **GEOL. DÉLMAR MISAEL VILLATORO MARTÍNEZ**, carné No. **200011230**, el cual ya fue revisado por la **COMISIÓN DE REDACCIÓN Y ESTILO** de la Carrera de Geología, quienes consideramos llena los requisitos establecidos para su aprobación.

“ID Y ENSEÑAR A TODOS”

Inga. Quim. Verónica Beatriz Juárez Jiménez
Comisión Redacción y Estilo
Carrera Geología, CUNOR

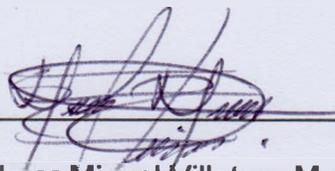


c.c. archivo

HONORABLE COMITÉ EXAMINADOR

En cumplimiento a lo establecido por los estatutos de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a consideración de ustedes el informe final del trabajo de graduación titulado: *"Análisis de susceptibilidad a movimientos de ladera en los alrededores del campo geotérmico Zunil I"*, como requisito previo a optar al título profesional de Ingeniero Geólogo.

f) _____



Délmis Misael Villatoro Martínez
Carné No. 200011230

RESPONSABILIDAD

“La responsabilidad del contenido de los trabajos de graduación es: Del estudiante que opta al título, del asesor y del revisor; la Comisión de Redacción y Estilo de cada carrera, es la responsable de la estructura y la forma”.

Aprobado en punto SEGUNDO, inciso 2 .4, subinciso 2.4.1 del Acta No. 17-2012 de Sesión extraordinaria de Consejo Directivo de fecha 18 de julio del año 2012.

DEDICATORIA

A LA MEMORIA DE MI ABUELO

Misael Salomón Villatoro que siempre me alentó a seguir adelante y cumplir mis metas, aún después de su trágica muerte.

A MIS PADRES

Misael Villatoro y Marci Martínez por su apoyo incondicional sin el cual esto no sería posible.

A MI ESPOSA

Eysa Maroly Muñoz ya que con ella he compartido y ha sido mi apoyo a lo largo de toda la carrera de geología.

A MI HIJO

Délmár Andrés Villatoro quién ha traído mucha felicidad y un nuevo propósito a mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Hubo un grupo amplio de personas que contribuyeron con la realización del presente trabajo de graduación, quiero expresar a todos ellos mis más sinceros agradecimientos, en especial a:

Carlos Humberto Arias jefe de la División de Desarrollo Geotérmico del Instituto Nacional de Electrificación –INDE-, por su aprobación para la realización del estudio y su apoyo durante toda la investigación, sin lo cual esta investigación no se habría realizado.

A la organización Geólogos del mundo y la asociación Vivamos Mejor de Panajachel, por haberme brindado la capacitación en la metodología utilizada para realizar la investigación.

A mi asesor el Ingeniero Geólogo Osmín Jared Vásquez Hernández, por su apoyo, colaboración y asesoría brindada durante la realización de este trabajo de graduación.

A la Comisión de Trabajos de Graduación de la carrera de Geología, especialmente al Ingeniero Geólogo Bernnie Gamaliel Castillo Moeschler, por la supervisión del estudio y la aprobación del mismo.

Finalmente quisiera expresar mi agradecimiento a mis amigos y colegas Leónidas Monterroso, Franz García y Axel Gutiérrez, por su ayuda y acompañamiento en las fases de campo preliminares de la investigación.

ÍNDICE GENERAL

	Página
RESUMEN	i
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN	
1.1 Nombre	3
1.2 Análisis del problema	3
1.2.1 Antecedentes	3
1.2.2 Planteo del problema	8
1.2.3 Justificación del problema	8
1.2.4 Hipótesis de trabajo	9
1.3 Objetivos	9
1.3.1 Objetivo general	9
1.3.2 Objetivos específicos	10
1.4 Ubicación geográfica del área y extensión	10
1.3.1 Localización y extensión del área	10
1.3.2 Vías de acceso	11
CAPÍTULO II	
METODOLOGÍA	
2.1 Etapas de la investigación	16
2.2 Los factores condicionantes	17
2.3 Generación del mapa de susceptibilidad	18
2.4 Cronograma de actividades	19
CAPÍTULO III	
MARCO TEÓRICO	
3.1 Reducción del riesgo de desastres	21
3.1.1 Amenaza	25

3.1.2 Desastre	25
3.1.3 Exposición	26
3.1.4 Factores condicionantes	26
3.1.5 Factores desencadenantes	26
3.1.6 Mitigación	27
3.1.7 Peligrosidad	27
3.1.8 Riesgo	27
3.1.9 Susceptibilidad	28
3.1.10 Vulnerabilidad	29
3.2 Movimientos de ladera	30
3.2.1 Clasificación de los movimientos de ladera	32
3.2.2 Elementos morfológicos y morfométricos de un deslizamiento	37
3.2.3 Causas de los movimientos de ladera	41
3.3 Mapa de susceptibilidad a movimientos de ladera	44

CAPÍTULO IV GEOGRAFÍA FÍSICA

4.1 Fisiografía	49
4.1.1 Provincia fisiográfica de tierras altas volcánicas	49
4.1.2 Relieve	51
4.2 Provincias geomorfológicas	55
4.2.1 Complejo de rocas volcánicas terciarias	56
4.2.2 Valle de Quetzaltenango	56
4.2.3 Complejo volcánico cuaternario	57
4.2.4 Faldas del pacifico	60
4.3 Hidrografía	60
4.4 Clima y Vegetación	61
4.4.1 Clima	61
4.4.2 Vegetación	63

CAPÍTULO V GEOLOGÍA REGIONAL

5.1 Marco tectónico regional	67
5.2 Estratigrafía	70
5.2.1 Rocas plutónicas	72
5.2.2 Complejo de rocas volcánicas terciarias	72
5.2.3 Lavas viejas	73
5.2.4 Lavas del volcán santa María	74
5.2.5 Lavas del volcán El Galápago	75
5.2.6 Detritus lahárico y fluvial de origen volcánico	75
5.2.7 Lavas andesíticas del domo cerro quemado	75
5.2.8 Lavas y cúpula andesítica del domo el azufral	76
5.2.9 Lavas recientes de Zunil y lavas del domo de Zunil	77
5.2.10 Rocas piroclásticas recientes	77
5.2.11 Lavas 1818 del cerro quemado	77
5.2.12 Lavas del domo Santiaguito	78
5.2.13 Coluvión y aluvión	79
5.3 Geología estructural regional	79
5.4 Historia volcánica	81

CAPÍTULO VI GEOLOGÍA LOCAL

6.1 Unidades litológicas	87
6.1.1 Lavas antiguas del volcán cerro quemado	88
6.1.2 Lavas del cerro el galápago	91
6.1.3 Lavas de Zunil	92
6.1.4 Lavas de la catarata de Zunil	94
6.1.5 Lavas del domo de Zunil	97
6.1.6 Lavas del volcán cerro quemado	98
6.1.7 Coluvión antiguo	100
6.1.8 Depósitos piroclásticos	102
6.1.9 Abanico aluvial antiguo y reciente	103
6.1.10 Coluvión reciente	105
6.1.11 Aluvión reciente	106

6.2 Geología estructural local	108
6.2.1 Lineamientos	108
6.2.2 Diaclasas	110
6.2.3 Fallas	111
6.3 Alteración hidrotermal	115

CAPÍTULO VII INVENTARIO DE MOVIMIENTOS DE LADERA

7.1 Mapa del inventario de movimientos de ladera	122
--	-----

CAPÍTULO VIII DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES CONDICIONANTES

7.1 Pendiente del terreno	128
7.2 Orientación de laderas	129
7.3 Unidades geomorfológicas	130
7.4 Unidades litológicas	131
7.5 Alteración hidrotermal	133
7.6 Uso de suelos	134

CAPÍTULO IX SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE LADERA

9.1 Matriz de susceptibilidad	137
9.2 Mapa de susceptibilidad a movimientos de ladera	139

CAPÍTULO X ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

10.1 Análisis de los mapas de los factores condicionantes	147
10.2 Análisis del inventario de movimientos de ladera	150
10.3 Análisis de la metodología para la correlación entre factores condicionantes y movimientos de ladera	152
10.4 Análisis del mapa de susceptibilidad a movimientos de ladera final	153

CONCLUSIONES	157
---------------------	-----

RECOMENDACIONES	161
------------------------	-----

BIBLIOGRAFÍA	165
---------------------	-----

ANEXOS

Anexo 1 Cronograma de actividades	170
Anexo 2 Ficha de campo para levantamiento del inventario de movimientos de ladera	171
Anexo 3 Utilización de sistemas de información geográfica (SIG) en la generación de mapas de susceptibilidad	177
a) Creación del modelo TIN	178
b) Creación del mapa de pendientes y orientaciones	179
c) Reclasificación de capas " <i>Raster</i> "	180
d) Conversión de <i>Raster</i> a capa Vectorial (<i>Feature</i>)	181
e) Reclasificación de capas vectoriales	183
f) Relleno de la matriz de susceptibilidad	185
g) Suma de capas (<i>Raster Calculator</i>)	189
Anexo 4 Mapas de los factores condicionantes	195
Mapa 15 Pendientes	196
Mapa 16 Orientación de laderas	197
Mapa 17 Unidades geomorfológicas	198
Mapa 18 Unidades geomorfológicas clasificadas	199
Mapa 19 Unidades litológicas clasificadas	200
Mapa 20 Grado de alteración hidrotermal	201
Mapa 21 Usos del suelo	202
Mapa 22 Usos del suelo clasificado	203
Anexo 5 Caracterización de los movimientos de ladera que han causado daños a la infraestructura del campo geotérmico Zunil I	205

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de un deslizamiento rotacional y partes del mismo	33
Figura 2 Tipos de deslizamientos rotacionales	34
Figura 3 Tipos de flujo	36
Figura 4 Clasificación general de los movimientos de ladera	38
Figura 5 Principales elementos morfológicos y morfométricos de un deslizamiento	40
Figura 6 Esquema de la metodología para realización de los mapas de susceptibilidad, peligrosidad y riesgo	47
Figura 7 Columna litológica idealizada	88
Figura 8 Diagrama de rosas que muestra el rumbo de los lineamientos observados en el área de estudio	109
Figura 9 Diagrama de rosas que muestra el rumbo de los patrones de diaclasamiento	111
Figura 10 Esquema estructural para Guatemala	112
Figura 11 Diagrama con medidas para deslizamiento	172
Figura 12 Creación de un TIN	178
Figura 13 Creación del mapa de pendientes y el de orientaciones	179
Figura 14 Procedimiento de reclasificación de un raster	181
Figura 15 Resultado de la reclasificación de la pendiente en 4 categorías	181
Figura 16 Conversión de raster a vector (feature)	182
Figura 17 Editor de capas	183
Figura 18 Conversión de vector a raster	184
Figura 19 Seleccionar por atributos	186
Figuras 20 Seleccionar por localización	186
Figura 21 Calculo del área	187
Figura 22 Calculo del área del GRIDCODE=1 del mapa de pendientes	187
Figura 23 Introducción del valor para GRIDCODE=1 del mapa de pendientes	189
Figura 24 Uso de Raster Calculator	190
Figura 25 Proceso de clasificación de la leyenda	192
Figura 26 Proceso en la definición de la leyenda	193

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1 Mapa de ubicación del área de estudio	12
Mapa 2 Vías de acceso al área de estudio	13
Mapa 3 Mapa de provincias fisiográficas	50
Mapa 4 Mapa hidrografía	62
Mapa 5 Mapa de zonas de vida	65

Mapa 6 Complejos geomorfológicos	66
Mapa 7 Tectónica regional	70
Mapa 8 Geología regional	84
Mapa 9 Geología estructural regional	85
Mapa 10 Mapa de lineamientos	109
Mapa 11 Geología local	119
Mapa 12 Inventario de movimientos de ladera	124
Mapa 13 Susceptibilidad a movimientos de ladera	145
Mapa 14 Contraste entre el mapa de Susceptibilidad de la hipótesis A con los Movimientos de Ladera	155

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1 Vista panorámica actual del deslizamiento ocurrido en 1991 que causó serios daños al pozo ZCQ-4	5
Fotografía 2 Deslizamiento ocurrido en septiembre de 2010, causó daños en la tubería de conducción de los pozos ZCQ6 y ZD3 hacia la planta ORZUNIL	5
Fotografía 3 Flujo de detritos que inundó la plataforma del pozo ZCQ-3.	7
Fotografía 4 Flujo de lodo y abundantes bloques de roca que se acumularon en el camino de acceso a las plataformas de los pozos.	7
Fotografía 5 Panorámica del cañón de Zunil	52
Fotografía 6 Salto de agua en la pared escarpada del cañón de Zunil	53
Fotografía 7 Saltos de agua en las paredes escarpadas del cañón de Zunil	53
Fotografía 8 Laderas que limitan de NO a SO el área de estudio	53
Fotografía 9 Topografía en zonas cubiertas por piroclastos	54
Fotografía 10 Planicies aluviales del río Samalá	55
Fotografía 11 Afloramiento de la unidad litológica lavas antiguas del volcán Cerro Quemado	89
Fotografía 12 Afloramiento de la unidad litológica lavas antiguas del volcán Cerro Quemado	89
Fotografía 13 Afloramiento de la unidad litológica lavas antiguas del volcán Cerro Quemado	89
Fotografía 14 Disyunción columnar en dacitas hornbléndicas, de la unidad lavas antiguas del volcán Cerro Quemado	90
Fotografía 15 Ladera del cráter las Majadas compuesta por lavas andesíticas piroxénicas de la unidad de lavas del cerro El Galápagos	91
Fotografía 16 Afloramiento de la unidad litológica lavas de Zunil en el cañón formado por el río Samalá	92
Fotografía 17 Afloramiento de las lavas de Zunil en el que se	93

observan fumarolas y manantiales de aguas termales	
Fotografía 18 Afloramiento en el escarpe de las cataratas de Zunil	95
Fotografía 19 Afloramiento en el escarpe de las cataratas de Zunil	96
Fotografía 20 Afloramiento de las lavas de la catarata de Zunil	97
Fotografía 21 Panorámica del Domo de Zunil	98
Fotografía 22 Panorámica del Complejo dómico Cerro Quemado	99
Fotografía 23 Afloramiento de la unidad de Coluvión Antiguo	101
Fotografía 24 Afloramiento de la unidad de Coluvión Antiguo alterada hidrotermalmente	102
Fotografía 25 Depósitos pomáceos cubriendo la parte más alta y con menor pendiente de la ladera	103
Fotografía 26 Depósitos de abanico aluvial, material depositado durante depresión tropical 12E	104
Fotografía 27 Depósitos coluviales recientes	106
Fotografía 28 Depósitos aluviales recientes en la margen izquierda del río Samalá	107
Fotografía 29 Planicies de inundación del río Samalá	108
Fotografía 30 Afloramiento en el que se observa el patrón de diaclasamiento de las lavas de Zunil	110
Fotografía 31 Fractura debido a deformación frágil, consecuencia de la falla de Zunil	113
Fotografía 32 Rotura plana o en cuña a favor del plano de falla	114
Fotografía 33 Zona de alteración Hidrotermal “el Azufra!”	116
Fotografía 34 Manantial Hidrotermal	117
Fotografía 35 Fumarola con crecimiento de cristales de azufre	117
Fotografía 36 Depositación de minerales debido al flujo hidrotermal	118
Fotografía 37 Caolinización en rocas volcánicas como resultado de alteración hidrotermal	118
Fotografía 38 Afloramiento escarpado de depósitos de talud de distintos eventos	121
Fotografía 39 Vista panorámica del deslizamiento que causo daños en el pozo ZCQ-4	208
Fotografía 40 Zona del derrumbe del 10 de septiembre en la zona noroeste de la plataforma de los pozos ZCQ6 y ZD3	212
Fotografía 41 Escalón principal y tipo de material en el deslizamiento	213
Fotografía 42 Material desplazado por el deslizamiento ocurrido en septiembre de 2010 que causo daños en la tubería de conducción de los pozos ZCQ-6 y ZD3	213
Fotografía 43 Bloques de rocas arrastrados por el flujo de derrubios	217
Fotografía 44 Plataforma del pozo ZCQ-2 completamente cubierta por lodo y rocas debido al flujo de detritos	218
Fotografía 45 Flujo de derrubios que causo daños en la plataforma del pozo ZCQ-3 y en el camino de acceso a los pozos	222
Fotografía 46 Daños en la plataforma del pozo ZCQ-3, completamente cubierta por lodo y rocas debido al flujo de detritos	223

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Vértices del área de estudio	11
Tabla 2 Cronograma de actividades	20
Tabla 3. Procesos geológicos y meteorológicos que pueden causar riesgo	22
Tabla 4 Influencia de los diferentes factores en las condiciones de los materiales y de las laderas	43
Tabla 5 Factores condicionantes y categorías	127
Tabla 6 Matriz de susceptibilidad	140
Tabla 7 Coeficientes de peso de los factores condicionantes	141

ÍNDICE DE IMAGENES

IMAGEN 1 Modelo de elevación digital de los alrededores del área de estudio	52
IMAGEN 2 Modelo de elevación digital mostrando las zonas de muy alta susceptibilidad a movimientos de ladera dentro del campo geotérmico Zunil I	144
IMAGEN 3 Zona afectada por el deslizamiento ocurrido en enero de 1991 que causo daños en el pozo ZCQ-4	209
IMAGEN 4 Zona afectada por el deslizamiento en las cercanías de la plataforma de los pozos ZCQ-6 y ZD-3	214
IMAGEN 5 Zona afectada por el flujo de derrubios al Noroeste de la plataforma del pozo ZCQ-2	219
IMAGEN 6 Zona afectada por el flujo de derrubios al Norte de la plataforma de los pozos ZCQ-5, ZD-1 y ZD-2	224

RESUMEN

La presente investigación desarrolla el tema de *“Análisis de susceptibilidad a movimientos de ladera en los alrededores del campo geotérmico Zunil I”*, cuyo resultado final es un mapa que clasifica el terreno en zonas de baja, moderada, alta y muy alta susceptibilidad a presentar movimientos en masa.

La metodología empleada para este estudio se denomina como método estadístico bivalente, el cual se basa en una correlación más o menos explícita entre los factores condicionantes, con los movimientos de ladera preexistentes en la zona de estudio. Los factores condicionantes son aquellos que condicionan el terreno a la ocurrencia de movimientos en masa, en esta investigación se consideraron seis factores condicionantes estos son: unidades litológicas, unidades geomorfológicas, pendientes del terreno, orientación de las laderas, alteraciones hidrotermales y uso del suelo.

La implementación de esta metodología permite obtener una zonificación de la susceptibilidad del terreno a la ocurrencia de estos fenómenos, mediante la combinación de la valoración y peso relativo de los diversos factores condicionantes antes mencionados en un sistema de información geográfico (SIG).

El mapa de susceptibilidad final, refleja que debido a la complejidad geológica del lugar y a la suma de los factores condicionantes, en los alrededores del campo geotérmico Zunil I, la susceptibilidad a movimientos de ladera en la mayor parte del área va de alta a muy alta principalmente en las

laderas de alta pendiente que culminan en escarpes al Oeste y Noroeste de la zona.

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 y urbanismo entre otros. A partir de la presente investigación se tiene una mejor comprensión de los fenómenos naturales asociados a movimientos de ladera en el área del campo geotérmico Zunil I; estos fenómenos inciden en el normal funcionamiento del campo, por lo que la toma de medidas para mitigar los daños a la infraestructura es prioritario.

INTRODUCCIÓN

A continuación se presenta el informe final del trabajo de graduación que lleva por nombre: *“ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD NATURAL A MOVIMIENTOS DE LADERA EN LOS ALREDEDORES DEL CAMPO GEOTÉRMICO ZUNIL I”*. El estudio tiene por objetivo generar un mapa de susceptibilidad natural a movimientos de ladera del área de estudio.

El informe inicia con los antecedentes de este tipo de fenómenos y su incidencia en el funcionamiento del campo geotérmico; seguido a esto se presenta datos generales sobre el planteamiento y justificación del problema además se presenta la hipótesis de trabajo, y la localización geográfica de la investigación.

En el siguiente capítulo, Metodología, se incluyen los objetivos del estudio y la metodología utilizada para el análisis de la correlación entre los factores condicionantes seleccionados y los movimientos de ladera por medio de la matriz de susceptibilidad. En el Marco Teórico se presentan las definiciones de los conceptos o nociones en las que se fundamenta la investigación, desarrollándose tres temas principales que son: Reducción del riesgo de desastres, Movimientos de ladera y Mapas de susceptibilidad a movimientos de ladera.

El capítulo 4 de Geografía física, muestra la fisiografía de la zona, donde además de la provincia y subprovincia fisiográfica a la que pertenece el área de estudio se describe el relieve; este capítulo presenta una división regional en complejos geomorfológicos, el cual ayuda al entendimiento de la geomorfología

a nivel regional; posterior a esto se presenta un breve resumen de la hidrografía, clima y vegetación de la zona.

La geología del área se expone primero desde una escala regional, donde se analiza el marco tectónico regional para Guatemala, la estratigrafía regional de la zona, la geología estructural regional y la historia volcánica en la región; A nivel local se describen las unidades litológicas que afloran en el área de estudio, se presenta un análisis sobre geología estructural local y finalmente se discute sobre el tipo de alteración hidrotermal superficial en el área y sus principales manifestaciones.

El capítulo 7, tiene como finalidad presentar los mapas para cada uno de los factores condicionantes clasificados en cuatro categorías según su incidencia en la ocurrencia de movimientos en masa; el informe continúa mostrando el inventario de movimientos de ladera levantado en el área de estudio a partir del análisis de fotografías aéreas, ortofotos y trabajo de campo.

Luego se describen y analizan cada uno de los mapas de los factores condicionantes comparándolos con el inventario de movimientos de ladera y finalmente se presenta el mapa final de susceptibilidad a movimientos de ladera.

El informe termina, presentando las conclusiones que se obtuvieron tras realizar la investigación y las recomendaciones que se creyeron oportunas para mitigar los daños ocasionados por movimientos de ladera a la infraestructura del campo geotérmico Zunil I.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN

1.1 Nombre

La presente investigación lleva por título: *ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE LADERA EN LOS ALREDEDORES DEL CAMPO GEOTÉRMICO ZUNIL I.*

1.2 Análisis del problema

1.2.1 Antecedentes

La zona de estudio, El Campo Geotérmico Zunil I, está ubicado al sur de la ciudad de Quetzaltenango, Guatemala. Abarca una área de estudio de aproximadamente 7 km² dentro de la provincia del Arco volcánico circunpacífico. Este sitio se caracteriza por encontrarse localizado en la intersección de una zona importante de fallamiento en dirección NE asociada con la zona de subducción y con el margen de una caldera de grandes dimensiones.

Este estudio fue encaminado a su ejecución debido a la ocurrencia de múltiples eventos de deslizamientos que han causado daños en la infraestructura del campo, en enero de 1991 (a las 22:30 hora local) ocurrió un desastroso deslizamiento en el campo geotérmico Zunil I el cual mató 23 personas y originalmente fue atribuido a la explosión del pozo ZCQ-4, el cual fue seriamente dañado y sepultado por el deslizamiento.

De acuerdo a las investigaciones preliminares hechas por Flynn y colaboradores (1991) se infiere que la causa de este desastroso evento fue la interacción de 3 factores naturales: la alteración y poca consolidación de la roca, la pendiente del terreno y la cercanía del sitio a la zona de falla Zunil, considerándose que la adición de agua subterránea, ya sea por flujo de manantiales tibios o condensación de fumarolas, fue el agente disparador más probable¹.

En la fotografía 1 se observa una toma panorámica del estado actual del sitio del deslizamiento ocurrido en 1991, aunque aparentemente parece haber alcanzado un estado de equilibrio, aún se observa mucho material suelto y alterado hidrotermalmente en la base del mismo, este material aún representa un riesgo potencial para la ocurrencia de flujos de detritos.

Otro derrumbe de menor proporción que el anterior, ocurrió en septiembre del 2010 durante el fenómeno atmosférico nombrado como depresión 11, donde el acomodo de la sección norte de un derrumbe antiguo en la zona cercana a la plataforma de los pozos ZCQ6 y ZD3 acarreo la tubería de conducción de estos pozos hacia la planta dejando una zona inestable y aún en proceso de estabilización. La causa probable de este evento, al igual que en el caso anterior, debe considerarse la alteración de la roca, la poca consolidación, la pendiente y una adición de agua proveniente de la zona alta al derrumbe.

En la fotografía 2 se muestra parte de la zona afectada por este deslizamiento ocurrido en septiembre de 2010.

¹CAPACITY BUILDING FOR NATURAL DISASTER REDUCTION (CBNDR) REGIONAL ACTION PROGRAM FOR CENTRAL AMERICA (RAPCA). *Zonificación de Amenazas Naturales en la cuenca del río Samalá y Análisis de vulnerabilidad y riesgo en la población de San Sebastián Retalhuleu, Guatemala, Centro América.* p. 9

FOTOGRAFÍA 1
VISTA PANORÁMICA ACTUAL DEL DESLIZAMIENTO
OCURRIDO EN 1991 QUE CAUSÓ SERIOS DAÑOS AL
POZO ZCQ-4



Tomada por: Axel Gutiérrez, Año 2011.

FOTOGRAFÍA 2
DESLIZAMIENTO OCURRIDO EN SEPTIEMBRE DE
2010, CAUSO DAÑOS EN LA TUBERÍA DE CONDUCCIÓN
DE LOS POZOS ZCQ6 Y ZD3 HACIA LA PLANTA
ORZUNIL



Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2011.

Recientemente en los primeros días del mes de octubre de 2011, debido al fenómeno atmosférico nombrado depresión tropical doce-E que afectó el territorio de Guatemala, en el campo geotérmico Zunil I se dieron una serie de eventos que afectaron las instalaciones del campo, estos eventos corresponden a deslizamientos y flujos de lodos que bajaron por las laderas, dañando el camino de acceso a las plataformas de los pozos, las plataformas y las válvulas de los cabezales de los pozos ZCQ-3 y ZCQ-2 y la tubería de conducción de los pozos ZD-1 y ZD-2 principalmente.

La fotografía 3 muestra los daños sufridos en la plataforma del pozo ZCQ-3, ocasionados por los flujos de detritos que bajaron por las laderas, específicamente se muestra como la plataforma del pozo quedó sepultada hasta una altura de 1.5 metros y con escape de vapor debido a averías en una de las válvulas laterales.

La fotografía 4 por su parte muestra parte del camino de acceso a las plataformas de los pozos el cual quedó cubierto por lodo y bloques de roca de hasta 3 metros de diámetro.

FOTOGRAFÍA 3
FLUJO DE DETRITOS QUE INUNDÓ LA PLATAFORMA
DEL POZO ZCQ-3



Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2011.

FOTOGRAFÍA 4
FLUJO DE LODO Y ABUNDANTES BLOQUES DE ROCA
QUE SE ACUMULARON EN EL CAMINO DE ACCESO A
LAS PLATAFORMAS DE LOS POZOS



Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2011.

1.2.2 Planteo del problema

El campo geotérmico Zunil I se encuentra ubicado en una zona volcánica activa bastante compleja, dentro de la caldera de Quetzaltenango, que es la estructura dominante, en la cual se han venido sucediendo distintos eventos volcánicos que han dado como resultado calderas de menores dimensiones, conos volcánicos, flujos de lava y un sistema geotérmico activo, el cual se evidencia en superficie en la gran cantidad de fumarolas y manantiales de agua caliente presentes en el lugar.

Lo anterior ocasiona laderas de alta pendiente que culminan en escarpes y rocas poco consolidadas alteradas hidrotermalmente, lo que junto con otros factores, condicionan el área a la ocurrencia de movimientos de ladera, de los cuales, los registros geológicos evidencian su sucesión a lo largo del tiempo.

En épocas recientes debido a la conjunción de los factores geológicos arriba mencionados y con la lluvia como agente de disparo han ocurrido este tipo de fenómenos con deslizamientos y flujos de detritos principalmente, los cuales han dañado la infraestructura del campo estropeando tuberías, plataformas de pozos, y caminos, perjudicando el correcto y normal funcionamiento de la planta de energía geotérmica que opera en el lugar.

1.2.3 Justificación del problema

En el área de estudio además de la planta geotérmica también se ubican algunas familias que viven y tienen sus cultivos dentro de las instalaciones del campo, por lo que es importante conocer y zonificar las áreas con mayor susceptibilidad a presentar este tipo de eventos.

Debido a la complejidad geológica del lugar para evaluar la susceptibilidad a movimientos de ladera, se hace necesario la implementación de una metodología que valore e integre los distintos factores que condicionan el área a que se den este tipo de fenómenos.

Esta metodología dará como resultado un mapa que zonifique los lugares más susceptibles a presentar movimientos en masa, y de esta forma permita a las autoridades a cargo del campo concentrarse en los sitios en lo que podrían encontrarse en riesgo la infraestructura del campo, aquellos que atenten contra la vida de los pobladores y los cultivos, con el fin de implementar estudios geotécnicos que lleven a las soluciones de obra civil más adecuadas para cada caso.

1.2.4 Hipótesis de trabajo

El área donde se ubica el campo Geotérmico Zunil I y sus alrededores, es una zona susceptible a presentar movimientos de ladera (variable dependiente); dicha susceptibilidad del lugar a presentar movimientos en masa, está determinada por elementos geológicos, geomorfológicos y Antrópicos como factores condicionantes y por la lluvia como principal agente disparador (variables independientes). El análisis y ponderación de estos factores permite evaluar la zona obteniéndose como resultado un mapa que clasifique y muestre la susceptibilidad del terreno a los movimientos de ladera, clasificando la susceptibilidad en cuatro rangos que son baja, media, alta y muy alta.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar la susceptibilidad natural del campo geotérmico Zuni I y sus alrededores a presentar movimientos de ladera.

1.3.2 Objetivos específicos

- a. Analizar los principales factores condicionantes según su influencia en la predisposición del terreno a presentar movimientos en masa; para el presente estudio son: la pendiente del terreno, la orientación de las laderas, la geomorfología del lugar, el tipo de litología, uso del suelo y grado de alteración hidrotermal.
- b. Elaborar un inventario de movimientos en masa y un mapa de cada uno de los factores condicionantes a la susceptibilidad natural del terreno a la ocurrencia de movimientos de ladera.
- c. Proponer un mapa de susceptibilidad natural a movimientos de ladera que zonifique el área en cuatro rangos de susceptibilidad (Baja, Moderada, Alta y Muy alta).
- d. Contrastar el inventario de movimientos de ladera con el mapa de susceptibilidad propuesto.

1.4 Ubicación geográfica del área y extensión

1.4.1 Localización y extensión del área

El campo geotérmico Zunil I se localiza 8 km. al sureste de la ciudad de Quezaltenango, en la aldea la Calera del municipio de Zunil, del cual el campo toma su nombre; las estructuras más sobresalientes en la zona son el complejo volcánico Cerro Quemado al norte, y los volcanes Santa María y Santiaguito al suroeste. El campo geotérmico de Zunil se encuentra en una depresión orientada al NW-SE y cubre un área aproximadamente de 2 km². La localización del área de estudio se observa en el mapa 1.

La presente investigación se enfoca en la susceptibilidad a los deslizamientos en los alrededores del campo, por lo que el área estudiada abarca 7 km² y sus vértices son los siguientes:

TABLA 1
VÉRTICES DEL ÁREA DE ESTUDIO

Vértice	x	y
A	659500	1635000
B	663000	1635000
C	663000	1633000
D	659500	1633000

Fuente: Investigación de campo en base a SIG, coordenadas UTM WGS84 Z15 N

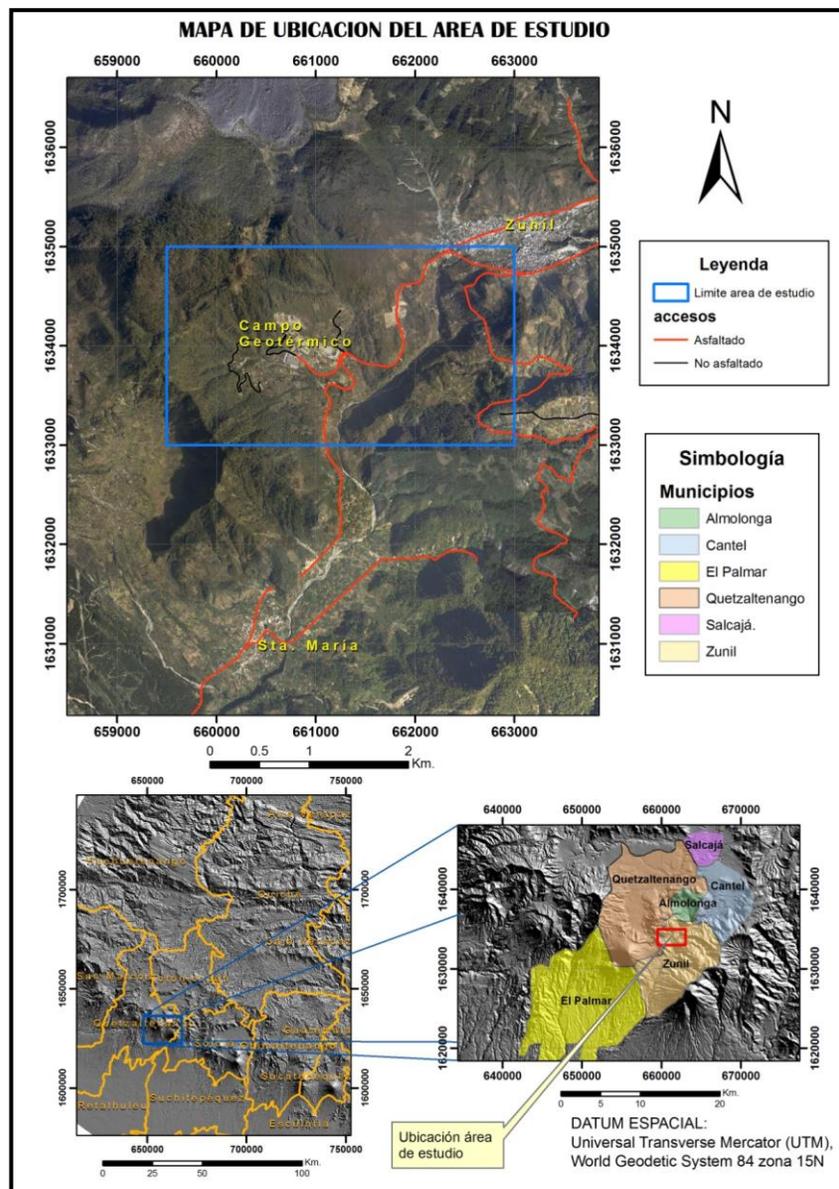
1.4.2 Vías de acceso

Se puede llegar al área de estudio al menos por dos diferentes carreteras, por la carretera Interamericana (CA-1 occidente), donde desde la ciudad de Guatemala saliendo por la calzada Roosevelt se recorre la carretera Interamericana hasta el cruce conocido como cuatro caminos donde se toma la carretera rumbo a la ciudad de Quetzaltenango, de la ciudad de Quetzaltenango se toma la carretera departamental 43 (RD-43), que baja hacia la costa sur llegando hasta el municipio de Zunil y finalmente a la aldea la Calera donde se ubica el campo Geotérmico.

La segunda opción es salir de la ciudad de Guatemala por la calzada Aguilar Batres, hacia la carretera (CA-9), hasta la ciudad de Escuintla; desde acá se debe tomar la carretera (CA-2) la cual se debe recorrer hasta el cruce a Retalhuleu en el puente Zarco donde se debe tomar la carretera departamental 43 (RD-43), que se dirige hacia el norte hasta la ciudad de Quetzaltenango, esta se debe recorrer hasta la aldea la Calera del municipio de Zunil.

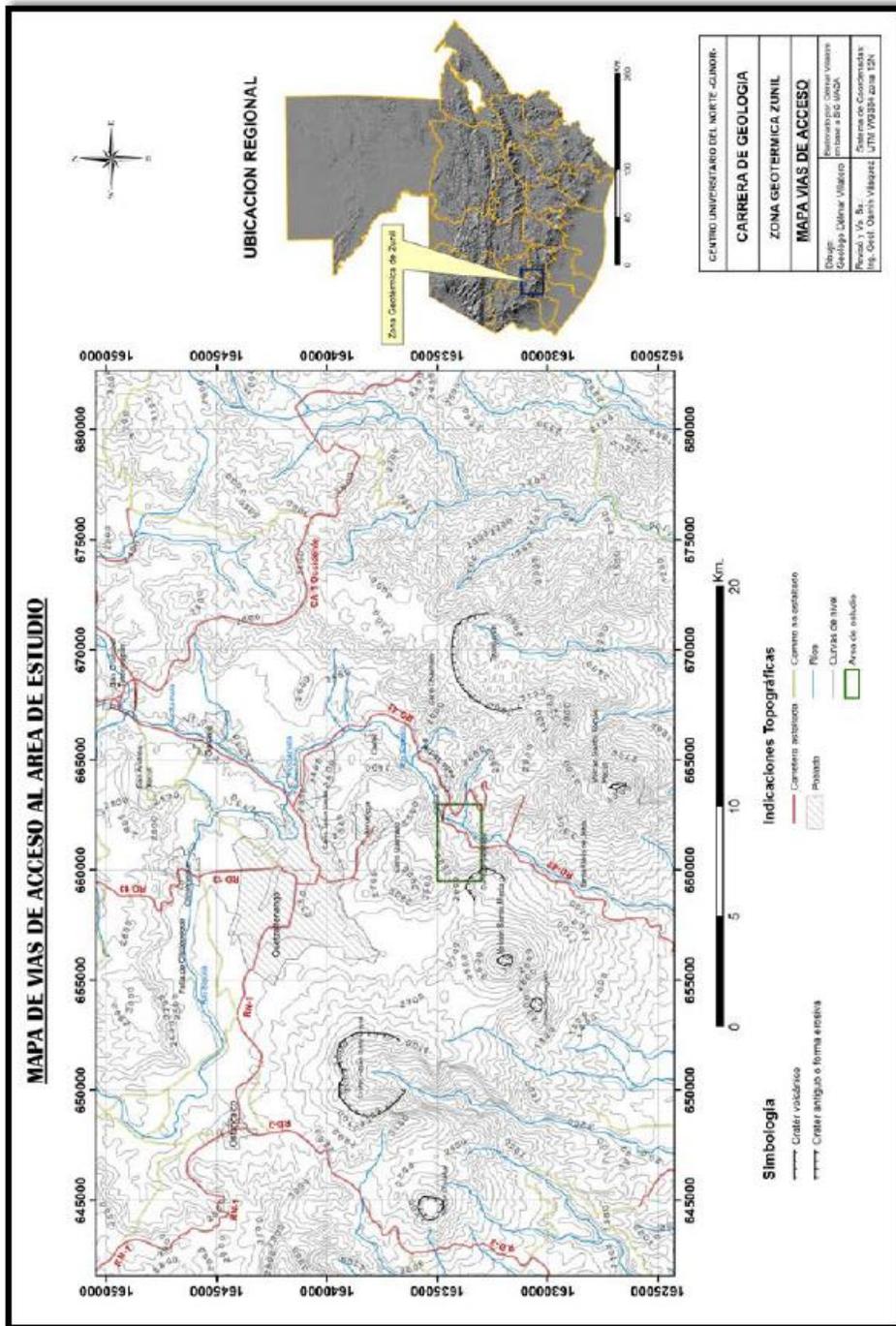
Por ambas carreteras se hace un tiempo aproximado de 3 1/2 horas desde la ciudad de Guatemala. Dentro del área existe una red de carreteras secundarias que facilitan los trabajos de campo. El mapa 2 muestra las principales vías de acceso a la zona clasificándolas como caminos asfaltados y de terracería.

MAPA 1 MAPA DE UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO



Fuente: Investigación de campo, obtenido en ArcGis v.9.3

MAPA 2 VÍAS DE ACCESO AL ÁREA DE ESTUDIO



Fuente: Investigación de campo, en base a SIG MAGA.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

La metodología para este estudio se basa en el método estadístico bivariante, el cual se fundamenta en el análisis cruzado de los mapas condicionantes del terreno con el inventario de movimientos de ladera, de los cuales se obtienen valores ponderados de susceptibilidad según la densidad de movimientos o el área afectada por estos.

Este método fue seleccionado debido al tamaño del área y tiempo disponible para la ejecución del estudio, además se considera que enlaza bien el trabajo de campo ejecutado con la tecnología de los sistemas de información geográfica (SIG) por medio del programa *ArcGis v.9.3*.

La historia referente a los eventos ya sucedidos da indicios de los eventos que pueden llegar a pasar en el futuro, por este motivo el análisis de los fenómenos ocurridos es muy importante para elaborar el mapa de susceptibilidad, por lo que la base metodológica para generar el mapa de susceptibilidad es el inventario de movimientos de ladera, con los principales datos sobre cada movimiento en cuestión, el inventario también tiene como función la validación del mapa final.²

² CARLES FERNÁNDEZ LAVADO. Programa IPGARAMSS (2008). *Manual metodológico para la evaluación de movimientos de ladera en el AMSS (El Salvador, CA)*. Financiado por la Unión Europea, AECID, Ayuntamiento de Barcelona, Área Metropolitana de Barcelona, Diputación de Barcelona. Ejecutado por OPAMSS, COAMSS y Geólogos del Mundo.p.10

El mapa final, va a ser definido en base a cuatro rangos de susceptibilidad (Baja, Moderada, Alta y Muy alta). Por este motivo los factores condicionantes considerados para el presente estudio se agrupan en 4 categorías considerando comportamientos similares del terreno para cada agrupación (tabla 5, capítulo VIII).³

2.1 Etapas de la investigación

El primer paso fue el establecer una escala de trabajo para generar la información de base necesaria para el estudio, como pudieran ser los diferentes mapas temáticos de pendientes, geología o usos de suelo entre otros, así como la escala en que se presentara el mapa de susceptibilidad final; para la presente investigación la escala de trabajo será de 1:10,000, tanto para los mapas temáticos e inventario de movimientos de ladera como para el mapa final de susceptibilidad a movimientos de ladera, cubriéndose como se indico anteriormente un área de 7 km² en los alrededores del campo geotérmico Zunil I.

La segunda etapa corresponde a la recopilación bibliográfica, específicamente de libros, tesis, estudios, artículos etc., enfocados o relacionados con el análisis de susceptibilidad a movimientos de ladera y con la geología regional y local del campo geotérmico Zunil I; además para el área de estudio se obtuvieron hojas cartográficas fotografías aéreas y ortofotos del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

La tercera etapa fue la elaboración del inventario de movimientos de ladera, este fue realizado a partir del estudio de fotografías aéreas y análisis de ortofotos en conjunto con el trabajo de campo, todo esto con el objetivo de identificar el máximo número posibles de movimientos en masa. Paralelamente con la anterior se realizo la cuarta fase que es el levantamiento geológico a semidetalle (escala 1:10000), que recopiló y

³Ibídem.

analizó información sobre las características litológicas y estructurales de los tipos de rocas presentes en la zona de estudio.

La quinta etapa y final la constituye la fase de gabinete, esta incluye: a) el estudio y síntesis de la recopilación bibliográfica; b) la elaboración de los mapas regionales y temáticos en base a la información recabada en las fases anteriores; c) el análisis de la información generada y elaboración del mapa de susceptibilidad y por último d) la elaboración del informe final.

2.2 Los factores condicionantes

Para cada metodología, los factores condicionantes que se tienen en cuenta son diferentes y dependen de la experiencia del profesional. También influye la cantidad y calidad de los datos de los que se pueda disponer. De manera general podría decirse que el factor más influyente en la generación de movimientos de ladera es la pendiente.

Seguidamente a la pendiente encontraríamos el tipo de litología y a partir de aquí no existen reglas claras de los factores condicionantes que se deben utilizar, aunque normalmente el uso del suelo también tiene cierta influencia; para la presente investigación se consideró la alteración hidrotermal de las rocas como un factor importante en la ocurrencia de movimientos en masa en la zona. Sin embargo cabe decir que cuanto más abundante y precisa sea la información que se tenga, más afinado será el estudio.

Para la presente investigación los factores condicionantes contemplados para la generación del mapa de susceptibilidad, son los siguientes: pendiente del terreno, litología, orientación de laderas, geomorfología, alteración hidrotermal y uso del suelo. Una vez definidos estos factores condicionantes se procede a clasificar cada uno en cuatro categorías según su influencia en la predisposición del terreno a la

ocurrencia de movimientos de ladera; estos factores condicionantes así como su categorización y explicación, se incluyen en la tabla 5 del capítulo VIII.

2.3 Generación del mapa de susceptibilidad

Una vez realizados los mapas temáticos y habiendo ubicado los puntos del inventario de movimientos de ladera sobre cada uno de los mapas de factores condicionantes, se observa una distribución espacial de los mismos y de esa manera se puede realizar un análisis estadístico de la información.

Dicho análisis consistió en determinar qué cantidad de movimientos se han producido dentro de cada una de las categorías de los factores desencadenantes. Es decir, qué porcentaje de movimientos en masa está relacionado con las categorías descritas.

Este análisis estará relacionado con el área ocupada por cada categoría, ponderando de esta manera el número de los movimientos por el área ocupada del rango sobre la que se encuentran. Así se asignó un valor diferente según el porcentaje sea menor o mayor respectivamente.⁴; este valor constituye el resultado final de la matriz de susceptibilidad y se designó como valor Pr, la matriz de susceptibilidad así como la forma en que se obtiene se presenta en el capítulo IX Susceptibilidad a movimientos de ladera.

Una vez completa la tabla, se reclasificó los mapas base de los factores condicionantes que se habían agrupado en cuatro rangos y les implementamos los nuevos valores generados por la matriz de susceptibilidad (valor Pr de la tabla 6 del capítulo IX).

⁴CARLES FERNÁNDEZ LAVADO. Programa IPGARAMSS (2008). *Manual metodológico para la evaluación de movimientos de ladera en el AMSS (El Salvador, CA)*. Ibíd., p.12

Ahora estos mapas pueden sumarse utilizando una serie de opciones centradas en la diferente importancia de cada uno de los factores condicionantes. De esta manera se trabaja con 4 diferentes hipótesis (tabla 7 capítulo IX) en las que el coeficiente de peso porcentual de cada factor varía; estos coeficientes de peso fueron tomados en base a la experiencia propia y a criterios utilizados por especialistas en investigaciones del mismo tipo que la presente.

El resultado es 4 diferentes mapas de susceptibilidad donde posteriormente se verá, con la distribución de los puntos de movimientos de ladera, cual es el mapa más adecuado y que mejor se adapte a la realidad; eligiendo este como válido para el escenario propuesto.⁵

2.4 Cronograma de actividades

Las actividades según se presentó en el apartado 2.1, se han agrupado en cinco fases, estas fases se han realizado a lo largo de 1 año y 9 meses que corresponden a la duración total de la investigación; en el Anexo 1 se presenta el cronograma general de actividades, estableciendo las fechas tentativas en las que se realizarán las actividades.

⁵ Ibíd., p.13

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se definen los conceptos en los que se centra la presente investigación, iniciando con el tema: reducción del riesgo de desastres, en este apartado se analiza la interrelación entre actividad humana y procesos geodinámicos y además se presentan las definiciones de los términos relacionados a este tema; en el siguiente subcapítulo se presenta una clasificación de movimientos de ladera así como sus principales elementos morfológicos y morfométricos; finalmente en este capítulo se define lo que son los mapas de susceptibilidad a movimientos de ladera y se comparan con otro tipo de mapas orientados a prevenir y mitigar el riesgo a desastres.

3.1 Reducción del riesgo de desastres

Los fenómenos naturales a lo largo de la historia de la humanidad han ocasionado daños y pérdidas tanto materiales como de vidas humanas, poniendo en peligro en algunas ocasiones incluso la supervivencia de la especie, cuando eventos catastróficos han aniquilando poblaciones enteras; actualmente debido al gran esparcimiento de la población humana sobre la tierra han aumentado considerablemente las posibilidades de que los fenómenos naturales afecten de manera directa e indirecta a más personas.

Dentro de estos fenómenos naturales que representan un riesgo potencial para el desarrollo de la vida de los humanos, se tienen entre los más espectaculares y que mayores daños pueden causar a los terremotos, las erupciones volcánicas, las inundaciones e incluso la caída de meteoritos;

los movimientos de ladera por su parte aunque no constituyen un fenómeno de gran espectacularidad y magnitud y provocan víctimas mortales en algunos casos aislados y asociados a eventos mayores, si representan a largo plazo un alto costo material debido a las pérdidas de viviendas, cultivos, infraestructuras, etc.

Los movimientos de ladera son consecuencia del carácter dinámico de la tierra y de la evolución natural del relieve, aunque también pueden ser provocados o desencadenados por el hombre al interferir con la naturaleza y modificar sus condiciones;⁶ estos movimientos en masa se encuentran dentro de la clasificación de procesos geodinámicos externos según la tabla 2.

TABLA 2
PROCESOS GEOLÓGICOS Y METEOROLÓGICOS QUE
PUEDEN CAUSAR RIESGO

Procesos geodinámicos externos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Deslizamientos y desprendimientos. ➤ Hundimientos y subsidencias. ➤ Erosión. ➤ Expansividad y colapsabilidad de suelos.
Procesos geodinámicos internos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Terremotos y tsunamis. ➤ Vulcanismo. ➤ Diapirismo.
Procesos meteorológicos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Lluvias torrenciales y precipitaciones intensas. ➤ Inundaciones y avenidas. ➤ Procesos de arroyada. ➤ Huracanes. ➤ Tornados

Fuente: Modificado de Luis González et. al., *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación. 2002., p. 608

Debido a la interacción entre las actividades humanas y el medio geológico, se deben evaluar los posibles escenarios debidos a procesos

⁶ LUIS I. GONZÁLEZ DE VALLEJO, MERCEDES FERRER, LUIS ORTUÑO, CARLOS OTEO. *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación. 2002., p. 608

geodinámicos, a los que se encuentra expuesta una determinada población, infraestructura o bien material y prever y mitigar los daños ocasionados por tales fenómenos.

Con respecto a lo anterior Luis González et. al.,⁷ menciona que: “*Los problemas derivados de la doble interacción entre el medio geológico y las actividades humanas hacen necesario el planteamiento de actuaciones adecuadas para conseguir un equilibrio entre las condiciones naturales y la ocupación del territorio, incorporando los métodos de prevención y mitigación de los riesgos geológicos a la planificación.*” El pretender encontrar un equilibrio entre procesos geodinámicos y ocupación del territorio de forma planificada, muestra como los métodos de prevención y mitigación para la mayoría de estos procesos van orientados hacia un ordenamiento territorial, así como la realización de obras ingenieriles.

Debido a la importancia y preocupación a nivel mundial por prevenir y/o mitigar los daños ocasionados por procesos geodinámicos se ha creado la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (UNISDR por sus siglas en inglés), la cual tiene como propósito promover un entendimiento y la utilización en común de conceptos relativos a la reducción del riesgo de desastres, al igual que prestar asistencia a los esfuerzos dirigidos a la reducción del riesgo de desastres por parte de las autoridades, los expertos y el público en general.⁸

Según el Gobierno de Guatemala: La Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres, de las Naciones Unidas, tiene a Guatemala como uno de los países más vulnerables del mundo por efectos del cambio

⁷Ibídem.

⁸ESTRATEGIA INTERNACIONAL PARA LA REDUCCIÓN DE DESASTRES DE LAS NACIONES UNIDAS. *Terminología sobre reducción del riesgo de desastres*. UNISDR. Ginebra, Suiza, mayo del 2009. p.1

climático, dada su condición geográfica. Dentro de éstas se encuentran: la confluencia de tres placas tectónicas continentales, cadena de treinta y tres volcanes de los cuales cuatro mantienen actividad constante, hidrológicamente con tres grandes vertientes, Pacífico, Atlántico y Golfo de México; con treinta y ocho ríos; susceptibilidad ante inundaciones y deslizamientos, incendios forestales, entre otros.⁹

Según la metodología de evaluación de desastres desarrollada por la CEPAL, solo la depresión tropical 12- E de octubre de 2011, la cual afectó seriamente la infraestructura del campo geotérmico Zunil I (como se presento en los antecedentes), se estimó que ocasionó daños y pérdidas por más de 2697.08 millones de quetzales (equivalentes a 343.14 millones de dólares). Lo que representa el 0,4% del Producto Interno Bruto del país esperado para el año 2011. El 24,90% corresponde a daños (643.66 millones de quetzales) y el resto, 75,10% (2053.42 millones de quetzales), a pérdidas ocasionados por las lluvias torrenciales.¹⁰

Como parte de sus funciones la UNISDR ha elaborado una terminología sobre conceptos relacionados a la reducción del riesgo de desastres; en los apartados siguientes se desarrollan algunos aspectos relacionados con la evaluación y prevención de los riesgos geológicos, las definiciones de los términos que se presentan en esta investigación se basan en la terminología sobre reducción del riesgo de desastres de la UNISDR, aunque también se consultaron otros autores.

⁹GOBIERNO DE GUATEMALA CON EL APOYO DE LA MISIÓN INTERAGENCIAL DE CEPAL Y BANCO MUNDIAL. *Evaluación de daños y pérdidas sectoriales ocasionados por la Depresión Tropical 12- E noviembre de 2011*. Disponible en la Web en: http://www.conred.gob.gt/documentos/secretaria-ejecutiva/CEPAL%20-%20Evaluacion_Danos_y_Perdidas%20-DT12E.pdf. p. 2. Consultado el: 07/05/2013.

¹⁰Ibíd., p. 9.

3.1.1 Amenaza

La amenaza se define en la terminología del UNISDR como: Un fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosa, caracterizado por una probabilidad de recurrencia y magnitud de manifestación determinada, que pueden ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales¹¹.

Está es una definición bastante general que agrupa una gran cantidad de fenómenos que representan una condición peligrosa para los humanos, dentro de estos podemos mencionar por citar algunos ejemplos, los siguientes: fenómeno de origen orgánico (amenaza biológica), fenómeno geológico (amenaza geológica), fenómeno atmosférico (amenaza hidrometeorológica), amenaza natural, etc. También se usa el término peligrosidad (*hazard* en inglés) como sinónimo.

3.1.2 Desastre

Para el UNISDR se usa el término desastre para una seria interrupción en el funcionamiento de una comunidad o sociedad que ocasiona una gran cantidad de muertes al igual que pérdidas e impactos materiales, económicos y ambientales que exceden la capacidad de la comunidad o la sociedad afectada para hacer frente a la situación mediante el uso de sus propios recursos¹².

¹¹ ESTRATEGIA INTERNACIONAL PARA LA REDUCCIÓN DE DESASTRES DE LAS NACIONES UNIDAS. *Terminología sobre reducción del riesgo de desastres*. *Ibíd.*, p. 5.

¹² *Ibíd.*, p. 13 y 14.

3.1.3 Exposición

El termino exposición está relacionado directamente con la vulnerabilidad y se define como la ubicación sobre el terreno de los elementos y determina la condición de un elemento a ser afectado por la amenaza. Si un elemento esta fuera del alcance de la amenaza, la exposición de éste y en consecuencia el riesgo, será nulo a dicha amenaza.¹³

3.1.4 Factores condicionantes

Los factores condicionantes son aquellos intrínsecos del sistema, que caracterizan de una manera propia el área sobre los que una amenaza puede actuar. Estos son los que en mayor medida determinaran la evolución de un cierto fenómeno que vaya a suceder sobre el terreno.¹⁴

3.1.5 Factores desencadenantes

Los factores desencadenantes son aquellos parámetros externos al sistema, que producen la generación del fenómeno. Estos factores actúan como detonante de la amenaza. En el caso de los movimientos de ladera se consideran los sismos y las lluvias como principales detonadores.¹⁵

¹³ Ibídem.

¹⁴ Ibídem.

¹⁵ Ibídem.

3.1.6 Mitigación

La mitigación consiste en moderar o disminuir las pérdidas y daños mediante el control del fenómeno y/o la protección de los elementos expuestos, reduciendo su vulnerabilidad.¹⁶

3.1.7 Peligrosidad

La peligrosidad hace referencia a la frecuencia de ocurrencia de un proceso y al lugar. Se define como la probabilidad de ocurrencia de un proceso de un nivel de intensidad o severidad determinado, dentro de un periodo de tiempo dado y dentro de un área específica.

Para poder evaluar la peligrosidad además de contar con un inventario de los procesos pasados, se necesita conocer la intensidad y magnitud que tuvieron, las zonas en las que pueden ocurrir procesos futuros y su frecuencia de ocurrencia; lo que lo hace un parámetro de riesgo bastante difícil de evaluar. La frecuencia de ocurrencia solo puede ser estimada si se conocen los periodos de retorno del proceso, o de los factores que lo desencadenan y la magnitud solo puede presumirse en base a datos y series históricas.¹⁷

3.1.8 Riesgo

La Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres¹⁸ define el riesgo como: “*La combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas*”.

¹⁶LUIS I. GONZÁLEZ DE VALLEJO, MERCEDES FERRER, LUIS ORTUÑO, CARLOS OTEO. *Ingeniería Geológica*. Ibíd., p. 615.

¹⁷ Ibíd., p. 609.

¹⁸ ESTRATEGIA INTERNACIONAL PARA LA REDUCCIÓN DE DESASTRES DE LAS NACIONES UNIDAS. *Terminología sobre reducción del riesgo de desastres*. Ibíd., p. 29

La definición de Carles Fernández es más completa que la anterior, para él riesgo es la probabilidad de que la amenaza produzca daños en un lugar concreto y durante un período de tiempo definido. Como se puede observar en la definición, el riesgo puede ser expresado como la relación:

$$R = A \times V$$

Donde R es el riesgo; A es la amenaza Y V es la vulnerabilidad (incluye exposición)

Otros autores consideran la exposición (E) una componente más en la relación, generando así que:

$$R = A \times V \times E$$

Donde E es la exposición.¹⁹

3.1.9 Susceptibilidad

En relación a la susceptibilidad Luis González et. al.,²⁰ nos presenta la siguiente definición: *“La susceptibilidad puede definirse como la posibilidad de que una zona quede afectada por un determinado proceso, expresada en diversos grados cualitativos y relativos. Depende de los factores que controlan o condicionan la ocurrencia de los procesos, que pueden ser intrínsecos a los propios materiales geológicos o externos.”*

Para la amenaza que nos ocupa, que son los movimientos de ladera, la susceptibilidad es la facilidad o propensión de determinadas zonas a generar movimientos en masa o a ser afectadas dependiendo

¹⁹ CARLES FERNÁNDEZ LAVADO. Programa IPGARAMSS (2008). *Manual metodológico para la evaluación de movimientos de ladera en el AMSS (El Salvador, CA)*. Ibíd., p.9

²⁰LUIS I. GONZÁLEZ DE VALLEJO, MERCEDES FERRER, LUIS ORTUÑO, CARLOS OTEO. *Ingeniería Geológica*. Ibíd., p. 617.

si estamos caracterizando la susceptibilidad a la rotura o al alcance. En el concepto de susceptibilidad, al contrario que en el de amenaza, no se tienen en cuenta la frecuencia ni la magnitud del evento.²¹

3.1.10 Vulnerabilidad

La vulnerabilidad es el conjunto de características y circunstancias de una comunidad, sistema o bien que los hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza.²² En este concepto podemos observar la dificultad de cuantificar la vulnerabilidad de determinada zona geográfica, debido a la gran cantidad de variables involucradas, que serían naturales, sociales, económicas, densidad poblacional, por citar algunas.

Otra definición tomada de Luis González et. al.,²³ define la vulnerabilidad como: “...*el grado de daños o pérdidas potenciales en un elemento o conjunto de elementos como consecuencia de la ocurrencia de un fenómeno de intensidad determinada.*” La vulnerabilidad va a depender de las características del elemento en cuestión y la intensidad del fenómeno, suele evaluarse entre 0 = sin daño y 1 = pérdida o destrucción total del elemento.

Con respecto a este término aplicado a los movimientos en masa, Carles Fernández²⁴ puntualiza que: “*Es el grado de daños que las personas u objetos pueden sufrir al manifestarse un movimiento en masa. Es un valor muy difícil de obtener ya que intervienen multitud de*

²¹CARLES FERNÁNDEZ LAVADO. Programa IPGARAMSS (2008). *Manual metodológico para la evaluación de movimientos de ladera en el AMSS (El Salvador, CA)*. Ibíd., p.9.

²² Ibíd., p. 34 y 35.

²³ Ibídem.

²⁴ Ibíd., p.9.

variables, desde económicas, hasta sociales y políticas. Como es inviable la obtención de todas y cada una de las variables que influyen la vulnerabilidad, autores como Handmer y Grunfest (2001) proponen basarse en los parámetros de edad, género, estatus económico y densidad de población”.

La vulnerabilidad es un factor propio del elemento expuesto a ser susceptible y sufrir un daño del cual puede encontrar dificultades en recuperarse posteriormente.

3.2 Movimientos de ladera

Los procesos geológicos y climáticos que afectan a la superficie terrestre crean el relieve y definen la morfología de las laderas, que va modificándose a lo largo del tiempo para adaptarse a nuevas condiciones geológicas o climáticas. Por lo general, las laderas adoptan pendientes naturales cercanas al equilibrio; ante el cambio de condiciones su morfología se modifica buscando de nuevo el equilibrio. En este contexto, los movimientos de ladera pueden entenderse como los reajustes del terreno para conseguir el equilibrio ante un cambio de condiciones.²⁵

Los movimientos de ladera son movimientos de masa o material que puede ser roca, suelo natural o relleno, a favor de la gravedad, asociados a pendientes y a la presencia de agua. Se incluye cualquier tipo de movimiento en masa, excepto la subsidencia y el hundimiento kárstico.²⁶ Los movimientos de ladera engloban, en general, a los procesos gravitacionales que tienen lugar en las laderas.

²⁵LUIS I. GONZÁLEZ DE VALLEJO, MERCEDES FERRER, LUIS ORTUÑO, CARLOS OTEO. *Ingeniería Geológica*. Ibíd., p. 622.

²⁶ ANALISIS DE LA SUCEPTIBILIDAD A LOS MOVIMIENTOS DE LADERA MEDIANTE UN SIG EN LA CUENCA VERTIENTE AL EMBALSE DE RULES GRANADA.: *Movimientos de ladera*. Archivo en formato PDF. Disponible en la web en : http://www.ugr.es/~ren03366/DEA/TEMAS/memoria/3_MOVIMIENTOS.pdf. Consultado el 20 de octubre de 2012., s/f. p.15.

Como su nombre lo indica estos movimientos ocurren en taludes o laderas; Jaime Suárez²⁷ los define de la siguiente manera: *“Un talud o ladera es una masa de tierra que no es plana sino que posee pendiente o cambios de altura significativos. En la literatura técnica se define como ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y talud cuando se conformo artificialmente.”*

Cuando ocurre la falla de una ladera o talud, se produce un movimiento hacia abajo y hacia afuera de los materiales que conforman el talud. Estos movimientos ocurren generalmente a lo largo de superficies de falla por caída libre, movimientos de masa, erosión o flujos.

Los movimientos de masas en los taludes pueden ocurrir de forma imprevista debido principalmente a los siguientes factores: la acción de la gravedad, cambios topográficos, flujos de agua subterránea, sismicidad, cambios en la resistencia del suelo, meteorización así como factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad;²⁸ dichos factores hacen que los movimientos de ladera sean relativamente habituales en el medio geológico.

Estos procesos llegan a constituir riesgos geológicos potenciales, ya que pueden causar daños económicos y sociales al afectar las actividades e infraestructura humana. Evitar estos efectos nocivos es el objetivo final de la investigación de los movimientos en masa, de sus características, tipos y mecanismos de inestabilidad, de los factores que los controlan y sus causas.

²⁷JAIME SUÁREZ DÍAZ.: *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander., 2001., p.1.

²⁸Ibíd., p.2.

3.2.1 Clasificación de los movimientos de ladera

Al igual que con otros fenómenos naturales, la clasificación de los movimientos de ladera se realiza en función o depende de los criterios utilizados para su diferenciación. Quizá la clasificación más utilizada se basa fundamentalmente en el mecanismo de rotura y propagación del movimiento, utilizando básicamente criterios morfológicos.

Según Jaime Suárez esta clasificación fue propuesta originalmente por Varnes en 1978.²⁹ Esta clasificación se presenta a continuación:

a) Deslizamientos

Los deslizamientos pueden definirse como un tipo de movimiento de ladera, en el que el desplazamiento del terreno se produce sobre una o varias superficies de rotura bien definidas. La masa generalmente se desplaza en conjunto, comportándose como una unidad, prácticamente sin deformación interna, en su recorrido. La velocidad suele ser variable e implican a volúmenes grandes en general, aunque no siempre.³⁰

Los deslizamientos a su vez se pueden dividir en dos subtipos, principalmente en función de la geometría de la superficie de falla, estos dos subtipos son:

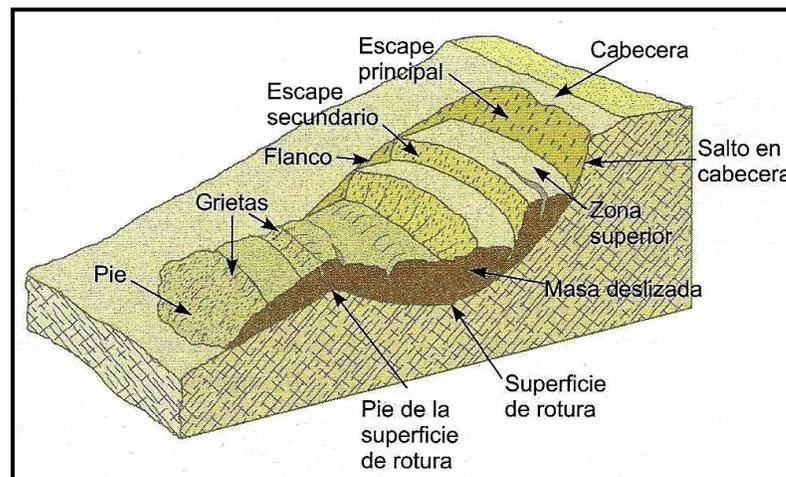
1. Deslizamiento rotacional: En un deslizamiento rotacional la superficie de falla es formada por una curva cuyo

²⁹Ibíd., p.11

³⁰ANÁLISIS DE LA SUCEPTIBILIDAD A LOS MOVIMIENTOS DE LADERA MEDIANTE UN SIG EN LA CUENCA VERTIENTE AL EMBALSE DE RULES GRANADA.: *Movimientos de ladera*. Ibíd., p.16

centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo del movimiento, es decir la superficie de ruptura es una superficie cóncava en forma de “cuchara”. Los deslizamientos rotacionales se producen fundamentalmente en materiales homogéneos o en macizos rocosos muy fracturados³¹ (ver figura 1). Los deslizamientos rotacionales pueden ser: simples, múltiples y sucesivos según se observa en la figura 2.

FIGURA 1
ESQUEMA DE UN DESLIZAMIENTO ROTACIONAL Y PARTES DEL MISMO



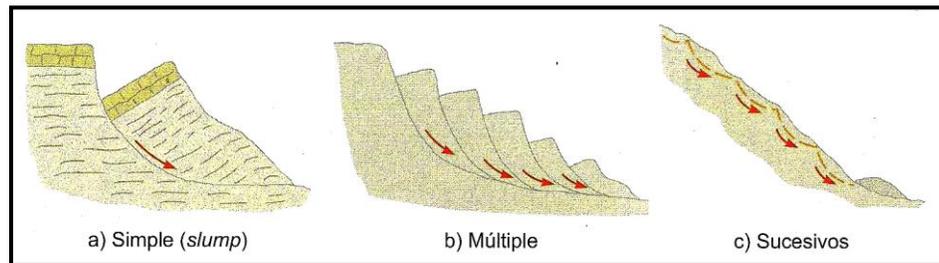
FUENTE: Tomado de Luis González et. al., *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación. 2002., p. 625.

2. Deslizamiento de traslación: En el deslizamiento de traslación el movimiento de la masa se desplaza hacia afuera o hacia abajo, a lo largo de una superficie más o menos plana con un ángulo de inclinación más o menos constante y tiene muy poco o nada de movimiento de rotación o volteo. los deslizamientos traslacionales suelen producirse sobre materiales heterogéneos

³¹JAIME SUÁREZ DÍAZ.: *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*.
Ibíd., p.16

con superficies de discontinuidad bien definidas. No suelen ser muy profundos, aunque sí muy extensos y alcanzar grandes distancias.

FIGURA 2 TIPOS DE DESLIZAMIENTOS ROTACIONALES



FUENTE: Tomado de Luis González et. al., *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación. 2002., p. 625.

b) Flujos

El término flujo sirve para agrupar a diferentes movimientos de ladera que tienen en común la deformación interna y continua del material y la ausencia de una superficie neta de desplazamiento. En un flujo existen movimientos relativos de las partículas o bloques pequeños dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla.³²

Luis González et. al.,³³ definen los flujos o coladas como: *“...movimientos de masas de suelo (flujos de barro o tierra), derrubios (coladas de derrubios o debris flow) o bloques rocosos (coladas de fragmentos rocosos) con abundante presencia de agua, donde el material está disgregado y se comporta como un*

³² ANALISIS DE LA SUCEPTIBILIDAD A LOS MOVIMIENTOS DE LADERA MEDIANTE UN SIG EN LA CUENCA VERTIENTE AL EMBALSE DE RULES GRANADA.: *Movimientos de ladera*. Ibíd., p.16

³³LUIS I. GONZÁLEZ DE VALLEJO, MERCEDES FERRER, LUIS ORTUÑO, CARLOS OTEO. *Ingeniería Geológica*. Ibíd., p. 626.

fluido, sufriendo una deformación continua, sin presentar superficies de rotura definidas.” En este tipo de fenómenos el agua es el principal agente desencadenante.

De una manera simplificada los flujos han sido divididos en flujo en roca y flujo de residuos, aunque existen otras clasificaciones como la que se presenta en la figura 3.

c) Desprendimientos

Corresponde al rápido movimiento de una masa de cualquier tamaño de roca o de suelo en forma de bloques aislados o material masivo. En los caídos una masa se desprende de un talud de pendiente muy inclinada, a lo largo de una superficie, en la cual ocurre ningún o muy poco desplazamiento de corte y desciende principalmente a través del aire por caída libre a saltos o rodando³⁴ (figura 4).

d) Inclinación o volteo

Este tipo de movimiento consiste en una rotación hacia delante de una unidad o unidades de material terreo con centro de giro por debajo del centro de gravedad de la unidad y generalmente, ocurren en las formaciones rocosas.³⁵

e) Reptación

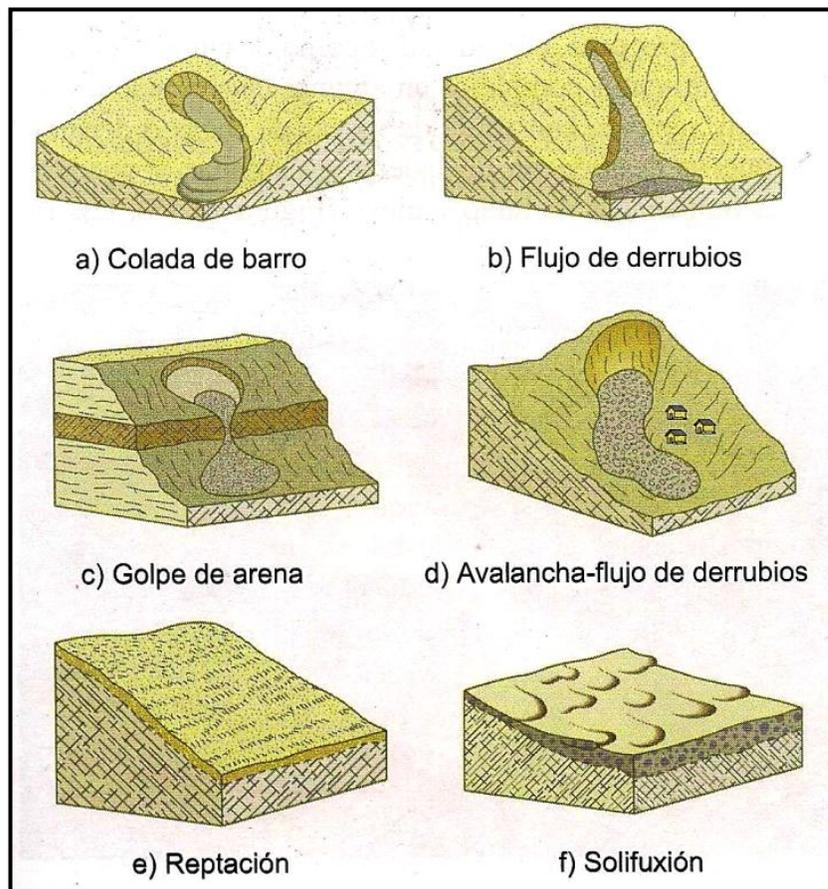
La reptación consiste en movimientos muy lentos, extremadamente lentos del suelo sub-superficial sin una superficie de falla definida. Generalmente, el movimiento es de unos pocos centímetros al año y afecta a grandes superficies de terreno. La

³⁴ JAIME SUÁREZ DÍAZ.: *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Ibíd., p.12

³⁵ Ibíd., p.13

reptación puede preceder a movimientos más rápidos como los flujos o deslizamientos.³⁶

FIGURA 3
TIPOS DE FLUJO



Fuente: Tomado de Luis González et. al., *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación. 2002., p. 627.

f) Lahares

Los Lahares son flujos de barro originados en las pendientes de los volcanes cuando capas inestables de cenizas y

³⁶ *Ibíd.*, p.16

derrubios se saturan de agua y fluyen pendiente abajo siguiendo los cursos de los ríos.³⁷

Esto fenómenos se producen principalmente como consecuencia de las lluvias que suceden a una erupción volcánicas, o por un aumento inesperado en la precipitación pluvial como consecuencia de algún fenómeno atmosférico.

3.2.2 Elementos morfológicos y morfométricos de un deslizamiento

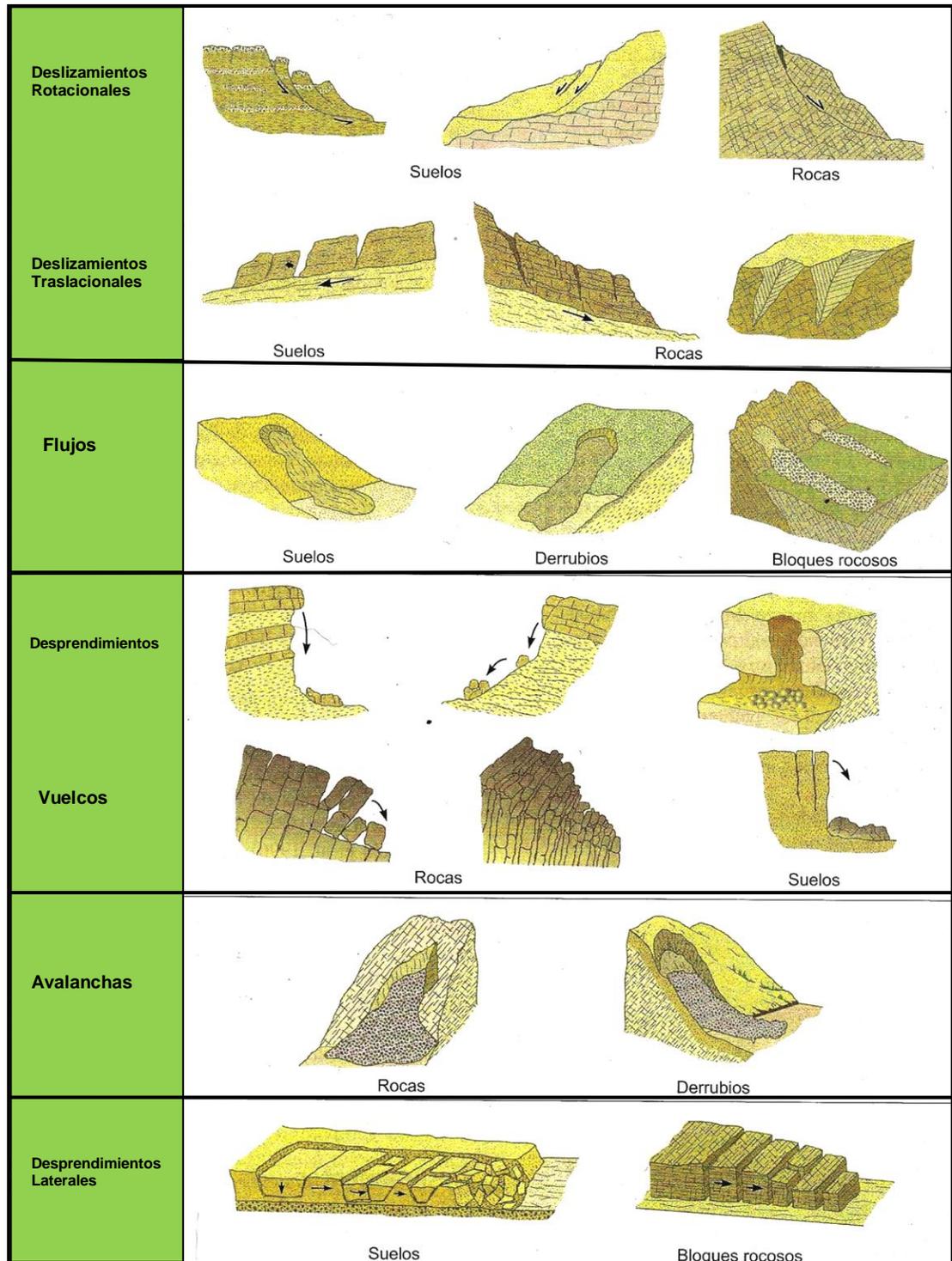
La nomenclatura de los elementos morfológicos y morfométricos de un movimiento de ladera idealizado (figura 5) ha sido desarrollada por la Asociación Internacional de Geología Aplicada a la Ingeniería (IAEG), en 1990. A continuación se presenta una breve descripción de los principales elementos tanto morfológicos como morfométricos.

a) Morfológicos

1. Cabecera: Las partes superiores del material que se mueve a lo largo del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
2. Escarpe principal: Corresponde a una superficie muy inclinada a lo largo de la periferia del área en movimiento, causado por el desplazamiento del material fuera del terreno original.
3. Cima: El punto más alto del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.

³⁷ ENCICLOPEDIA LIBRE UNIVERSAL EN ESPAÑOL. *Lahar*. Disponible en la web en: <http://vcd.crid.or.cr/vcd/index.php/LAHARES>. Consultado el 20 de octubre de 2009. 2006., s/n

FIGURA 4
CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS MOVIMIENTOS DE LADERA



FUENTE: Tomado de Luis González et. al., *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación. 2002., p. 624.

4. Flancos: Lados (perfil lateral) del movimiento.

5. Pie de la superficie de ruptura: La línea de intersección entre la base inferior de la superficie de ruptura y la superficie original del terreno.

6. Escarpe secundario: Una superficie muy inclinada producida por desplazamientos diferenciales dentro de la masa que se mueve.

7. Superficie de ruptura: Corresponde al área debajo del movimiento que limita el volumen de material desplazado. El volumen de suelo debajo de la superficie de falla no se mueve.

8. Superficie original de la ladera: Las superficie que existía antes de que se presentara el movimiento.³⁸

b) Morfométricos

1. Anchura máxima: Ancho máximo de la masa desplazada perpendicularmente a la longitud.

2. Longitud total: Distancia mínima desde la punta a la corona del deslizamiento.

3. Longitud de la masa desplazada: Distancia mínima entre la punta y la cabeza.

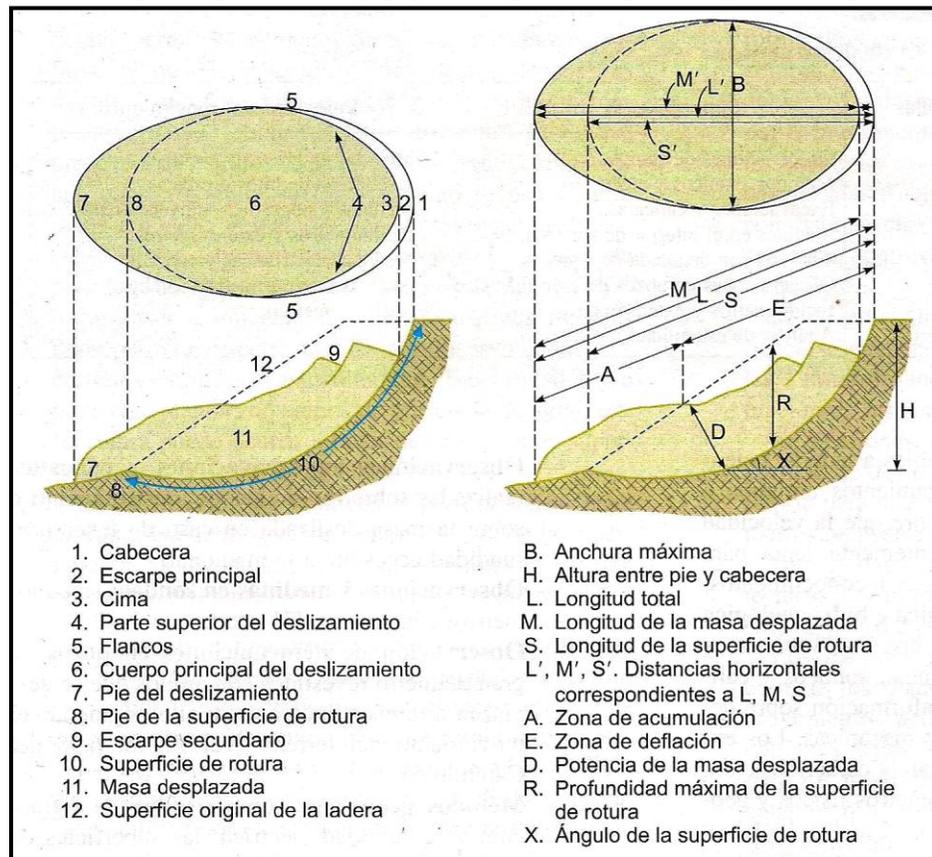
4. Longitud de la superficie de ruptura: Distancia mínima desde el pie de la superficie de falla y la corona.

³⁸ JAIME SUÁREZ DÍAZ.: *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*.
Ibíd., p.3.

5. Potencia de la masa desplazada: máxima profundidad de la masa movida perpendicular al plano conformado por el ancho de la masa desplazada y la longitud de la masa desplazada.

6. Profundidad de la superficie de ruptura: Máxima profundidad de la superficie de falla con respecto a la superficie original del terreno.³⁹

FIGURA 5
PRINCIPALES ELEMENTOS MORFOLÓGICOS Y MORFOMÉTRICOS DE UN DESLIZAMIENTO



Fuente: Tomado de Luis González et. al., *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación. 2002., p. 645.

³⁹ *Ibíd.*, p.4.

3.2.3 Causas de los movimientos de ladera

Se ha identificado que existen algunos factores que controlan la ocurrencia de los movimientos de ladera, estos son aquellos capaces de modificar las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno, como resultado la morfología de la ladera se modifica buscando de nuevo el equilibrio.

Estos factores han sido divididos en condicionantes y desencadenantes; los factores condicionantes dependen de la propia naturaleza, estructura y forma del terreno, mientras que los desencadenantes pueden ser considerados como factores externos que provocan o desencadenan las inestabilidades y son responsables, por lo general, de la magnitud y velocidad de los movimientos. En la Tabla 3 se indican sus efectos sobre el comportamiento y las propiedades de los materiales.

Dentro de los factores condicionantes, las propiedades físicas y resistentes de los materiales (directamente relacionadas con la litología como el tipo de roca, grado meteorización, textura, alteración hidrotermal, etc.) y las características morfológicas y geométricas de la ladera (relieve: pendiente, geomorfología) son fundamentales para la predisposición a la inestabilidad; otros factores importantes son la estructura geológica y discontinuidades, las condiciones hidrogeológicas y los estados tenso-deformacionales.

Con respecto a los factores desencadenantes los más importantes son las precipitaciones, los cambios en las condiciones hidrogeológicas de las laderas, la modificación de la geometría, la erosión y los terremotos; algunos de ellos, como los cambios de las

condiciones de agua y de geometría frecuentemente son consecuencia de acciones antrópicas.⁴⁰

La evolución o proceso de falla obedece a un proceso, el cual incluye las siguientes fases principales:

Como primera fase se puede considerar las condiciones originales del talud (la topografía, geología y características de los materiales, condiciones ambientales generales, cobertura vegetal, etc.), estas condiciones determinan una susceptibilidad al deterioro, a la acción de los factores detonantes y al fallamiento.

En segundo lugar se tiene el efecto sobre el talud de los factores de deterioro (modificación lenta de las condiciones originales), el resultado es una disminución en la resistencia al corte del material; entre estos se pueden mencionar: falla progresiva por expansión o fisuración, inclinación, desmoronamiento, descomposición por desecación, reducción de la cohesión, lavado y remoción de los cementantes, disolución, etc.

Lo anterior prepara el terreno para que los bajo la influencia de los factores desencadenantes se de la activación del movimiento. El resultado es un aumento en los esfuerzos de corte, estos esfuerzos aumentan a lo largo de la superficie de falla hasta que ocurre el movimiento; en el fenómeno de detonación actúan una serie compleja de procesos los cuales en ocasiones, se traslapan con los factores de deterioro, los procesos involucrados en el fenómeno de activación se clasifican en procesos geomorfológicos y físicos (procesos naturales) y procesos antrópicos (modificación del medio por el hombre).

⁴⁰LUIS I. GONZÁLEZ DE VALLEJO, MERCEDES FERRER, LUIS ORTUÑO, CARLOS OTEO. *Ingeniería Geológica*. Ibíd., p. 629.

TABLA 3
INFLUENCIA DE LOS DIFERENTES FACTORES EN LAS
CONDICIONES DE LOS MATERIALES Y DE LAS
LADERAS

Factores		Influencias y efectos
Condicionantes	Relieve (pendientes, geometría)	Distribución del peso del terreno
	Litología (composición, textura)	Densidad, resistencia. Comportamiento hidrogeológico
	Estructura geológica y estado tensional	Resistencia, deformabilidad. Comportamiento discontinuo y anisótropo. Zonas de debilidad
	Propiedades geomecánicas de los materiales	Comportamiento hidrogeológico. Generación de presiones intersticiales.
	Deforestación	Modificación en el balance hídrico. Erosión.
	Meteorización	Cambios físicos y químicos, erosión externa e interna, generación de zonas de debilidad.
Desencadenantes	Precipitaciones y aportes de agua	Variación de las presiones intersticiales y del peso del terreno.
	Cambios en las condiciones hidrológicas	Saturación en suelos. Erosión.
	Aplicación de cargas estáticas o dinámicas	Cambio en la distribución del peso de los materiales y en el estado tensional de la ladera. Incremento de presiones intersticiales.
	Cambios morfológicos y de geometría en las laderas	Variación de las fuerzas debidas al peso. Cambio en el estado tensional.
	Erosión o socavación del pie	Cambios geométricos en la ladera. Cambio en la distribución del peso de los materiales y en el estado tensional de la ladera.
	Acciones climáticas (procesos de deshielo, heladas, sequías)	Cambios en el contenido de agua del terreno. Generación de grietas y planos de debilidad. Disminución de las propiedades resistentes.

Fuente: Modificado de Luis González et. al., *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación. 2002., p. 630.

Finalmente el proceso de fallamiento, después de que interviene el factor desencadenante, es un fenómeno generalmente físico, en el cual las condiciones de esfuerzo y deformación juegan un papel preponderante. Las fallas en la mayoría de los casos no ocurren en forma repentina sino que toman un tiempo, el cual puede durar de minutos a años.

Las deformaciones que se producen por la actuación de los esfuerzos generan a su vez disminuciones en la resistencia. Al inicio del movimiento, es muy posible que estas deformaciones progresivas afecten volúmenes de talud, pero a medida que avanza el proceso de fallamiento las deformaciones principales se concentran en una superficie o banda de falla a lo largo de la cual se produce la rotura o falla del material.⁴¹

3.3 Mapa de susceptibilidad a movimientos de ladera

El mapa de susceptibilidad a movimientos de ladera constituye el producto final de la presente investigación, este mapa tiene por finalidad zonificar el área de estudio en cuatro rangos de susceptibilidad que son: Baja, Moderada, Alta y Muy alta. A continuación se presenta la conceptualización teórica de lo que es un mapa de susceptibilidad a movimientos de ladera.

Iniciaremos diciendo que para llevar a cabo un análisis de la susceptibilidad del terreno a presentar movimientos de ladera partiremos del principio del actualismo (Hutton, 1975), es decir que las condiciones que los

⁴¹JAIME SUÁREZ DÍAZ.: *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*.
Ibíd., p.30 al 33.

originaron en el pasado son las mismas que pueden provocar su aparición en el momento actual o en el futuro.⁴²

Es por esto que la realización de un análisis de susceptibilidad no solo se basa en el levantamiento del inventario de movimientos de ladera, sino que se corrobora a partir del mismo, ya que es donde empiezan a distinguirse las condiciones o factores preexistentes en el terreno que lo hacen susceptible para la ocurrencia de estos fenómenos en el presente, tal como lo han hecho anteriormente y lo harán en el futuro.

Los mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera expresan la mayor o menor probabilidad o posibilidad de que suceda un movimiento de ladera en una zona específica y en un futuro no determinado en función de la correlación de los factores condicionantes de la inestabilidad con la distribución de los movimientos en masa pasados.⁴³

Los mapas de susceptibilidad así definidos suponen pues un subconjunto dentro de los mapas de riesgo, en los cuales se evalúan las pérdidas materiales y humanas ocasionadas por la ocurrencia de un fenómeno determinado en un lugar y un tiempo determinados. El riesgo es un concepto que incluye probabilidad espacial y temporal en términos numéricos (peligrosidad), grado de afectación (vulnerabilidad) y unos elementos expuestos al riesgo según la terminología sobre reducción del riesgo de desastres (UNISDR).

⁴²MARÍA JOSÉ DOMÍNGUEZ CUESTA.: *Geomorfología e inestabilidad de laderas en la cuenca carbonífera central (Valle del Nalón, Asturias). Análisis de la susceptibilidad ligada a los movimientos superficiales del terreno*. Tesis Doctoral. Oviedo: Universidad de Oviedo, Biblioteca Universitaria, 2010 Colección Tesis Doctoral-TDR No.73., 2003., p.68

⁴³TOMÁS FERNÁNDEZ., CLEMENTE IRIGARAY., RACHID EL HAMDOUNI., JOSÉ CHACÓN.: *Diseño gráfico de un mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera*. VIII Congreso Nacional de Tipografía y Cartografía (TOPCART 2004). Madrid 19-22 de octubre 2004. p. 1.

Si solo se tiene en cuenta el grado de afectación de los elementos ante un fenómeno de riesgo potencial se habla de mapas de vulnerabilidad. Si solo se tiene en cuenta la probabilidad espacio-temporal se tiene los mapas de peligrosidad. La susceptibilidad es un término aún más restrictivo según la definición arriba expuesta ya que la definición de susceptibilidad no se expresa en términos cuantitativos y sobre todo incluye solo la probabilidad espacial (localización de zonas susceptibles) y no se habla nada de probabilidad temporal ni periodos de retorno, sino de un futuro indeterminado.⁴⁴

En base a lo anterior se concluye que los mapas de susceptibilidad a movimientos de ladera únicamente intentan predecir los lugares más probables a presentar movimientos en masa, sin hacer consideraciones o predicciones sobre cuándo ni con qué frecuencia ocurrirán estos fenómenos.

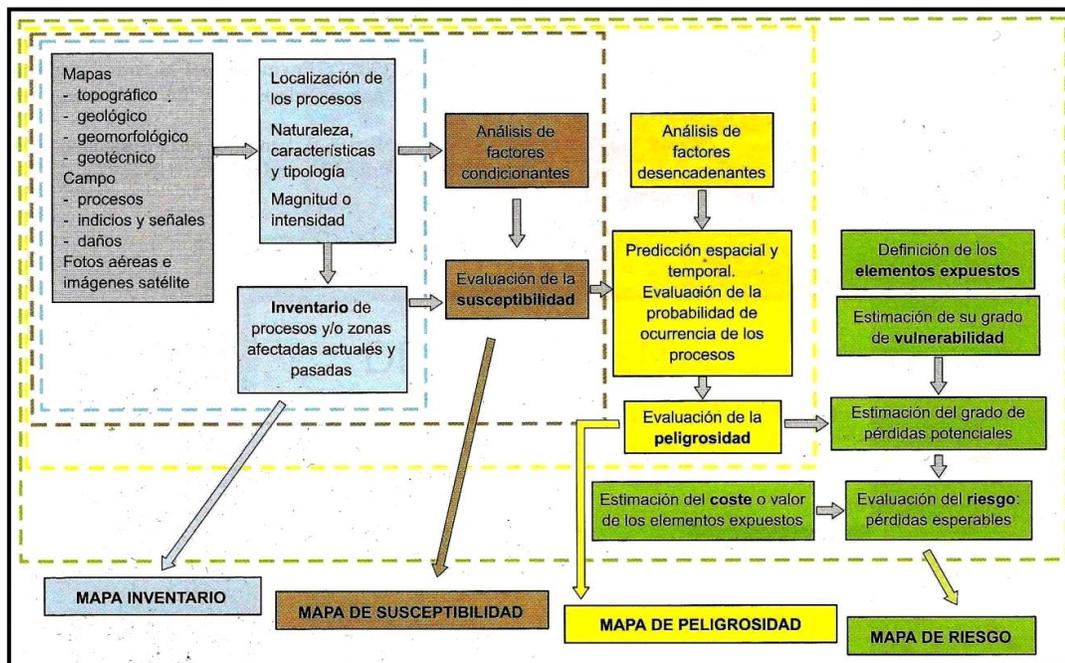
Los mapas de susceptibilidad constituyen hipótesis predictivas que tratan de determinar espacialmente el lugar susceptible de sufrir una rotura, ya que en función de los parámetros considerados se puede realizar una previsión espacial con un elevado grado de certeza. Sin embargo, estos modelos raramente se pronuncian acerca del desarrollo en el tiempo de los movimientos en masa porque lo más complicado es establecer relaciones entre deslizamientos y periodos de retorno o, dicho de otro modo, podemos establecer con un elevado grado de certeza el dónde pero no el cuándo.⁴⁵

La figura 6 muestra un esquema de la metodología para la realización de mapas de susceptibilidad, peligrosidad y riesgo, la presente investigación solo abarca hasta la obtención del mapa de susceptibilidad.

⁴⁴ *Ibíd.*

⁴⁵ MARÍA JOSÉ DOMÍNGUEZ CUESTA.: *Geomorfología e inestabilidad de laderas en la cuenca carbonífera central (Valle del Nalón, Asturias). Análisis de la susceptibilidad ligada a los movimientos superficiales del terreno*. Tesis Doctoral. *Ibíd.*, p.68

FIGURA 6 ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA PARA REALIZACIÓN DE LOS MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD, PELIGROSIDAD Y RIESGO



FUENTE: Tomado de Luis González et. al., *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación. 2002., p. 619.

La metodología predominante en la elaboración de mapas de susceptibilidad, es que estos resultan del análisis de correlación entre movimientos de ladera y factores que condicionan el terreno para la ocurrencia de los movimientos. En efecto de las distintas metodologías existentes para la obtención de los mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera, casi todas ellas se basan en una correlación más o menos explícita entre los factores condicionantes con los movimientos de ladera preexistentes en la zona de estudio.

Estos factores pueden ser numerosos y su identificación total prácticamente imposible, sin embargo este análisis de correlación entre factores condicionantes y movimientos en masa, permite la selección de los factores que tienen una mayor influencia sobre el terreno para la ocurrencia

de movimientos de ladera e incluso el peso que estos factores tendrán en la cartografía de susceptibilidad.

Con respecto a lo antes mencionado María Domínguez⁴⁶ expone: *“Existen numerosos factores que influyen en mayor o menor grado en el desencadenamiento de la inestabilidad, aunque es imposible controlar todos los que participan y en qué medida, se puede intentar realizar una aproximación mediante una simplificación de la realidad, sintetizando aquellos factores cuya presencia o ausencia sea más significativa, con todas las limitaciones que ello supone”*.

Una vez seleccionados los factores condicionantes existen distintos métodos para la elaboración de los mapas de susceptibilidad, entre estos están los probabilísticos: como los de análisis de distribución, de densidad y actividad de los movimientos, los análisis geomorfológicos y cualitativos, y, sobre todo los análisis estadísticos bivariantes y multivariantes; por aparte también existen métodos llamados deterministas.⁴⁷

La susceptibilidad es un concepto muy útil para el caso de los movimientos de ladera, además de relativamente fácil de establecer, si se toma en cuenta que la obtención de mapas de riesgo, vulnerabilidad e incluso de peligrosidad resulta difícil. Si se logra determinar las condiciones en que estos fenómenos se producen, se estará en disposición de predecir espacialmente su desencadenamiento, delimitar las áreas susceptibles y tomar medidas preventivas, de ahí la importancia de este tipo de mapas.

⁴⁶Ibíd.

⁴⁷TOMÁS FERNÁNDEZ., CLEMENTE IRIGARAY., RACHID EL HAMDOUNI., JOSÉ CHACÓN.: *Diseño gráfico de un mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera*. Ibíd., p.2

CAPÍTULO IV

GEOGRAFÍA FÍSICA

En este capítulo se presenta los principales rasgos que componen la geografía física en la región dentro de la cual se encuentra el área de estudio, además se incluye un resumen sobre el clima y la vegetación de la zona.

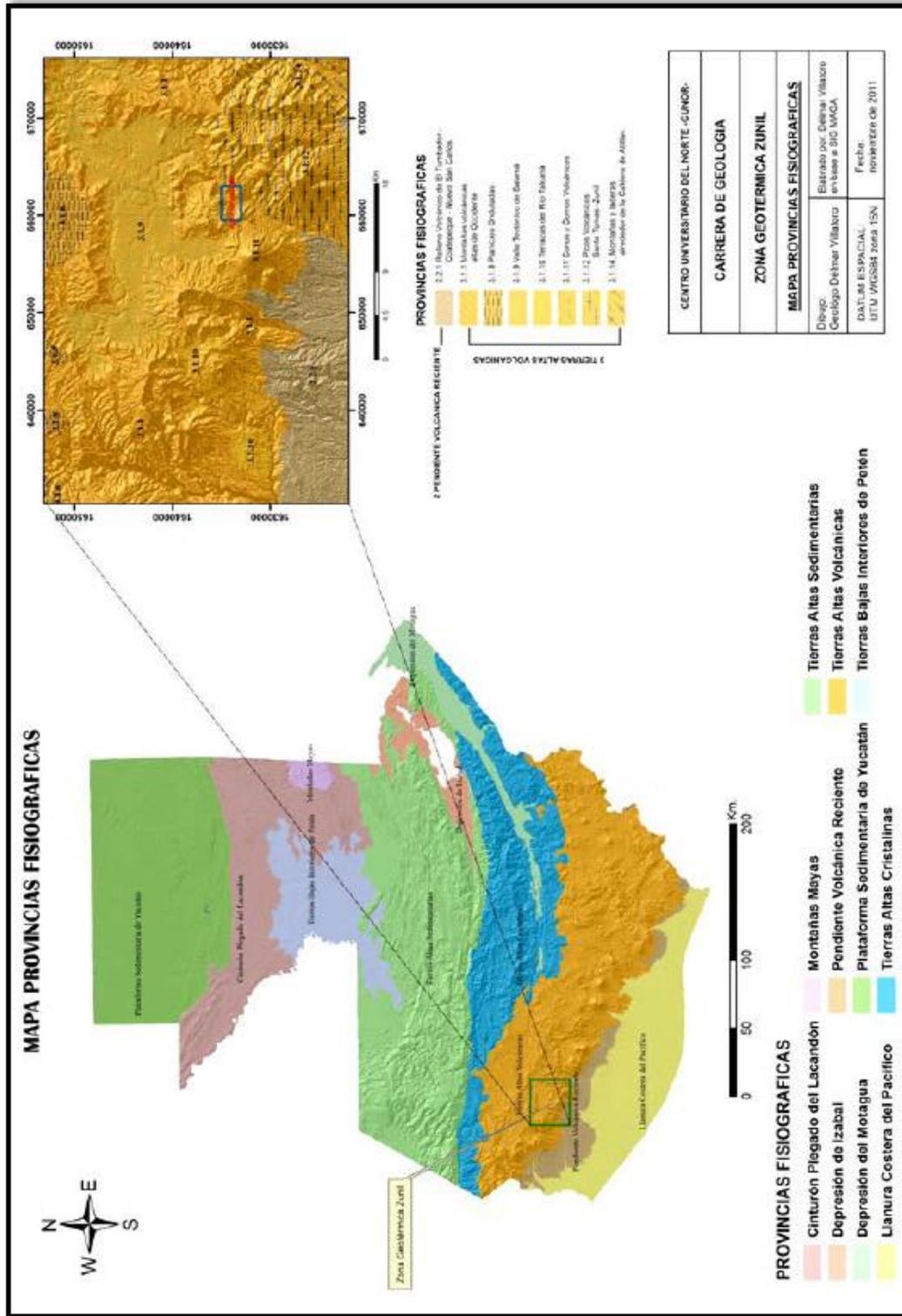
4.1 Fisiografía

La zona de estudio se encuentra comprendida dentro de la provincia fisiográfica de Guatemala tierras altas volcánicas esto se puede constatar en el mapa Fisiográfico que se presenta a continuación, el cual fue elaborado en base al Sistema de Información Geográfica del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (SIG MAGA).

4.1.1 Provincia fisiográfica de tierras altas volcánicas

La provincia de tierras altas volcánicas está compuesta principalmente por los productos remanentes del vulcanismo terciario el cual se desarrollo a partir de fallas tensionales las cuales dieron lugar a un vulcanismo de fractura. La provincia fisiográfica de tierras altas volcánicas se encuentra dividida en subprovincias fisiográficas, el área de investigación se encuentra dentro de la subprovincia fisiográfica de conos y domos volcánicos la cual se describe brevemente a continuación:

MAPA 3 MAPA DE PROVINCIAS FISIOGRAFICAS



a) Conos y domos volcánicos:

Conformada por material piroclástico (lapilli) y lavas de composición andesítica basáltica, coladas de lava de composición andesítica basáltica, estos son típicos conos compuestos cineríticos de erupciones de piroclásticos y coladas de lava intercaladas; presentan en promedio una pendiente de entre el 20-50%.

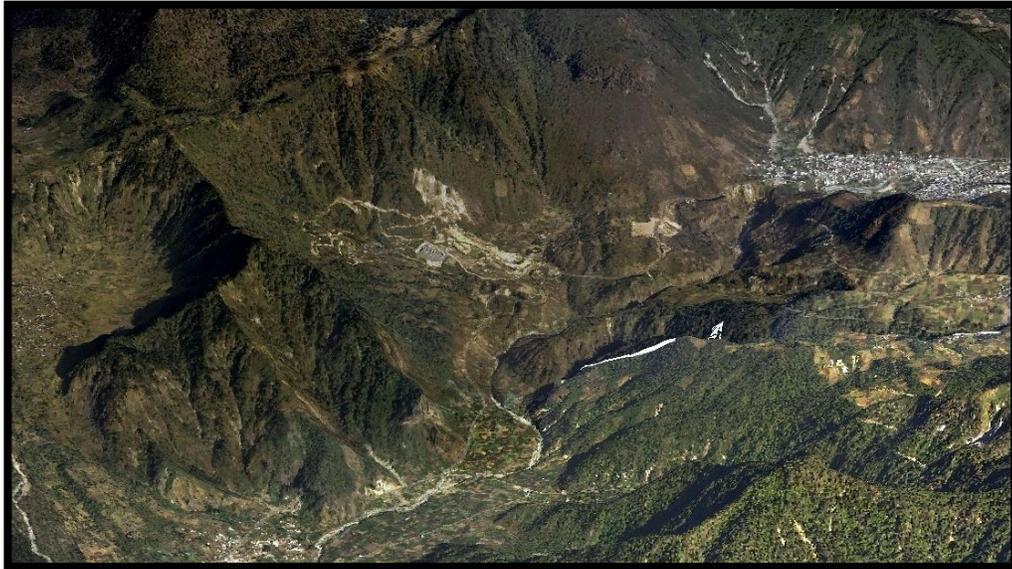
4.1.2 Relieve

El área cubierta por esta investigación presenta en general una topografía accidentada, con una diferencia de altura de 1000 metros, del punto más alto en el límite Nor-Oeste del área (2 880 msnm) al más bajo (1,860 msnm) en el límite Sur en las planicies de inundación del río Samalá; en la imagen 1 se presenta un modelo de elevación digital de la zona de investigación, en el que se pueden apreciar las formas del terreno.

Las pendientes más abruptas se presentan en los escarpes verticales del cañón de Zunil, donde se observaron algunas cataratas o saltos de agua (fotografías 5, 6 y 7).

El límite Noroeste del área lo conforman la ladera Sureste del complejo cóncavo del Cerro Quemado y la ladera sur del domo de Zunil, con pendientes de entre el 30 y el 50 % de inclinación, similar pendiente presenta la ladera Noreste del cerro el galápago, en el límite Suroeste del área de estudio (mapa de pendientes en el capítulo VII, mapas de los factores condicionantes).

IMAGEN 1
MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL DE LOS
ALREDEDORES DEL ÁREA DE ESTUDIO



Fuente: Investigación de campo; obtenido en *ArcGis v. 9.3*.

FOTOGRAFÍA 5
PANORÁMICA DEL CAÑÓN DE ZUNIL



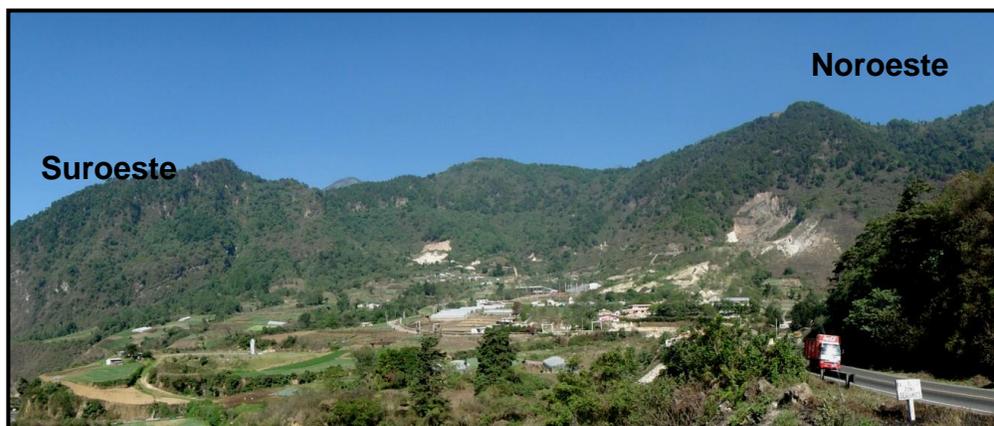
Tomada por: D elmar Villatoro, Año 2012.

FOTOGRAFÍAS 6 y 7
SALTOS DE AGUA EN LAS PAREDES ESCARPADAS
DEL CAÑÓN DE ZUNIL



Tomadas por: Délmar Villatoro, Año 2012.

FOTOGRAFÍA 8
LADERAS QUE LIMITAN DE NO A SO EL ÁREA DE
ESTUDIO



Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2012.

La fotografía 8 muestra parte de la ladera del complejo dómico Cerro Quemado y la ladera del Cerro El Galápago, que conforman el

límite NO-SO de área de estudio, como se mencionó anteriormente ambas laderas tienen pendientes similares.

En territorios donde antiguos relieves (paleorelieve) han sido rellenados por material piroclástico del tamaño de lapilli y ceniza, la topografía se muestra ondulada y con pendientes bastante suaves, esto se observa al noreste de la zona de investigación, estos lugares son utilizados para la siembra de hortalizas.

FOTOGRAFÍA 9 TOPOGRAFÍA EN ZONAS CUBIERTAS POR PIROCLASTOS



Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2012.

Las únicas zonas del área de estudio donde el relieve es relativamente plano son las planicies de inundación del río Samalá y las terrazas aluviales sobre las que se encuentra el poblado de Zunil. Las fotografías 9 y 10 muestran el relieve presente las zonas cubiertas por piroclastos y planicies aluviales del río Samalá.

FOTOGRAFÍA 10 PLANICIES ALUVIALES DEL RÍO SAMALÁ



Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2012.

4.2 Provincias geomorfológicas

El informe geológico y vulcanológico del proyecto Zunil elaborado por el geólogo Edgar Tobías,⁴⁸ presenta una división geomorfológica regional de la zona geotérmica de Zunil, dividiendo el área en cuatro unidades o complejos geomorfológicos que son: faldas del pacífico, complejo volcánico cuaternario, valle de Quetzaltenango y complejo de rocas volcánicas terciarias.

El área de investigación se centra dentro de la zona cubierta por el informe antes mencionado, por lo que se considera esta información importante para conocer la geomorfología de la zona a nivel regional. En base a lo anterior a continuación se presenta una síntesis de dicha

⁴⁸ Edgar Tobías Gutiérrez. "PROYECTO ZUNIL ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PRELIMINAR: Informe geológico y vulcanológico". Instituto Nacional de Electrificación (INDE). Estudios Geotérmicos Guatemala, septiembre de 1977. p.4.

información y al final de este capítulo se presenta el mapa de Complejos Geomorfológicos tomado y modificado del Geólogo Edgar Tobías.

4.2.1 Complejo de rocas volcánicas terciarias

Dentro de esta unidad se han agrupado todas aquellas rocas que han sido fuertemente erosionadas y profundamente disectadas por el sistema de drenaje, es decir, que han perdido total o parcialmente su forma original independientemente de su composición mineralógica. En el área de estudio, y en toda la provincia volcánica de Guatemala, estas rocas son las más abundantes.

Dentro del área de estudio el Complejo Volcánico Cuaternario se ha desarrollado sobre el Complejo de Rocas Terciarias, el cual a su vez descansa sobre el basamento plutónico de la región.

4.2.2 Valle de Quetzaltenango

La ciudad de Quetzaltenango está situada casi en el centro de una depresión topográfica que forma un valle alargado en sentido este-oeste, con una longitud aproximada de 23 km y de 5 a 10 km de norte a sur. Su altura varía entre 2 300 m y 2 400 msnm. El río Xequijel corre por este Valle de oeste a este hasta unirse al río Samalá, que atraviesa, de norte a sur, su parte este.

El río Samalá en su recorrido entre San Cristóbal y Cantel presenta una serie de meandros que indican un estado de madurez. En este tramo la corriente no está efectuando trabajo de desgaste. Este régimen cambia drásticamente un poco más arriba de la fábrica textil de Cantel, de allí en adelante el Samalá se vuelve un río joven con un gradiente pronunciado, atraviesa el área del campo geotérmico de Zunil por el cañón del mismo nombre y continúa su recorrido hasta desembocar en el Pacífico.

La depresión de Quetzaltenango se rellenó de material piroclástico de diferentes orígenes, principalmente pómez masiva tipo lapilli, pómez subaérea, tobas soldadas y material redepositado de origen volcánico. Estas últimas son producto de la erupción del volcán Siete Orejas, las que se depositaron principalmente en la parte oeste del Valle. Todo este material relleno la depresión pre-existente dentro del Complejo de Rocas Terciarias, dando lugar a la formación del Valle de Quezaltenango.

Este Valle está limitado al norte y noroeste por dos fallas mayores con desplazamiento vertical de más de 300 m. El escarpe de la falla de Olinztepeque, localizada al norte del área, con rumbo aproximadamente este-oeste, expone parte del Complejo de Rocas Terciarias que encierran el Valle de Quezaltenango, a excepción de su límite con el Complejo Volcánico Cuaternario hacia el sur y suroeste.

4.2.3 Complejo volcánico cuaternario

Este Complejo ocupa la parte central suroeste del área estudiada, comprende los volcanes de Santa María, el domo Santiaguito, Complejo Dómico del Cerro Quemado, volcán Siete Orejas, volcán Chicabal y los domos menores de la Pedrera.

Desde el punto de vista vulcanológico, este Complejo es sumamente interesante, particularmente el Complejo Dómico del Cerro Quemado y el volcán Santa María debido a su actividad volcánica histórica y actual conocida; además, por su íntima relación con las manifestaciones geotermales distribuidas en el área.

Hacia el norte, este Complejo Volcánico se acuña contra las rocas Terciarias, pero su contacto está oculto por la formación de

pómez que cubre el Valle de Quezaltenango. Hacia el suroeste tiene su contacto con las Faldas del Pacífico y un bloque de rocas Terciarias que se localiza entre los volcanes Santa Marta y Chicabal. Hacia el noroeste y sureste sus contactos son con el Complejo de Rocas Terciarias.

El volcán Siete Orejas se localiza aproximadamente 10 km al suroeste de la ciudad de Quezaltenango, uno de sus picos más altos se levanta a 3 340 msnm, su base tiene un diámetro de aproximadamente 8 km y en su cima tiene un enorme cráter parcialmente erosionado de forma toscamente circular, abierta hacia el Pacífico. En el borde de este cráter se localizan siete pequeños cerros, de donde toma su nombre. Tiene un diámetro un poco mayor de los 3 km y el fondo de la depresión se encuentra a 2 400 msnm, donde se inicia el río Ocosito que drena hacia el Pacífico. Williams (1960) dice que este cráter es una caldera que se formó a partir de su erupción explosiva, efectuándose el colapso durante, o inmediatamente después de ésta.

El Volcán Chicabal se localiza al suroeste del volcán Siete Orejas y al noroeste del volcán Santa María; en su cima tiene un cráter de forma ovalada de aproximadamente 800 m y 600 m de diámetro mayor y menor respectivamente, dentro del cual se ha formado una pequeña laguna llamada Laguna de Chicabal. El nivel de esta laguna se encuentra a 2 712 m de altura y el borde del cráter se encuentra a 2 800 msnm. Su base mide de norte a sur un poco más de 6 km y 5 km de este a oeste.

El volcán Santa María se localiza aproximadamente 9 km. al suroeste de la ciudad de Quezaltenango, su cima se encuentra a 3 772 msnm. Su base mide de norte a sur aproximadamente 8.5 km y 7.3 km

de este a oeste. Está clasificado como un estratovolcán y visto desde el norte es un cono simétrico casi perfecto. En su flanco suroeste se encuentra el famoso cono parásito Santiaguito, que junto con los volcanes Pacaya y Fuego, se mantienen actualmente activos.

El complejo dómico del Cerro Quemado se localiza al sur de la ciudad de Quetzaltenango y al norte del volcán Santa María, mide aproximadamente 5 km en dirección norte-sur y 4 km en dirección este-oeste, su pico más alto se localiza en el Cerro Candelaria a 3 197 m de altura. Su topografía es muy irregular y escabrosa, su superficie está formada de promontorios de bloques de lava y material escoriáceo formando pequeños cerros y depresiones.

Los domos menores de la Pedrera representan el conjunto de siete pequeños domos que se localizan inmediatamente al norte y noreste del cono Cerro Quemado. Sus alturas varían entre 2 540 m y 2 700 msnm. Estos domos siguen una orientación aproximada este-oeste a ENE-OSO, los cuales pudieron haber surgido a través de una fractura en esta dirección, correspondiente al tren de Olintepeque.

El cono Santiaguito, que está clasificado (Stoiber y Rose Jr., 1970) como un cono endógeno múltiple, representa el vulcanismo actual dentro del área, se localiza en el flanco sur-oeste del volcán Santa María y su cráter se encuentra a 2 500 m de altura. Se inició en el mes de junio de 1922 a partir del cráter abierto por la última erupción del volcán Santa María en 1902. La lava viscosa que ascendió del cráter pre-existente formó un cono empinado, abrupto, llamado más tarde Santiaguito, que en un año creció 400 m y en dos años alcanzó un diámetro de 1 200 m.

4.2.4 Faldas del pacifico

La naturaleza geológica de esta unidad, compuesta principalmente de material lahárico y detritus volcánico proveniente de los flancos de los volcanes y altas montañas no define exactamente sus contactos geológicos, tanto con el Complejo Volcánico Cuaternario y Terciario como con la Llanura litoral del Pacífico, de tal manera que han tenido que ser inferidos. Esta unidad se inicia donde termina de definirse la estructura volcánica o el Complejo de Rocas Terciarias aproximadamente a 1 500 msnm. y va disminuyendo hasta perderse dentro de la Llanura Litoral del Pacífico, aproximadamente a 200 msnm.

Su relieve topográfico es abrupto debido a que el sistema de drenaje ha erosionado profundamente esta unidad. El clima tropical húmedo y la abundancia de precipitación pluvial han creado una espesa vegetación tipo bosque selvático, la cual está desapareciendo debido a la deforestación sin control. Las Faldas del Pacífico se encuentran cubriendo parte del Complejo Volcánico Cuaternario y también del Complejo de Rocas Terciario.

4.3 Hidrografía

El área de estudio cuenta con abundantes recursos hídricos, ya que se encuentra atravesada de noreste a suroeste por el río Samalá y sus tributarios; en efecto la zona cubierta por esta investigación se ubica dentro de la cuenca hidrográfica del río Samalá; esta cuenca limita al este y noreste con la cuenca del río Nahualate, al sureste con la cuenca del río Sis-Icán y al Oeste con la cuenca del río Ocosito, como se muestra en el mapa de hidrografía (mapa 4). Esta cuenca hidrográfica del río Samalá tiene su vertiente en el océano pacifico.

A nivel de subcuencas y también como se observa en el mapa 4, el área de estudio se encuentra dentro la subcuenca nombrada como área de captación del río Samalá, la cual se encuentra limitada al noroeste por la subcuenca del río Xequijel, al suroeste por la subcuenca del río Nimá I, ambas subcuencas de la cuenca del río Samalá; y limita al sureste con la subcuenca llamada como área de captación del río Nahualate, de la cuenca del río Nahualate.

El patrón de drenaje que se observa en la zona va del tipo subparalelo al subangular, con control de tipo estructural, dominado por la falla Samalá, que es parte del sistema de fallas de Zunil, con una orientación preferencial noreste–suroeste; esta estructura geológica es responsable directa del río Samalá, del cual toma su nombre

4.4 Clima y vegetación

4.4.1 Clima

Por la diferencia de altitudes presentes en la zona de estudio la temperatura media anual es muy variable, oscila entre 15 °C y 24 °C, habiéndose observado en las partes más altas valores de –7 °C y en la boca costa, hasta de 35 °C. Según el sistema de clasificación de *Thornthwait*, el clima de la región se caracteriza por tener en la jerarquía de temperaturas, zonas que van desde cálidas hasta semifrías, con tipos de variaciones de temperatura de zonas sin estaciones frías bien definidas y otras con inviernos benignos.

En la jerarquía de humedad se encuentran zonas de clima muy húmedo caracterizado por selvas, hasta zonas semisecas con pastizales pasando por zonas húmedas caracterizadas por bosques, y con distribuciones de lluvia en zonas sin estaciones secas bien definidas y con inviernos secos.

Las lluvias se presentan entre mayo y octubre, con máximos de precipitación en junio y septiembre, con cifras estimadas de 3,000 mm/año y 4,000 mm/año. Lluvia 120 días al año, con una época de sequía severa entre noviembre y mayo, cuando la precipitación registrada es menor a 50 mm. La estación seca es marcada entre los meses de diciembre y enero.⁴⁹

4.4.2 Vegetación

En el departamento de Quetzaltenango existen cinco zonas de vida vegetal, según la clasificación propuesta por *Holdridge* en el año de 1978, en base a esta clasificación y según se muestra en el mapa Zonas de vida, que se presenta a continuación, en el área se pueden encontrar cuatro de estas zonas de vida y son las siguientes:

- a) Bosque muy húmedo sub-tropical cálido bmh-S(c) con vegetación rica en composición florística, como el corozo, el volador, el conacaste y el mulato.
- b) Bosque muy húmedo montano bajo subtropical bmh-MB, entre los indicadores ecológicos de esta zona está el pino triste, el ciprés y el aliso.
- c) Bosque húmedo Montano Bajo subtropical bh-MB, teniéndose como principales especies características de esta zona a las siguientes: el Quercus, Pinus pseudostrobus (Pino lacio), Pinus montezumae, Juniperus comitana, Alnus jorullensis (Mexican Alder), Ostrya (Carpe lupulino), Carpinus (Carpe), Prunus serótina (Cerezo negro americano) y al Arbutus xalapensis.

⁴⁹ CONSEJO DEPARTAMENTAL DE DESARROLLO QUETZALTENANGO. Gerencia para la reconstrucción de Quetzaltenango. s/n. Disponible en la Web en: <http://www.segeplan.gob.gt/stan/Reconst/ReconstQuetzaltenango.pdf>. Consultado el 14/11/2011.

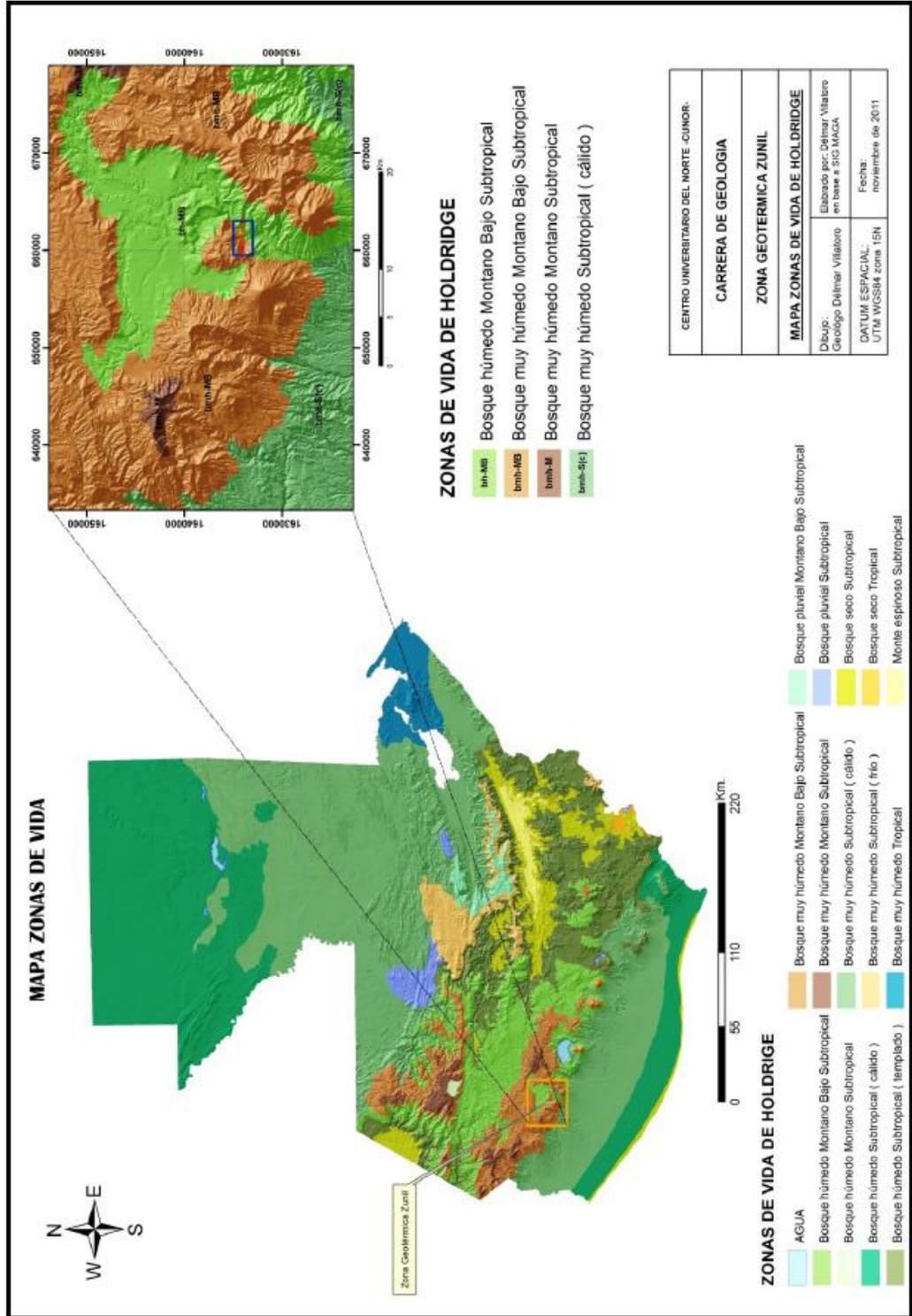
d) Bosque muy húmedo Montano subtropical bmh-M con las siguientes especies como indicadores ecológicas: *Abies Guatemalensis*, *Pinus ayacahuite* (pino cahuite), *Pinus hartwegii* (Pino de México), *Pinus pseudostrobus* (Pino lacio), *Cupressus lusitanica* (Ciprés Mexicano), *Quercus*, *Buddleja*, *Cestrum*, *Garya*, *Bacharia*, *Bocona volcánica*.⁵⁰

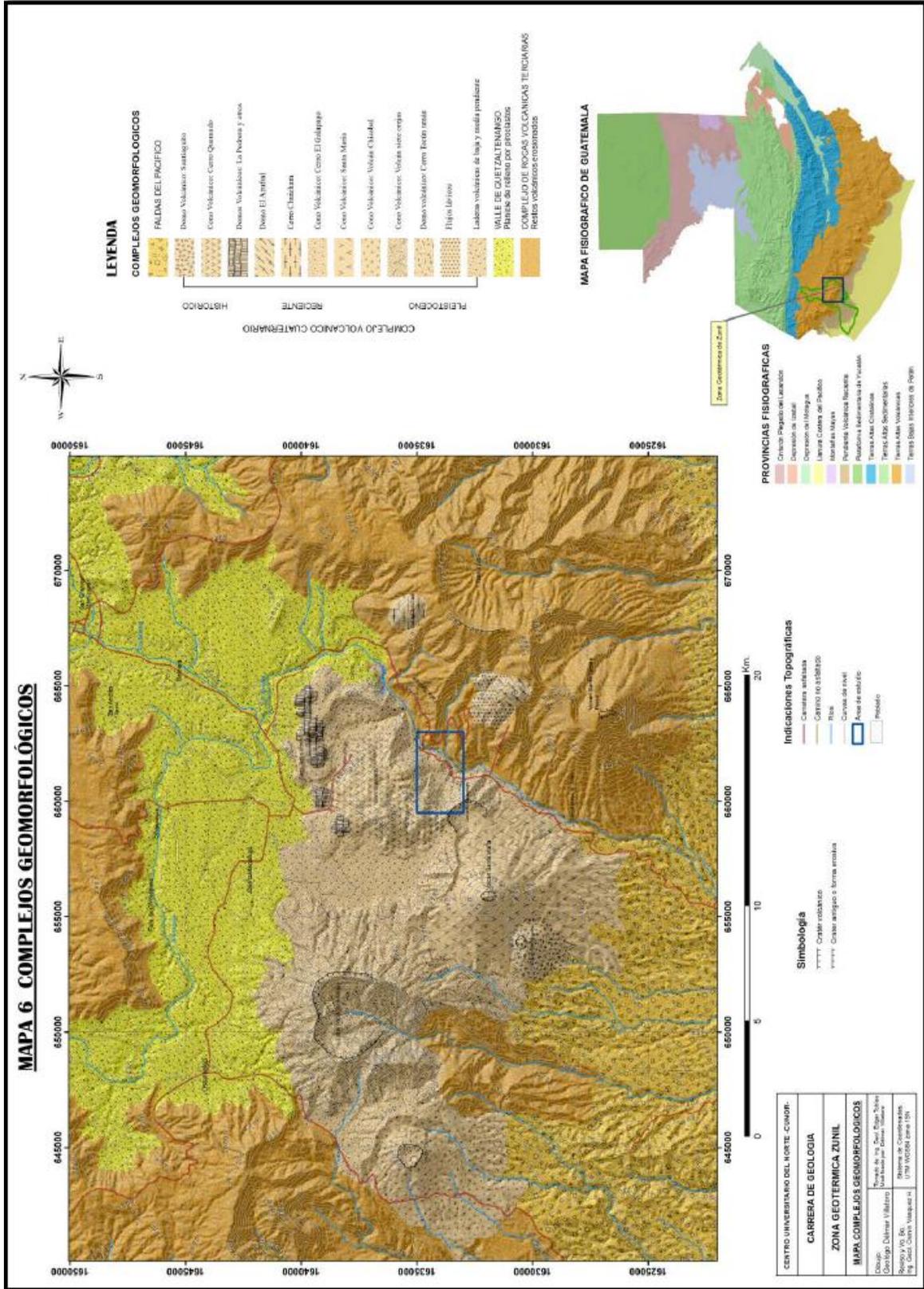
Además entre la flora de la región se mencionan: especies arbóreas, arbustos, hierbas, lianas, epifitas y parásitas. Las principales especies forestales existentes son: árboles de pino, manzanos, claveles, cipreses, duraznales, robles, ciruelas, lirios, encinos, peras, azucenas, pinabetes, eucaliptos, saúcos, alisos y cerezos.⁵¹

⁵⁰ SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DEL MAGA (SIG MAGA).

⁵¹ CARLOS ARMANDO CARÍAS GONZÁLEZ “Costos y rentabilidad de unidades pecuarias (producción de leche)” Municipio de Zunil departamento de Quetzaltenango. Disponible en la Web en: http://biblioteca.usac.edu.gt/EPS/03/03_0675_v6.pdf. Consultado el: 14/11/2011.

MAPA 5 MAPA DE ZONAS DE VIDA





CAPÍTULO V

GEOLOGÍA REGIONAL

5.1 Marco tectónico regional

Al observar cualquier mapa o diagrama que muestre la tectónica de placas regional para Centroamérica y el Caribe, se puede apreciar que en el territorio de Guatemala se da la unión de tres placas tectónicas que son: la Placa de Norte América, la Placa del Caribe y la Placa de Cocos.

En el mapa 7, Tectónico Regional, se puede observar la interacción entre estas tres placas, y las principales estructuras regionales resultantes de esta interacción tectónica; el movimiento relativo de estas placas controla y determina la complejidad de la geología de Guatemala; esta complejidad ha motivado la realización de diversos estudios en el país, los cuales pretenden explicar los procesos involucrados en esta triple unión de placas.

En base a la información aportada por estas investigaciones actualmente se sabe que la placa litosférica del Caribe se desplaza hacia el Este en relación con Norte y Sur América; esto debido a que la corteza oceánica Atlántica penetra a profundidad bajo las Antillas Menores en lo que actualmente se conoce como la fosa del Caimán, con un desplazamiento horizontal de aproximadamente 350 km con una velocidad de movimiento de 17mm/año; este desplazamiento se ha dado desde el Cretácico tardío-terciario temprano hasta el presente. También se ha determinado que la placa de Cocos en el Pacífico se mueve hacia el Noreste y su corteza

oceánica penetra a profundidad bajo Centroamérica y México.⁵²

Como resultado de estos movimientos litosféricos, se formó un sistema de fallas conocido como sistema de fallas Motagua-Polochic el cual presenta fallas transcurrentes (strike slip) sinestrales para la parte Norte del país y dextrales en el sur. Este sistema de falla Motagua-Polochic, se extiende a lo largo de 400 Km. del mar Caribe en el Este hasta la costa del Pacífico en el Oeste. El sistema está compuesto por tres subsistemas de fallas subparalelas, transcurrentes (strike slips) mayormente sinestrales, que de Norte a Sur son: las fallas del Polochic (o Chixoy- Polochic), Motagua, y Jocotán-Chamelecón⁵³ (ver mapa 7).

La tectónica regional del área donde se localiza el campo geotérmico de Zunil se encuentra controlada principalmente por la subducción de la placa de cocos por debajo de la placa del Caribe, a lo largo de la fosa mesoamericana; esta subducción está íntimamente relacionada con el vulcanismo Cuaternario tanto en Centro América, como en Norte y Sur América, caracterizado por un vulcanismo activo o de edad muy reciente, distribuido paralelamente a las costas del Océano Pacífico.

La subducción de la placa de Cocos bajo la placa del Caribe provoca la fracturación de la placa del Caribe, dividiendo a su vez el frente volcánico en segmentos, en Guatemala se tienen tres segmentos de este frente que han sido nombrados como Segmento Occidental o Los Altos, Segmento Guatemala Central y Segmento Guatemala Oriental.

⁵²DENGO GABRIEL. *“Marco tectónico de la región del Caribe: Reseña histórica”*. Guatemala 1978., s/n. <http://www.crid.or.cr/digitalizacion/pdf/spa/doc5164/doc5164.htm>

⁵³Traducción Libre: DELMAR VILLATORO. *Kinematics of the North America-Caribbean-Cocos plates in Central America from new GPS measurements across the Polochic-Motagua fault system*. Disponible en la web en: http://www.geo.mtu.edu/volcano06upgrade/SeismicityRudiger/lyon_caen_GPS_Polochic.pdf. Consultado el 29/08/2011.

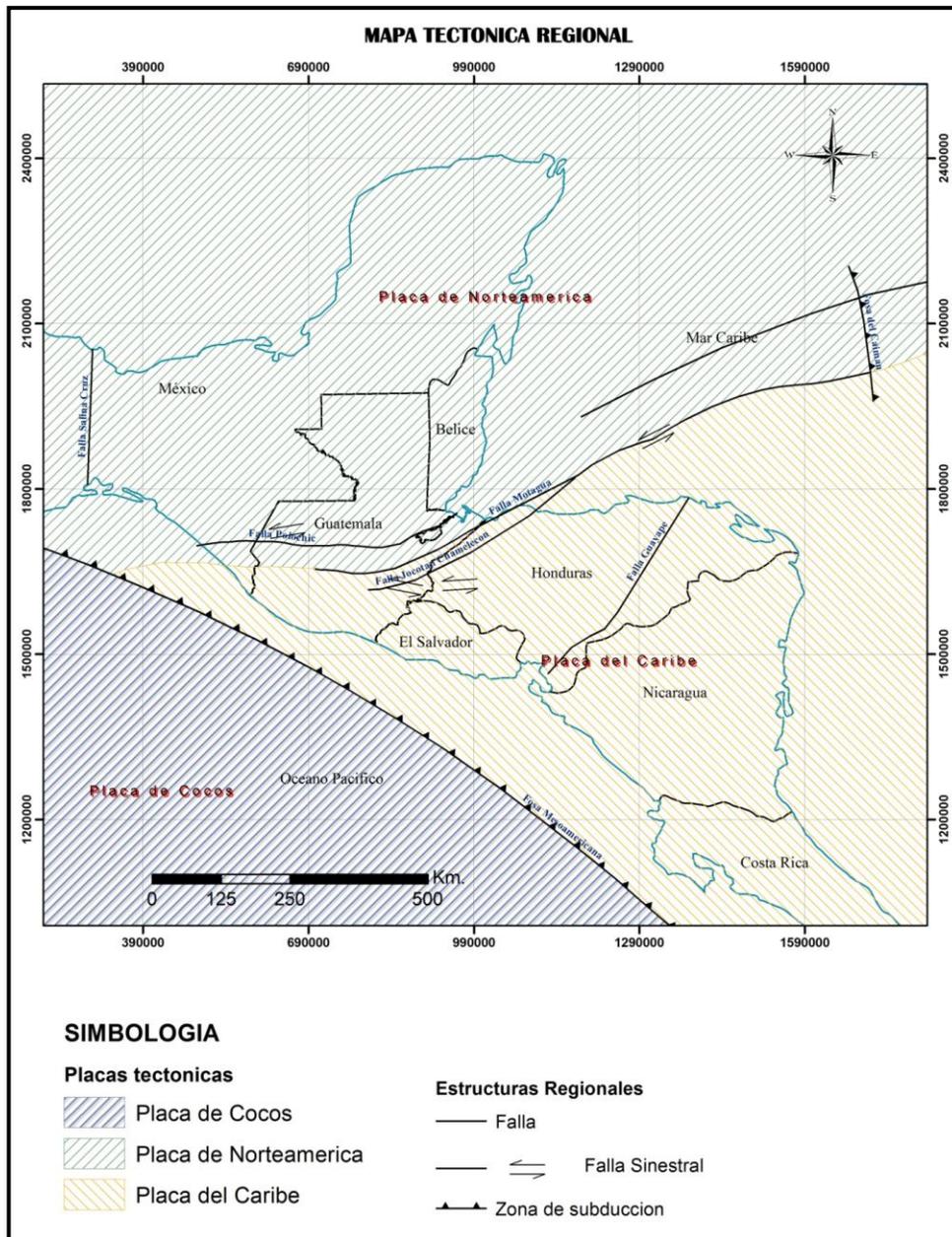
Estos segmentos se encuentran divididos por sistemas de fallas transcurrentes (de rumbo) sinestrales originados por esfuerzos tensionales locales sobre la cresta de un geoanticlinal que se originó por la elevación del borde del continente, debido a esfuerzos compresionales ocasionados por la Placa de Cocos.

Las grandes fracturas longitudinales de tensión generaron sistemas de estructuras en graben, como los que se observan no solo en Guatemala sino a lo largo de Centroamérica, y permitieron la subida de magma subcortical y el emplazamiento de cámaras magmáticas a poca profundidad, probablemente del orden de los 10 km. Dichas cámaras han sido, a partir del Terciario Superior, la fuente de alimentación del vulcanismo Cuaternario y lo continúan siendo en la actividad volcánica actual.

Estas cámaras son el origen de las fuertes anomalías geotérmicas asociadas al vulcanismo, de tal manera, que tanto volcanes como áreas geotérmicas tienen el mismo origen, pero su formación es diferente. Los volcanes reciben una alimentación directa de material magmático de alta temperatura, (alrededor de 1,000°C), mientras que las áreas geotérmicas se forman a partir de un flujo de calor que se transmite a través de las rocas que encierran la cámara magmática. Queda explicado entonces, como volcanes y áreas geotérmicas son fenómenos paralelos que no necesariamente coinciden.⁵⁴

⁵⁴ Edgar Tobías Gutiérrez. "PROYECTO ZUNIL ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PRELIMINAR: Informe geológico y vulcanológico". Instituto Nacional de Electrificación (INDE). Guatemala septiembre de 1977., p.37, 38.

MAPA 7 TECTÓNICA REGIONAL



Fuente: Modificado de Gabriel Dengo; obtenido en ArcGis v. 9.3.

5.2 Estratigrafía

La determinación de la secuencia estratigráfica por métodos superficiales en la zona donde se ubica el campo geotérmico Zunil I y sus alrededores, al igual que en otras zonas volcánicas, presenta la dificultad de

que gran parte de las unidades, sobre todo la secuencia volcánica del terciario, se encuentran cubiertas por depósitos piroclásticos recientes. Por su parte la secuencia de rocas volcánicas cuaternarias o recientes presenta menos complicaciones en cuanto a determinar sus contactos, ya que estos se limitan a estructuras volcánicas que conservan su forma original total ó parcialmente, es decir, que se trata de edificios volcánicos jóvenes que pueden identificarse claramente tanto por fotogeología como en el campo.

El presente informe toma la secuencia estratigráfica propuesta por el geólogo Edgar Tobías en su informe geológico y vulcanológico del estudio de factibilidad preliminar del proyecto Zunil, realizado para el INDE en 1977; esto debido a que dicho autor presenta la descripción más completa a nivel regional, que se pudo obtener, de las unidades geológicas presentes en la zona; esto a pesar de que en el área se han realizado estudios geológicos más recientes y profundos, sin embargo todos toman o parten de la geología regional propuesta por Edgar Tobías.⁵⁵

Según dicho autor el Complejo de Rocas Terciarias surgió a través de erupciones de fractura y se depositó directamente sobre las Rocas Plutónicas basales; mientras que el Complejo Volcánico Cuaternario se ha formado sobre un grueso espesor de rocas Terciarias indiferenciadas, surgiendo a través de focos eruptivos centrales localizados a lo largo de fracturas con una orientación preferencial regional NW-SE, dentro y a lo largo del borde sur de la depresión tectónica Guatemala-Quetzaltenango.

A continuación se presenta una breve descripción de las unidades litológicas que conforman la secuencia vulcanológica presente en la región; describiéndolas de la más antigua a la más reciente y al final de este

⁵⁵Ibíd., p.10.

capítulo se presenta un mapa geológico regional de la zona (Mapa 8), el cual sintetiza esta información.

5.2.1 Rocas plutónicas

El basamento pre-Terciario que se encuentra en la zona estudiada y sus alrededores está formado principalmente por rocas Plutónicas posiblemente de edad Cretácica. Se sabe que en otras regiones las rocas volcánicas descansan sobre rocas metamórficas o calcáreas; Edgar Tobías reporta que cerca de Cabricán, al noreste del área de estudio, y en San Francisco El Alto, a 20 km. al norte y este respectivamente de este pueblo se encuentran afloramientos de calizas de edad posiblemente Cretácica.

Si bien estas rocas no afloran en el área de estudio, han sido reportadas en perforaciones y además afloramientos de rocas Plutónicas están ampliamente distribuidos en la región, el tipo de roca varía de cuarzo-monzonita biotítica a diorita hornbléndica, siendo la más abundante el tipo de granodiorita de biotita.⁵⁶

La edad de estas rocas varía desde el Paleozoico al Cenozoico. Al datar una diorita del Plutón de San Raymundo localizado al noroeste la ciudad de Guatemala, dio una edad de 92 millones de años, correspondiente al Cretácico Superior. (Williams 1960)

5.2.2 Complejo de rocas volcánicas terciarias

Estas rocas afloran en la parte este del área de estudio atravesándola de noreste a sureste, el río Samalá corre aproximadamente por el contacto fallado entre las rocas Cuaternarias y las rocas Terciarias; mientras que al sur del área estas rocas se

⁵⁶Ibíd., p.22.

encuentran cubiertas por la unidad de detritos lahárico y volcánicos en contacto discordante.

Con respecto al contacto entre las rocas Terciarias y las rocas Plutónicas el informe geológico y vulcanológico del proyecto Zunil menciona que este contacto es discordante, es decir, que las rocas graníticas estuvieron largo tiempo expuestas a la erosión antes que se depositaran las rocas Terciarias.

El espesor de la secuencia estratigráfica Terciaria en el área de Zunil, se ha calculado entre 600 m y 700 m el cual tiende a incrementarse hacia los altiplanos o partes más altas del Complejo Terciario, en donde puede superar los 1 000 m de espesor.

Por observaciones de campo se ha podido establecer que la estratigrafía Terciaria consta de una intercalación de rocas piroclásticas principalmente del tipo de tobas soldadas (ignimbritas) con flujos de lavas de diferente composición mineralógica, diferente textura, y espesores.

Litológicamente estos flujos lávicos parecen variar ligeramente de andesita basáltica con piroxenos y olivino, en la parte inferior de la sección, a andesita hornbléndica con poco o nada de piroxenos en su sección superior.⁵⁷

5.2.3 Lavas viejas

En estudios anteriores han denominado con este nombre a las rocas que forman el flanco sureste del Complejo Dómico del Cerro

⁵⁷ *Ibíd.*

Quemado. Su sección inferior se compone de material lahárico con componentes de andesita piroxénica.

Litológicamente estas parecen ser unas traquiandesitas y su sección expuesta presenta el desarrollo de un sistema vertical de diaclasas columnares, las que están perfectamente expuestas en el acantilado que se encuentra en la planta hidroeléctrica de Zunil, en el margen derecho del río Samalá.

La posición en la secuencia estratigráfica de este macizo de rocas no está bien clara; pueden corresponder a la fase inicial de la formación del Complejo Dómico del Cerro Quemado o bien, puede tratarse de rocas Terciarias que fueron intrusionadas por éste.⁵⁸

5.2.4 Lavas del volcán Santa María

Antes del año 1902 no se conocen registros históricos de su actividad volcánica. En el mes de octubre de 1902 se estremeció la ciudad de Quetzaltenango y los pueblos vecinos por la tremenda explosión del volcán Santa María. Esta abrió un cráter en su flanco suroeste de aproximadamente 800 m de diámetro.

La pómez de esta erupción cubre aún los alrededores; las lavas arrojadas durante esta erupción parecen ser de composición riodacítica más que andesíticas. En 1922 lava viscosa ascendió en el piso del cráter y formó un domo empinado, al que se llamó más tarde Santiaguito.⁵⁹

El volcán Santa María está construido sobre el Complejo de Rocas Terciarias, las que a su vez descansan discordantemente sobre

⁵⁸ *Ibíd.*, p.22

⁵⁹ *Ibíd.*

el basamento plutónico. Sus lavas y material piroclástico muestran poca variación en su composición y se han clasificado como andesitas piroxénicas con o sin hornblenda y olivino.

5.2.5 Lavas del volcán Galápagó

El Cerro Galápagó se localiza al pie del flanco este del volcán Santa María y exactamente al Sur del Complejo Dómico del Cerro Quemado. Es un estratovolcán formado de lavas de andesita piroxénicas y brecha tobácea que se presumen fueron erupcionados por el cráter de las Majadas. Se encuentra intrusionando las Lavas Viejas y su formación es contemporánea con la del Cerro Quemado.⁶⁰

5.2.6 Detritus lahárico y fluvial de origen volcánico

Las Faldas del Pacífico están cubiertas de detritus volcánico sin ninguna clasificación de tamaño, sin consolidación o pobremente consolidados. Sus componentes varían desde arenas hasta bloques que se han desprendido de su roca original y rodado por gravedad.⁶¹

La composición depósitos de detritos varía desde pómez hasta bloques de andesita y basalto en una matriz limosa. Esta unidad, ampliamente distribuida, se encuentra cubriendo del lado del Pacífico, la parte inicial de las estructuras volcánicas y también parte del Complejo de-las Rocas Volcánicas Terciarias.

5.2.7 Lavas andesíticas del domo cerro quemado

Este domo es más bien un complejo dómico, que se formó a partir de grandes acumulaciones de lava viscosa que probablemente emergió por numerosos focos eruptivos; dando como resultado

⁶⁰ *Ibíd.*, p.16

⁶¹ *Ibíd.*

promontorios de bloques de lava y material escoriaéreo formando pequeños cerros y depresiones.

Todo este material lávico ha venido depositándose sobre rocas Terciarias pre-existentes. La composición estructural de estas rocas dentro del Complejo Dómico aún no está clara. Con respecto a la composición litológica, ésta varía entre dacitas, traquiandesitas y andesitas de hornblenda y biotita.⁶²

5.2.8 Lavas y cúpula andesítica del domo el azufra

La composición litológica de su flanco sureste, es una dacita y riodacita de hornblenda y biotita; su cima está compuesta de grandes bloques de andesita hornbléndica; en su flanco norte se localizan grandes bloques de lava andesítica con estructura columnar alrededor de depresiones posiblemente relacionadas con fracturas o focos eruptivos.

Las manifestaciones geotermales que se localizan en este domo dentro de las cuales se encuentran los manantiales calientes de Fuentes Georginas y Aguas Amargas se extienden en dirección noreste.

Estructuralmente puede interpretarse como una intrusión dómica y las lavas asociadas a este domo pueden formar parte del flanco noreste de esta intrusión. El emplazamiento de esta estructura, así como la del domo de Zunil, pudo haberse dado después de la formación del Cerro Quemado y antes de la fase dómica ácida que caracteriza la serie de pequeños domos situados al norte y noreste del Cerro Quemado.⁶³

⁶² *Ibíd.*, p.15

⁶³ *Ibíd.*, p.14

5.2.9 Lavas recientes de Zunil y lavas del domo de Zunil

Estas lavas cubrieron parte de las rocas Terciarias, las que están expuestas y forman la pared derecha del cañón del río Samalá hasta llegar a las cataratas de Zunil. Se les ha calculado un espesor total entre 100m y 150 m Su sección inferior se presenta compacta y corresponde a una dacita hornbléndica biotítica.⁶⁴

El concepto de la estructura dómica, aún no está claro, parece ser que ésta es una intrusión dómica de composición andesítica, contemporánea con el domo Tecún Umán, asociada con la actividad del Cerro Quemado; de ser esto cierto, este domo se encuentra intrusionando las lavas viejas basales del domo Cerro Quemado y la estructura actual de éste.

5.2.10 Rocas piroclásticas recientes

En esta unidad se ha agrupado todo el material piroclástico que se ha depositado en los valles o depresiones que se localizan dentro del Complejo Volcánico Cuaternario, tales como los Valles: Llano del Pinal y Almolonga, incluye pómez de origen diverso y terrazas aluviales de conglomeráticas a arenosas sin clasificación, sueltas o pobremente consolidadas.⁶⁵

El espesor de esta unidad es muy variable, éste puede variar desde unos pocos metros hasta centenas de metros cuando se encuentra rellenando accidentes topográficos.

5.2.11 Lavas 1818 del Cerro Quemado

Estas lavas que cubren la parte noreste del domo Cerro Quemado, y representan la última actividad volcánica de este domo, la

⁶⁴ *Ibíd.*, p.13

⁶⁵ *Ibíd.*, p.12

cual se produjo en el año de 1818 (Gall., 1965). El orificio de salida se localiza al este del foco eruptivo principal del Cerro Quemado, creando una extensa superficie de lava color gris, sobre la cual aún no se ha desarrollado suelo ni vegetación.

La superficie es muy escabrosa y difícil de caminar debido a los grandes bloques irregulares y escoréáceos de lava que se solidificaron formando espinas y espacios vacíos. La lava se ha clasificado como una andesita hornbléndica biotítica.⁶⁶

5.2.12 Lavas del domo Santiaguito

Este pequeño domo, ha sido clasificado (Stoiber y Rose Jr., 1970) como un domo endógeno múltiple. Su actividad se inició en el mes de junio de 1922 a partir del cráter abierto por la última erupción del volcán Santa María en 1902. La lava viscosa que ascendió del cráter pre-existente formó un domo empinado, abrupto, llamado más tarde Santiaguito, que en un año creció 400 m y en dos años alcanzó un diámetro de 1 200 m.

Su actividad volcánica actual se reduce a flujos de lava viscosa, erupciones de ceniza y nubes ardientes, de composición Andesítica-dacítica con hornblenda e hiperstena; esta última puede estar o no presente.

Estos productos se han depositado sobre las lavas andesíticas piroxénicas del volcán Santa María. La cúpula del Santiaguito originada en 1922 había alcanzado hasta mediados de 1924 su altura actual; sin embargo, desde entonces aumentó considerablemente su volumen. Este domo, desde su nacimiento hasta la actualidad, ha permanecido

⁶⁶ Ibíd., p.11

en constante actividad volcánica con períodos cortos de calma relativa.⁶⁷

5.2.13 Coluvión y aluvión

Esta unidad la integra el material de bloques, gravas, arenas, arcillas y suelos de origen volcánico en forma suelta o bien, formando conglomerados arenosos pobremente consolidados y sin clasificación, que han sido depositados en los valles y a ambos lados de los ríos, incluyendo los abanicos aluviales. Dentro de la zona de interés, los depósitos aluviales se localizan en el Valle de Zunil y a ambos lados, aguas abajo, del río Samalá. En el Valle de Zunil las terrazas aluviales tienen aproximadamente un espesor de 15 a 10 m.⁶⁸

5.3 Geología estructural regional

El principal y mayor rasgo estructural regional en la zona lo constituye la caldera de Quetzaltenango, la cual es visible y puede delimitarse a partir de análisis fotogeológico además de ser visible en el mapa de anomalía de Bouguer del territorio de Guatemala; donde se puede observar que existe una depresión del basamento entre Guatemala y Quetzaltenango, de aproximadamente 300 km. de largo por 10 km. de ancho (mínimo gravimétrico entre -100 y -150 mgal. $D = 2.67$), orientada aproximadamente NW-SE, la cual es casi paralela a la Fosa Mesoamericana que se localiza aproximadamente a 100 km. de la costa del Pacífico, con profundidades máximas entre 5 000 m y 6 000 m.

Este tipo de depresiones tectónicas o grabens han sido confirmados también en El Salvador y Nicaragua, con la misma orientación regional NW-

⁶⁷ *Ibíd.*, p.11

⁶⁸ *Ibíd.*, p.10

SE, e íntimamente relacionados con la Provincia Volcánica Centroamericana.⁶⁹

Los rasgos geológicos localizados dentro y a lo largo de la caldera de Quetzaltenango y que están directamente relacionados con esta, incluyen los números respiraderos volcánicos asociados con el volcán Cerro Quemado, el cerro Candelaria, el volcán Almolonga, el volcán San Andrés Xecul y la caldera de las Majadas estos volcanes y calderas más jóvenes llenan la totalidad de la caldera de Quetzaltenango como domos resurgentes, flujos lávicos y colapsos.⁷⁰

Dentro del área de estudio se pueden reconocer dos sistemas estructurales, aparte del sistema principal regional NW-SE; el sistema NE-SW y el sistema E-O, ambos se encuentran formando ángulos con el eje del sistema estructural principal. El Sistema NE-SW (llamado aquí Sistema del Samalá) limita hacia el oeste del área, el Complejo Volcánico Cuaternario por medio de la falla que pasa por el flanco oeste del volcán Chicabal.

La falla principal correspondiente a este sistema (NE-SW) es la Falla Samalá, que divide la zona de manifestaciones geotermales y que combinada con la Falla de Zunil forman la estructura en Graben donde probablemente se localice el Campo Geotérmico de Zunil. Este graben mide un poco más de 2 km de ancho por 4 km de largo, con orientación NE-SW. A la vez, parece estar fallado aproximadamente en su parte media por el sistema de fallas E-W y otras fallas con orientación NW-SE, que han ocasionado, aparentemente un hundimiento mayor de su parte central.

⁶⁹ Edgar Tobías Gutiérrez. "PROYECTO ZUNIL ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PRELIMINAR: Informe geológico y vulcanológico".Ibid., p.33

⁷⁰CORDON Y MERIDA INGS, MK FERGUSON COMPANY (1993). *Informe final planta geotermoeléctrica de 15 MW proyecto Zunil I Quetzaltenango.*, p.1-4.

Dentro del Graben de Zunil se ha inferido un sistema de fallas y fracturas con esta orientación NW-SE y también la existencia de algunas fallas con la orientación regional, los cuales pueden relacionar los sistemas de Fumarolización de Zunil y El Azufral. A este sistema corresponde también la fractura que se infiere a través del domo Cerro Quemado, el volcán de Santa María y el cono Santiaguito (Williams, 1960).⁷¹

La distribución espacial, de las principales estructuras geológicas regionales pueden observarse en el mapa 9 Geología Estructural Regional que se muestra al final de este capítulo.

5.4 Historia volcánica

La evolución volcánica en esta región se inicia con el vulcanismo Terciario que se diferencia del vulcanismo Cuaternario por haber consistido su principal actividad en erupciones por fracturas. Según el geólogo Edgar Tobías aparentemente no hubo conos altos, diques radiales o cuellos, o bien, remanentes de conos antiguos profundamente erosionados, que indiquen la existencia de focos eruptivos centrales mayores. Tampoco se han observado rocas Terciarias depositadas en un medio marino; lo que indica que el vulcanismo Terciario en esta región es totalmente continental.⁷²

Las rocas Terciarias en la región estudiada constituyen un importante espesor de derrames lávicos y depósitos de avalanchas candentes que cubrieron el basamento pre-Terciario, el cual se considera que estaba fuertemente erosionado presentando un relieve moderado con escaso drenaje. Todo este material salió a través de grandes fracturas longitudinales de tensión que generaron la depresión tectónica del basamento pre-Terciario.

⁷¹ Edgar Tobías Gutiérrez. "PROYECTO ZUNIL ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PRELIMINAR: Informe geológico y vulcanológico".Ibíd., p.34

⁷² Ibíd., p.41.

El vulcanismo Cuaternario, en el área de estudio, se desarrolló dentro y al borde del extremo noroeste de la depresión gravimétrica Guatemala-Quetzaltenango, que al mismo tiempo es una manifestación de los fenómenos ígneos que se realizan en la zona de subducción localizada entre las placas Oceánicas con las placas Continentales. Este vulcanismo no se sabe aún como evolucionó hasta la formación del volcán Siete Orejas, que es probablemente el edificio volcánico más viejo que puede identificarse morfológicamente en el campo, el cual se ha calculado, a partir de determinaciones de Carbono 14 que estuvo activo aproximadamente hace 35 000 años.⁷³

Sin embargo, es probable la existencia de edificios volcánicos anteriores a la formación del volcán Siete Orejas, cuyas estructuras han sido destruidas por la erosión principalmente. En la fase final de la formación del volcán Siete Orejas, .pricipió la formación del volcán Chicabal, el cual se considera un volcán parásito de éste. Ambos es probable, que hayan estado alimentados por la misma cámara magmática. Durante la formación del volcán Chicabal, probablemente en su fase intermedia, principia a formarse el espectacular volcán de Santa María, cuya última y tremenda erupción sucedió en el año de 1902.

Con la formación del volcán de Santa María termina la fase de edificios volcánicos construidos alrededor de focos centrales de emisión, y se inicia la actividad volcánica dómica, cuya máxima representación es el Complejo Dómico del Cerro Quemado, el cual se formó a partir de varios focos de emisión de grandes cantidades de lava viscosa. Su última erupción sucedió en el año de 1818, cuyas lavas se han identificado con este año. Al final de la formación del Cerro Quemado, se inició la última fase dómica con

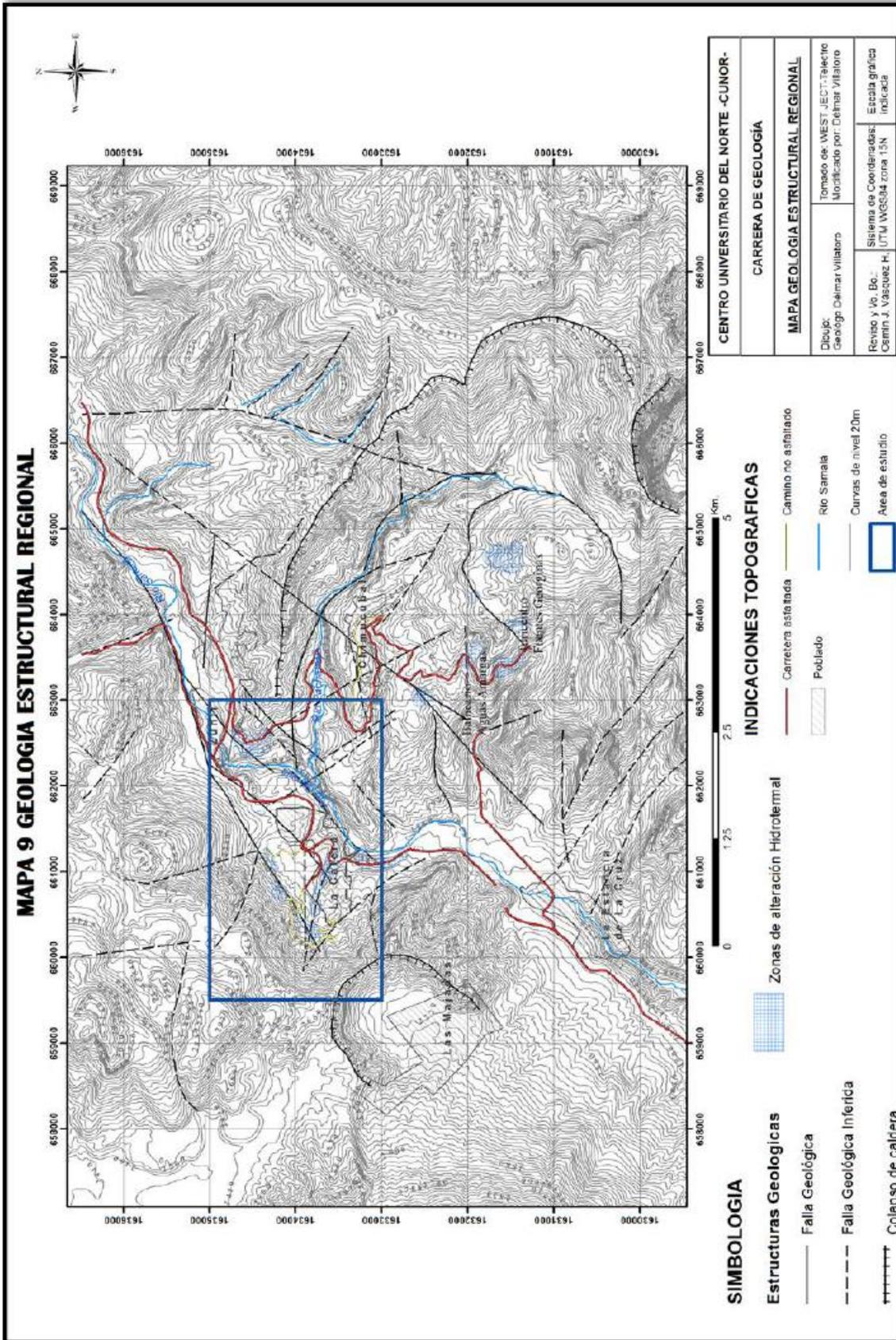
⁷³ Ibíd., p.42.

la formación del conjunto de pequeños domos ácidos de la Pedrera, Almolonga, Huitán y otros.

Probablemente esta última fase dómica se inició con la formación del domo Tecún Umán, El Azufra y Chuicham. El domo de Zunil se considera parte del Complejo del Cerro Quemado, cuya formación es contemporánea con la de estos últimos domos mencionados. La evolución volcánica en esta área, termina con la formación del pequeño domo Santiaguito la que principió en 1922 y que continúa en la actualidad.

Con respecto al origen del enorme volumen de material lávico y piroclástico que formó las estructuras volcánicas que constituyen el Complejo Volcánico Cuaternario, se considera que éste se derivó a partir de un magma de composición basalto-andesítico, principalmente localizado en cámaras magmáticas profundas. Sin embargo, se ha realizado una mezcla del magma basalto-andesítico original, probablemente con material silícico, que ha dado como resultado el emplazamiento de una cámara magmática menos profunda que alimentó y formó el conjunto de pequeños domos ácidos de composición riodacítica.⁷⁴

⁷⁴ *Ibíd.*, p.43.



CAPÍTULO VI

GEOLOGÍA LOCAL

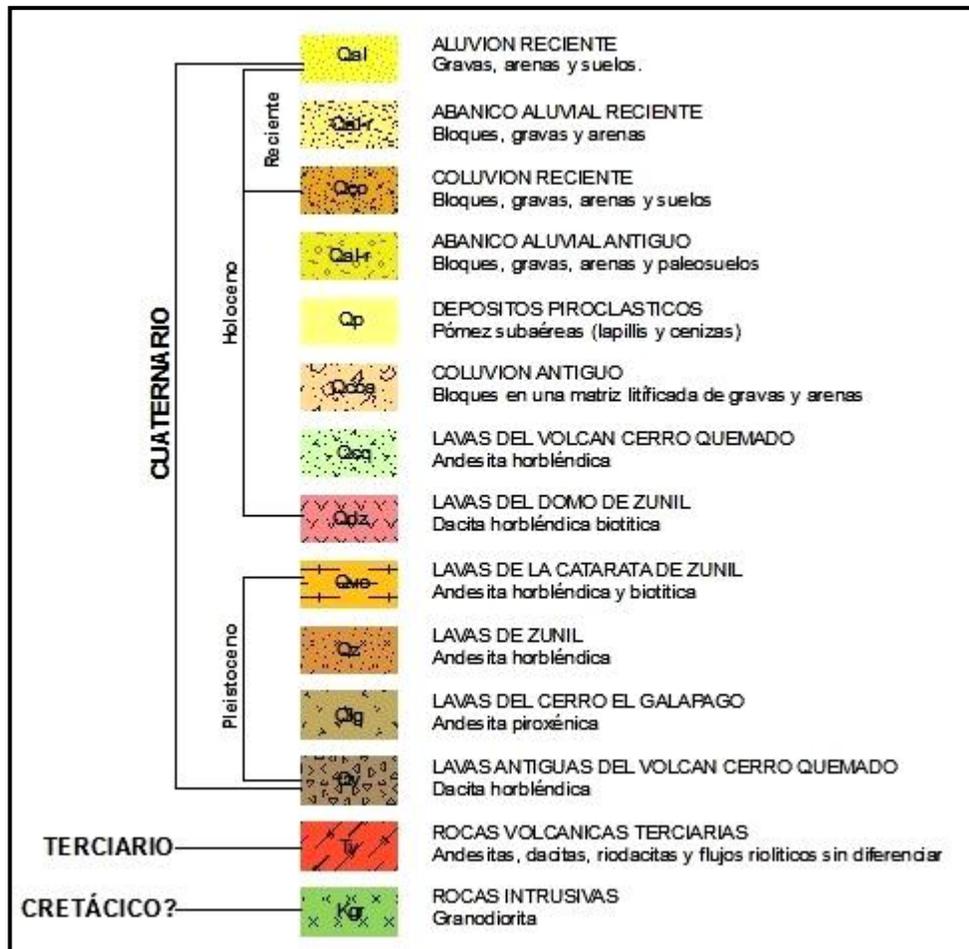
6.1 Unidades litológicas

En este apartado se presenta una descripción cualitativa de las Unidades litológicas que afloran dentro de los límites del área de estudio, como se pudo constatar en el capítulo anterior (Geología Regional) la zona está cubierta por rocas volcánicas, con un basamento intrusivo de granodiorita (principalmente). La figura 7 muestra de forma idealizada los productos de las secuencias de actividad volcánica y de los procesos fluviales, que han sucedido en el lugar donde se centra la investigación.

Las Unidades de rocas volcánicas terciarias y la de rocas intrusivas no afloran en el área de estudio, únicamente se sabe de su ubicación en la secuencia litológica y su composición mineralógica por testigos de recuperación en pozo exploratorios, por lo que no se describen en este capítulo considerándose que ya fueron descritas con la misma base bibliográfica en el capítulo anterior.

La descripción de las Unidades, inicia de la más antigua y termina con la más reciente, en los casos en los que ha sido posible se ha utilizado información sobre datación de rocas por métodos radiométricos efectuados por el INDE en estudios anteriores.

FIGURA 7
COLUMNA LITOLÓGICA IDEALIZADA



Fuente: Investigación de campo; obtenido en ArcGis v. 9.3.

6.1.1 Lavas antiguas del volcán Cerro Quemado

Esta Unidad aflora al Noroeste del área, abarcando un 15% de está, aflora extensamente frente, en dirección Norte, a la plataforma de los pozos ZCQ-5, ZD-1 y ZD-2 (para ubicación de los pozos ver mapa de Geología Local en el anexo de este capítulo); es probable que estas lavas correspondan a la fase inicial de la formación del complejo dómico del Cerro Quemado durante el Pleistoceno tardío del periodo cuaternario.

Las rocas de esta Unidad presentan una textura porfídica con fenocristales de hornblenda y plagioclasas en una matriz de textura afanítica, compuesta principalmente por feldespato plagioclasa, cuarzo y biotita; en base a la composición mineralógica la litología de esta Unidad fue nombrada como Dacita Hornbléndica.

FOTOGRAFÍAS 11, 12 y 13 **AFLORAMIENTO DE LA UNIDAD LITOLÓGICA LAVAS** **ANTIGUAS DEL VOLCÁN CERRO QUEMADO**



Tomadas por: Délmar Villatoro, Año 2012.

La fotografía 11 muestra un afloramiento extenso de unos 100 m de largo por uno 14 m de alto, de la Unidad litológica lavas antiguas del volcán Cerro Quemado, además se observan dos acercamientos (fotografías 12 y 13), en la fotografía final se presenta una muestra de mano de este tipo de roca.

Esta Unida se encuentra en contacto discordante con las unidades lavas del Domo de Zunil, lavas del cerro El Galápagó, y lavas

del volcán Cerro Quemado, por tratarse de eventos volcánicos distintos.

En algunos afloramientos de esta Unidad de dacitas hornbléndicas, en zonas escarpadas, se observó un diaclasamiento del tipo disyunción columnar, esto a pesar de que este diaclasamiento se da principalmente en rocas basálticas, debido a tensiones cuando la lava se enfría, en la fotografía 14 se muestra uno de estos afloramientos.

FOTOGRAFÍA 14
DISYUNCIÓN COLUMNAR EN DACITAS
HORNBLÉNDICAS, DE LA UNIDAD LAVAS ANTIGUAS
DEL VOLCÁN CERRO QUEMADO



Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2012.

6.1.2 Lavas del Cerro el Galápago

El Cerro el Galápago se localiza al Sur del Complejo Dómico del Cerro Quemado, es un estratovolcán formado de lavas andesíticas, con alto contenido de plagioclasas y con fenocristales de piroxenos (andesita piroxénica) y una brecha tobácea, que se presumen fueron eruptados por el cráter de las Majadas.

En el área de estudio esta Unidad aflora en su extremo suroeste, en una ladera del cráter las Majadas, cubriendo aproximadamente el 10% del área, en contacto discordante con las lavas antiguas del volcán Cerro Quemado (mapa de Geología Local al final de este capítulo); debido a la elevada pendiente de la ladera donde aflora y a lo denso de la cubierta vegetal no se pueden obtener datos estructurales.

FOTOGRAFÍA 15 LADERA DEL CRÁTER LAS MAJADAS COMPUESTA POR LAVAS ANDESÍTICAS PIROXÉNICAS



Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2012.

6.1.3 Lavas de Zunil

Esta Unidad litológica aflora en la zona de investigación principalmente en la margen izquierda del río Samalá en el cañón formado por dicho río, al sureste del área, subyaciendo en contacto discordante a las lavas de la catarata de Zunil y a la unidad de depósitos piroclásticos.

La parte superior de la Unidad corresponde a una lava bastante compacta de composición andesítica de textura porfídica con fenocristales de hornblenda, la fotografía 16 muestra un afloramiento de esta Unidad litológica en la parte superior del cañón formado por el río Samalá, a la izquierda se observa un salto de agua.

FOTOGRAFÍA 16 AFLORAMIENTO DE LA UNIDAD LAVAS DE ZUNIL EN EL CAÑÓN FORMADO POR EL RÍO SAMALÁ



Tomada por: Axel Gutiérrez, Año 2011.

En la base de la Unidad se observó un fuerte fracturamiento, con tres familias de diaclasa con fracturas separadas entre 30 cm y 50 cm, lo que da como resultado bloques cúbicos; la fotografía 17 muestra un afloramiento de la Unidad litológica lavas de Zunil en el que se observa escape de gases, vapor y salmuera caliente por los planos de diaclasamiento.

FOTOGRAFÍA 17
AFLORAMIENTO DE LAS LAVAS DE ZUNIL EN EL QUE
SE OBSERVAN FUMAROLAS Y MANANTIALES DE
AGUAS TERMALES



Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2012.

En la mayoría, sino en todos, los afloramientos de las lavas de Zunil la roca se encuentra fuertemente alterada hidrotermalmente, de

color blanco grisáceo la cual ha perdido en muy buena parte su textura original, con alto contenido de materiales arenosos-arcillosos, productos principalmente de caolinización y cloritización, así como pirita en forma diseminada, carbonatos y sulfatos.

6.1.4 Lavas de la catarata de Zunil

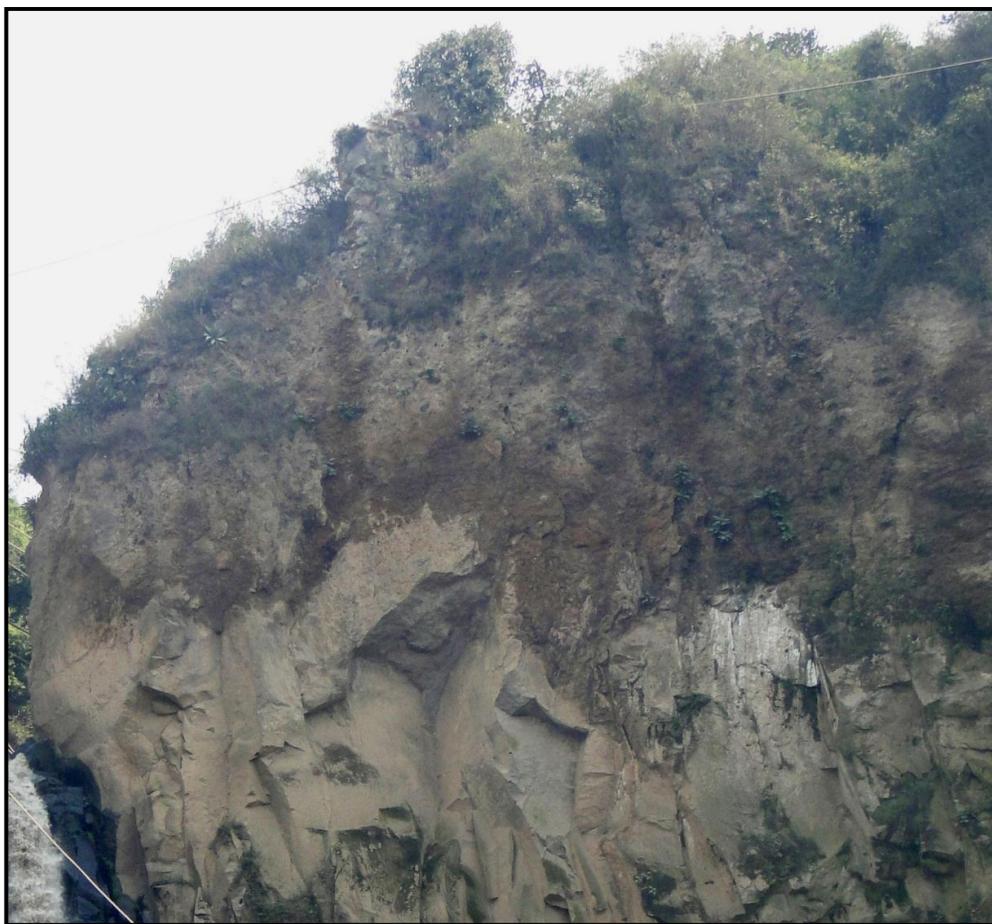
La topografía actual del Valle de Zunil, las cataratas y el cañón del río Samalá fue formada por la fuerte erosión de este río. Estas lavas cubrieron parte de las rocas Terciarias, las que están expuestas y forman la pared derecha del cañón del río Samalá hasta llegar a las cataratas de Zunil se les ha calculado un espesor total entre 100 m y 150 m.

Esta Unidad aflora en la base del cañón formada por el río Samalá y en el escarpe vertical formado por la catarata de Zunil, su contacto inferior no fue observado, aunque se ha inferido que se encuentran suprayaciendo en contacto discordante a las lavas de Zunil y se encuentra subyaciendo en contacto discordante a la unidad de coluvión antiguo; la fotografía 18 muestra la parte superior del escarpe de la catarata de Zunil, en esta se puede observar el contacto discordante entre las lavas de la catarata de Zunil y la Unidad de coluvión antiguo.

Los afloramientos de esta Unidad se encuentran moderadamente fracturados con entre 2 y 3 familias de fracturas, en general la roca se encuentra bastante consolidada con un grado de meteorización II (ligeramente meteorizado) es decir todo el conjunto rocoso está decolorado por meteorización, la decoloración indica alteración del material rocoso en superficie y de las superficies de discontinuidad.

La litología de esta Unidad se presenta compacta y corresponde a una andesita hornbléndica biotítica, aunque también se observan abundantes cristales de plagioclasas; también se observaron clastos de otras rocas de composición dacítica, las cuales debieron ser asimilados cuando la roca aún se encontraba fundida (lava).

FOTOGRAFÍA 18 AFLORAMIENTO EN EL ESCARPE DE LAS CATARATAS DE ZUNIL



Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2012.

En la fotografía 19 se observa la catarata de Zunil donde afloran las lavas con el mismo nombre, el escarpe tiene unos 70 m de

alto por unos 150 m de ancho; se observa un patrón de diaclasamiento en la parte superior del escarpe.

FOTOGRAFÍA 19 AFLORAMIENTO EN EL ESCARPE DE LAS CATARATAS DE ZUNIL



Tomada por: Leónidas Monterroso, Año 2012.

La fotografía 20 muestra un afloramiento de la lavas de la catarata de Zunil, en esta se observa la decoloración en la roca debido a la meteorización y también se pueden ver los clastos de otras rocas asimilados por la lava andesítica antes de su litificación.

FOTOGRAFÍA 20

AFLORAMIENTO DE LAS LAVAS DE LA CATARATA DE ZUNIL



Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2012.

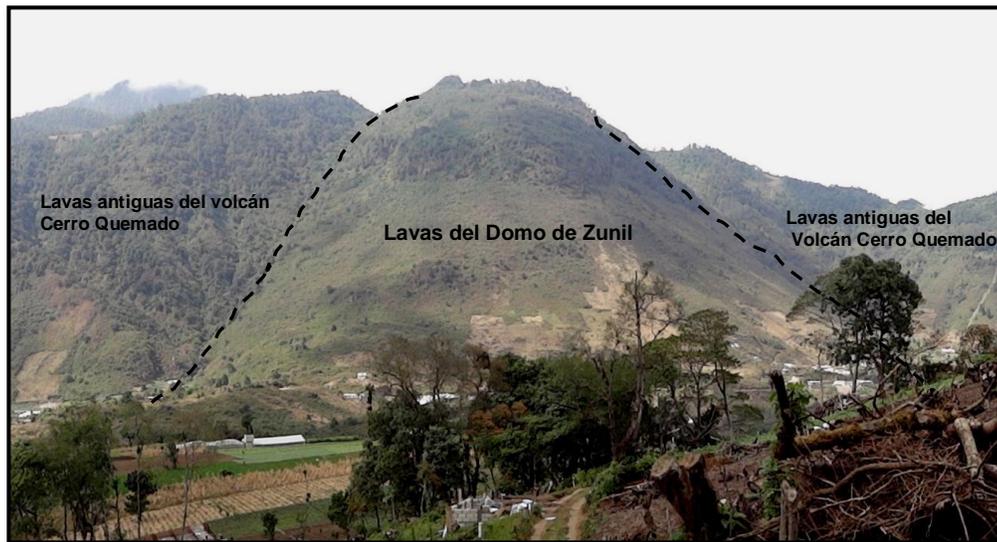
6.1.5 Lavas del domo de Zunil

La Unidad litológica nombrada informalmente como lavas del domo de Zunil forman la intrusión cómica que cubre la parte Norcentral del área de estudio, cubriendo aproximadamente 0,6 km² de esta. Este domo se encuentra intrusionando las lavas viejas basales del complejo cómico Cerro Quemado y la estructura actual de éste. Morfológicamente esta estructura es más joven que las lavas viejas que la rodean, conservando su forma original, la cual se observa en la fotografía 21.

En cuanto a su litología el domo de Zunil está constituido por lavas que han sido nombradas como dacitas hornbléndicas biotíticas, debido a la textura porfídica con fenocristales de hornblenda y biotita

en una matriz de textura afanítica compuesta principalmente por plagioclasa, cuarzo y biotita

FOTOGRAFÍA 21 PANORÁMICA DEL DOMO DE ZUNIL



Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2012.

6.1.6 Lavas del volcán Cerro Quemado

El complejo dómico Cerro Quemado se formó a partir de grandes acumulaciones de lava viscosa que probablemente emergió por numerosos focos eruptivos. Todo este material lávico ha venido depositándose sobre rocas Terciarias pre-existentes.

Este complejo dómico ha tenido al menos tres episodios de actividad volcánica durante el periodo cuaternario; la primera y que se cree que se trata de su fase inicial de formación corresponde a la unidad que fue nombrada informalmente en esta investigación como lavas antiguas del domo de Zunil, la cual se describió anteriormente, la segunda fase correspondería a la que se nombro como lavas del Volcán Cerro Quemado para la que no se tiene una datación

radiométrica y la más reciente en 1818, la cual no se describe en este capítulo por estar fuera del área de estudio.

Las lavas expulsadas durante la segunda fase de erupción han sido nombradas informalmente como lavas del volcán Cerro Quemado, estas se encuentran suprayaciendo en contacto discordante a las lavas antiguas del volcán Cerro Quemado (primera fase), cubriendo aproximadamente 0,7 km² del área de estudio en el límite Noroeste.

FOTOGRAFÍA 22 PANORÁMICA DEL COMPLEJO DÓMICO CERRO QUEMADO



Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2012.

Litológicamente la Unidad de lavas del volcán Cerro quemado (segunda fase) corresponde a una andesita de textura afanítica, con alto contenido de cristales de hornblenda y plagioclasas, menos abundantes biotita y minerales ferromagnesianos.

6.1.7 Coluvión antiguo

Los movimientos de ladera especialmente deslizamientos y derrumbes, se han dado a lo largo de la historia geológica de la zona de investigación; dentro de la Unidad de coluvión antiguo se agruparon depósitos coluviales que debido al tiempo y compactación (aumento de presión y temperatura) sufriendo un proceso de litificación; es decir convertidos a roca. Es este el principal criterio para separarlos de los depósitos coluviales recientes, los cuales se tratan de bloques angulares sueltos, sin cementación, y con ausencia de matriz.

Litológicamente esta Unidad consiste de bloques de andesitas y dacitas, con presencia de escoria volcánica, dentro de una matriz de grano más fino (matriz-soportados), sin clasificación es decir con una gran variedad de tamaños que van desde varios centímetros hasta 2 metros de diámetro y de forma subangular algunas veces y redondeadas otras.

Esta Unidad cubre aproximadamente 3,4 km², casi la mitad del área de estudio, y se encuentra en contacto discordante cubriendo las unidades de lavas antes descritas y subyaciendo a la unidad de depósitos pomáceos y a los depósitos coluviales y aluviales recientes.

La fotografía 23 muestra un afloramiento de la Unidad de coluvión antiguo, en un escarpe en el que se tiene un nacimiento de agua fría, en esta fotografía se observa la variabilidad en el tamaño de los bloques y que estos se encuentran matriz soportados (bloques y fragmentos líticos dentro de una matriz de grano más fino), en una roca compacta.

FOTOGRAFÍA 23 AFLORAMIENTO DE LA UNIDAD DE COLUVIÓN ANTIGUO



Tomada por: Leónidas Monterroso, Año 2012.

Esta Unidad de coluvión antiguo también ha sido afectada en algunos sitios por la alteración hidrotermal, principalmente por caolinización convirtiendo la matriz en un material arenoso de color blanco y en los bloques es difícil establecer la textura original y presentan una coloración blanco grisáceo (fotografía 24).

FOTOGRAFÍA 24 AFLORAMIENTO DE LA UNIDAD DE COLUVIÓN ANTIGUO ALTERADA HIDROTERMALMENTE



Tomada por: Axel Gutiérrez, Año 2011.

6.1.8 Depósitos piroclásticos

Esta Unidad aflora principalmente al Noreste del área de estudio, cubriendo unos 2 km² de esta, estos depósitos pomáceos se encuentran en contacto discordante cubriendo a las otras Unidades litológicas; en esta Unidad se ha agrupado todo el material piroclástico de composición ácida, en base a su contenido de sílice; con tamaños que van desde lapilli a cenizas, que se ha depositado ya sea rellenado antiguos valles o cubriendo las partes más altas (fotografía 25).

Incluye pómez de origen diverso y terrazas aluviales de conglomeráticas a arenosas sin clasificación, sueltas o pobremente consolidadas; las cuales no pueden diferenciarse en la escala del

mapa. El espesor de esta Unidad es muy variable, éste puede variar desde unos pocos metros hasta centenas de metros cuando se encuentra relleno de accidentes topográficos.

FOTOGRAFIA 25 DEPÓSITOS POMÁCEOS CUBRIENDO LA PARTE MÁS ALTA Y CON MENOR PENDIENTE DE LA LADERA



Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2012.

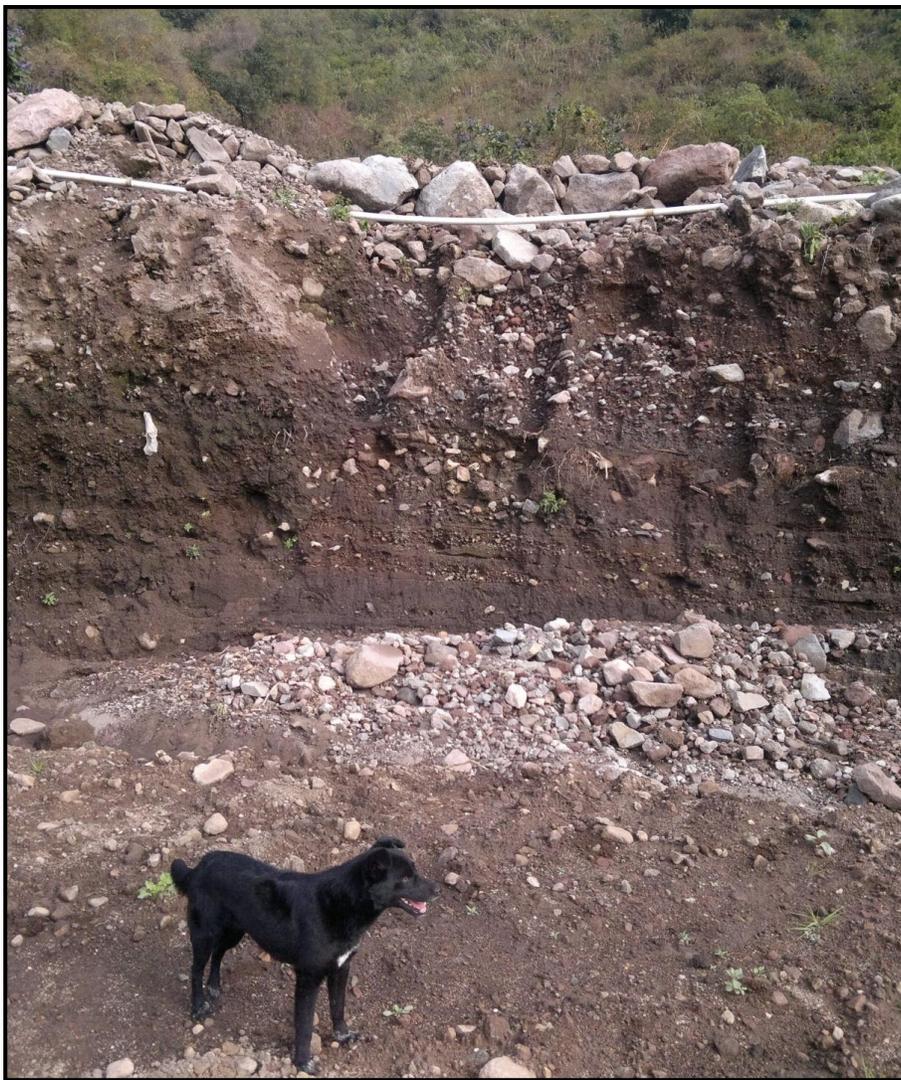
En la fotografía 25 se observa la Unidad de depósitos pomáceos en la parte más alta y de menor pendiente de la ladera, estas zonas son utilizadas para la siembra de hortalizas, que constituyen la mayor fuente de ingresos de la región; por aparte en la parte inferior derecha de esta fotografía se observa un deslizamiento sobre esta Unidad debido a lo poco consolidado de estos depósitos.

6.1.9 Abanico aluvial antiguo y reciente

En esta Unidad litológica se agrupan los depósitos de abanico aluvial depositados de forma periódica por el flujo de derrubios de una

quebrada que baja por una ladera al norte de la plataforma del pozo ZCQ-2 y que vistos en planta presentan una forma característicamente cónica; estos depósitos se encuentran compuestos por una mezcla mal clasificada de bloques de roca (andesita y dacita principalmente), gravas, arenas, suelos y materia orgánica.

FOTOGRAFIA 26
DEPÓSITOS DE ABANICO ALUVIAL, MATERIAL
DEPOSITADO DURANTE DEPRESIÓN TROPICAL 12E



Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2012.

Estos depósitos son el resultado de un cambio abrupto en la pendiente del terreno de zonas con alta pendiente a zonas relativamente planas, en este caso los flujos de derrubios bajan por la ladera Sureste del volcán Cerro Quemado y se depositan en forma de abanico en la plataforma del pozo ZCQ-2, esto se ha venido dando a lo largo del tiempo por lo que se han diferenciado depósitos antiguos de mayor dimensión subyaciendo a depósitos recientes que cubre menor área.

La fotografía 26 muestra un corte hecho por una retroexcavadora mientras se retiraba el material depositado en la plataforma del pozo ZCQ-2 (ver mapa en el anexo del capítulo), este depósito de al menos 2 metros de espesor fue consecuencia de la depresión tropical 12E fenómeno ocurrido en octubre de 2011.

6.1.10 Coluvión reciente

Dentro de esta Unidad litológica se agrupan los depósitos de talud consecuencia de movimientos de ladera (deslizamientos) acumulados recientemente; en cuanto a su litología esta unidad consiste de bloques sueltos de andesitas y dacitas, sin clasificación es decir con una gran variedad de tamaño y de forma subangular, al igual que las demás unidades que afloran en el área de estudio, esta se presenta en varias ocasiones alterada hidrotermalmente.

Los contactos de esta Unidad son discordantes y se encuentra sobreyaciendo a las otras unidades litológicas. En la fotografía 27 se muestra un afloramiento de la Unidad de coluvión reciente donde se observa la variedad en el tamaño de los clastos y la forma subangular de estos, además cabe destacar lo poco consolidado de esta unidad lo que facilita que los bloques puedan ser redepositados por procesos

fluviales originando flujos de derrubios que pueden llegar a ocasionar daños en la infraestructura del campo geotérmico Zunil I.

FOTOGRAFIA 27 DEPÓSITOS COLUVIALES RECIENTES



Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2011.

6.1.11 Aluvión reciente

Esta Unidad la integra el material de bloques, gravas, arenas, arcillas y suelos de origen volcánico en forma suelta o bien, formando conglomerados arenosos pobremente consolidados y sin clasificación, que han sido depositados en el Valle de Zunil y en ambas márgenes del río Samalá. En el Valle de Zunil las terrazas aluviales tienen aproximadamente un espesor de 15 a 10 m.

La fotografía 28 muestra un depósito aluvial en la margen izquierda del río Samalá, al Sureste del área de estudio, en los estratos se observa una gradación en los detritos de gruesos en la base a finos hacia el tope, iniciando la siguiente secuencia de deposición

nuevamente con derrubios gruesos en la base, además se observa estratificación cruzada.

FOTOGRAFIA 28
DEPÓSITOS ALUVIALES RECIENTES EN LA MARGEN
IZQUIERDA DEL RÍO SAMALÁ



Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2012.

Depósitos aluviales de limo y arcillas se depositan en las planicies de inundación del río Samalá, cuando este se desborda, estos terrenos son aprovechados para el cultivo de hortalizas, la fotografía 29 muestra algunas de estas planicies de inundación.

FOTOGRAFIA 29 PLANICIES DE INUNDACIÓN DEL RÍO SAMALÁ



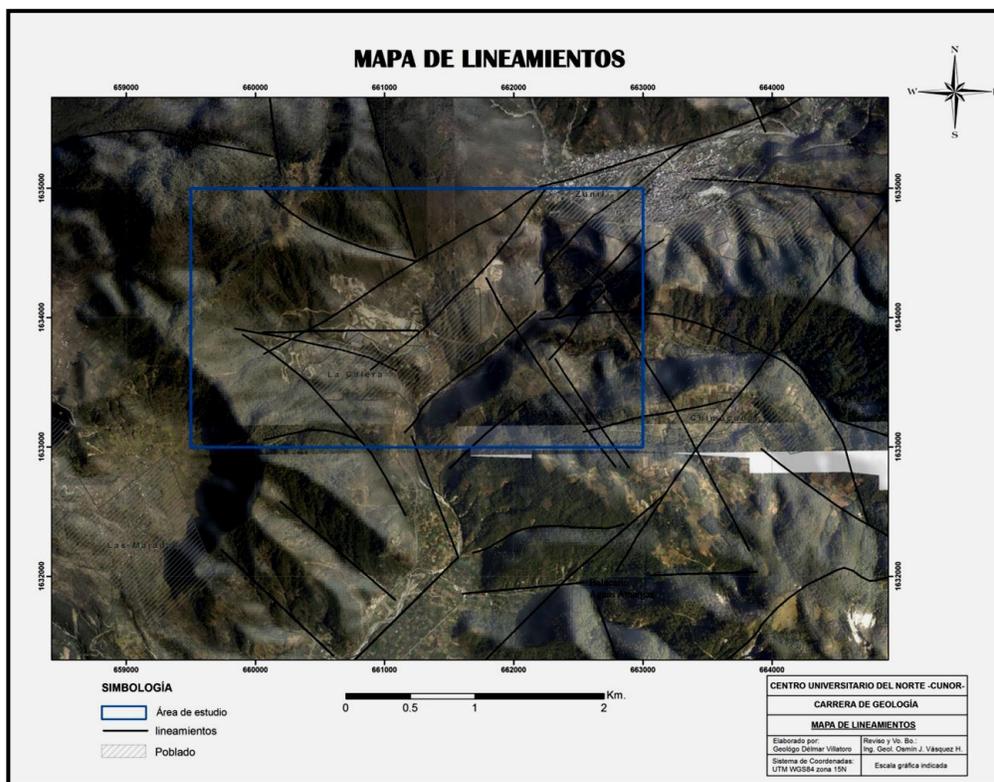
Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2012.

6.2 Geología estructural local

6.2.1 Lineamientos

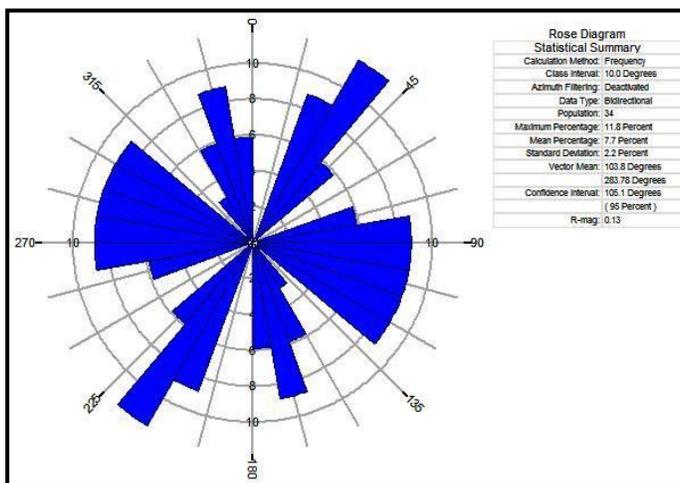
En base al análisis de fotografías aéreas y modelos tridimensionales con ortofotos, se elaboró el mapa de lineamientos para la zona de estudio, en este mapa se puede observar que dentro del área de investigación se tienen tres sistemas estructurales principales, el sistema NE-SO, otro NO-SE y el sistema E-O; como complemento del análisis anterior se plotearon los rumbos de los lineamiento (figura 8). El Sistema NE-SO (llamado aquí Sistema del Samalá) se considera el sistema estructural principal en la zona.

MAPA 10 MAPA DE LINEAMIENTOS



Fuente: Investigación de campo; obtenido en ArcGis v. 9.3.

FIGURA 8 DIAGRAMA DE ROSAS QUE MUESTRA EL RUMBO DE LOS LINEAMIENTOS OBSERVADOS EN LA ZONA



Fuente: Investigación de campo; obtenido en Rockworks v. 14.

6.2.2 Diaclasas

En los afloramientos de las unidades litológicas compuestas por lavas se observaron entre 2 y 3 familias de diaclasas, lo que da como resultado que las rocas queden fracturadas en cubos, lo que facilita el desprendimiento de estas; la fotografía 30 presenta un ejemplo de lo anterior en la unidad de lavas de Zunil.

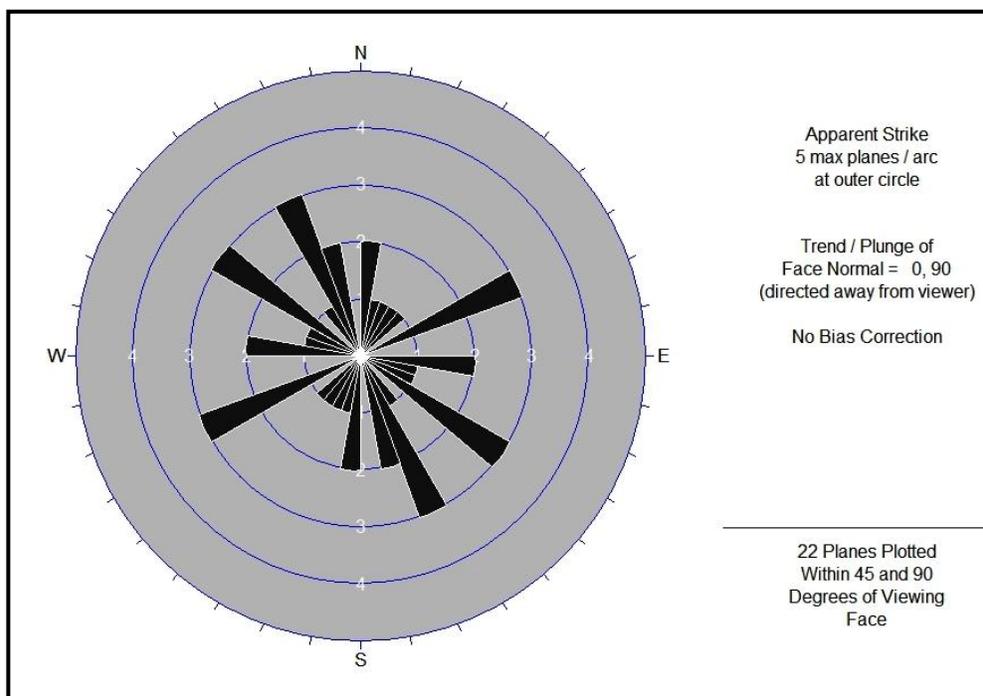
La dirección preferencial de las fracturas se muestra en la figura 9 con una orientación NO SE perpendicular al sistema estructural principal, además se encuentran fracturas con una orientación NE- SW y otras en dirección N S, aunque estas dos orientaciones son menos frecuentes.

FOTOGRAFÍA 30 AFLORAMIENTO EN EL QUE SE OBSERVA EL PATRÓN DE DIACLASAMIENTO DE LAS LAVAS DE ZUNIL



Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2012.

FIGURA 9
DIAGRAMA DE ROSA QUE MUESTRA EL RUMBO DE
LOS PATRONES DE DIACLASAMIENTO



Fuente: Investigación de campo; obtenido en *Rockworks v. 14*.

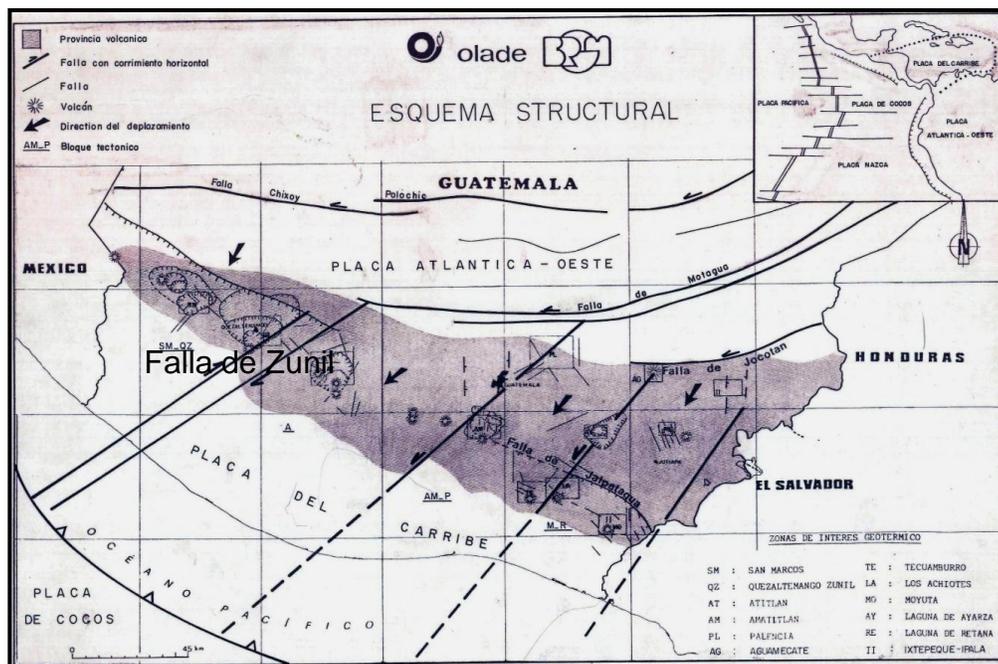
6.2.3 Fallas

El área geotérmica de Zunil está localizada en la intersección de dos zonas de falla principales que son: el sistema de fallas de Zunil (sistema NE-SO), consecuencia de la subducción de la placa de Cocos bajo la placa del Caribe; y el sistema de fallas del borde de caldera Sur (sistema NO-SE), de la caldera de Quetzaltenango; además se observó un tercer sistema (sistema E-O) menos representativo que los dos principales.

En la figura 10 Esquema estructural para Guatemala, se puede observar la zona de subducción frente a las costas de Guatemala en la que la placa de Cocos subduce bajo la placa del Caribe, debido a esta subducción la placa del Caribe se encuentra fragmentada en

segmentos, estos segmentos se separan unos de otros por medio de fallas de rumbo con componentes normales; de este hecho el segmento más occidental de Guatemala se separa del segmento central por medio de la falla de Zunil; este esquema además muestra las principales zonas de interés geotérmico en Guatemala.

FIGURA 10
ESQUEMA ESTRUCTURAL PARA GUATEMALA



FUENTE: Tomado de OLADE

La franja de fallas paralelas de orientación NE-SO (sistema de fallas de Zunil), de movimiento transcurrente izquierdo, posee 10 km. de ancho entre el volcán Zunil y el Cerro Quemado. Este sistema forma un conjunto de grabens y horsts. Evidencias de este sistema son la serranía que limita a los pozos del NO del campo y la orientación del río Samalá. También el alineamiento de fumarolas, zonas de alteración, manantiales calientes, anomalías de mercurio y gradientes gravimétricos pronunciados cercanos a los pozos ZCQ-5, ZCQ-4 y ZCQ-2 refleja la zona de falla de Zunil.

En cuanto al sistema de fallas NO-SE que es casi perpendicular al de la falla de Zunil, se cree que se encuentra relacionado con fallas producidas debido al colapso de la caldera de Quetzaltenango, esto debido a que el área de estudio se encuentra en el límite Sur de dicha caldera. El sistema de orientación E-O está cortando a los otros dos sistemas, evidenciado por el cañón que atraviesa el campo geotérmico, el cual es evidente desde la carretera principal hasta inmediaciones de la Central Geotérmica y el pozo ZCQ3.

FOTOGRAFÍA 31
FRACTURA DEBIDO A DEFORMACIÓN FRÁGIL,
CONSECUENCIA DE LA FALLA DE ZUNIL



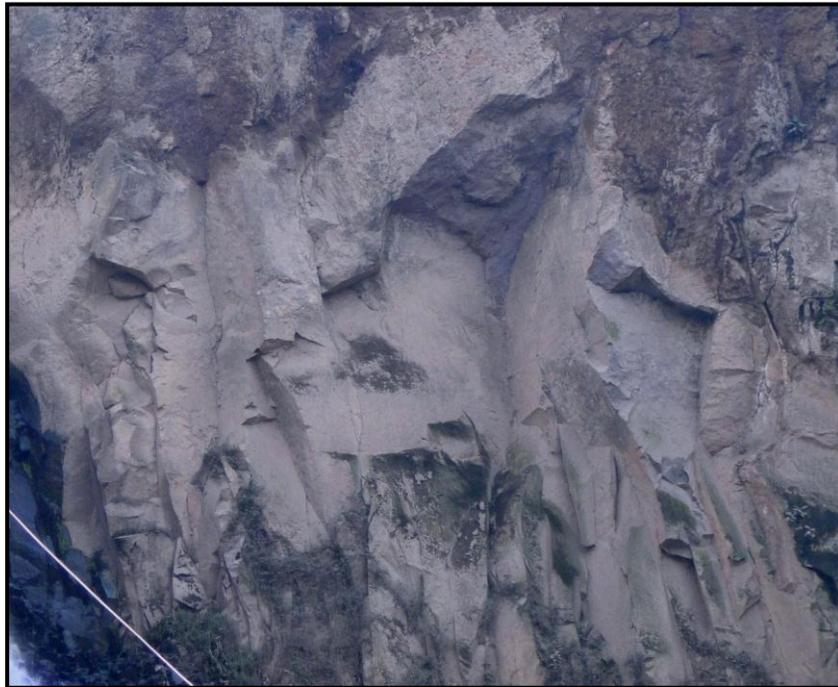
Tomada por: Leónidas Monterroso, Año 2012.

Los sistemas de fallas que atraviesa el campo geotérmico Zunil I en zonas superficiales de la corteza, producen en las rocas una deformación de tipo frágil, fracturándolas, por estas fracturas se da el escape de agua tanto líquida como vapor y de gases (sulfhídrico y dióxido de carbono principalmente), lo cual cambia las propiedades geomecánicas de las rocas; como evidencia de esto se tienen zonas de alteración hidrotermal con presencia de fumarolas y manantiales de aguas termales alineados en dirección NE-SO; la fotografía 31 muestra una de estas zonas de alteración Hidrotermal conocida como el Azufral.

Las fallas además contribuyen a la inestabilidad de los macizos rocosos creando planos o superficies de rotura por los que se desprenden bloques de roca (fotografía 32).

FOTOGRAFÍA 32

ROTURA EN CUÑA A FAVOR DEL PLANO DE FALLA



Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2012.

6.3 Alteración hidrotermal

En base a estudios geocientíficos y perforación de pozos realizados por INDE se estableció que el área de estudio se encuentra dentro de una zona geotérmica, con los siguientes elementos:

La fuente de calor es la cámara magmática del complejo dómico Cerro Quemado; un acuífero profundo en la zona de contacto entre las lavas y el intrusivo del basamento; la zona se encuentra afectada por dos sistemas de fallas principales que se interceptan que son la falla de Zunil y la falla del borde de caldera, fracturado las rocas y aumentando considerablemente su permeabilidad; una capa sello constituida por materiales arcillosos producto de la alteración hidrotermal.

Como resultado de lo expresado en el párrafo anterior en superficie se tienen zonas de alteración hidrotermal, dentro del campo geotérmico se observaron alineadas con la falla de Zunil es decir con una orientación NE-SO, y también se observaron manifestaciones hidrotermales en ambos márgenes del río Samalá (ver mapa de geología local en el anexo de este capítulo). En la fotografía 33 se muestra parte de la zona de alteración hidrotermal conocida como el Azufral, dentro del campo geotérmico Zunil I.

La alteración hidrotermal en superficie en el área de estudio puede ser de manera general caracterizada como argílica avanzada; los minerales secundarios se encuentran como una alteración penetrante que ha afectado la matriz vítrea o afanítica y los fenocristales de las rocas volcánicas y como venamiento de relleno.

Este tipo de alteración está caracterizada por los arreglos de esmectita, caolín, cuarzo, calcedonia, calcita, clorita y en menor grado hematita. Los minerales de arcilla aparecen principalmente como productos de alteración de la matriz de grano fino de las rocas volcánicas, la calcita se

ha encontrado principalmente como un sustituto de la plagioclasa y fenocristales de clinopiroxeno y cuarzo se ha observado en forma de venas y rellenando cavidades amigdaloides.

En la zona de investigación son abundantes las manifestaciones hidrotermales, se mapearon 38 fumarolas y aproximadamente 24 manantiales de agua caliente, además se observó deposición de sílice y carbonatos, cristales de azufre y lodos hirvientes. En las fotografías de la 34 a la 37 se observan algunos ejemplos de manifestaciones hidrotermales en el área de estudio.

FOTOGRAFÍA 33

ZONA DE ALTERACIÓN HIDROTHERMAL “EL AZUFRAL”



Tomada por: Leónidas Monterroso, Año 2012.

FOTOGRAFÍA 34
MANANTIAL HIDROTHERMAL



Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2012.

FOTOGRAFÍA 35
FUMAROLA CON CRECIMIENTO DE CRISTALES DE AZUFRE



Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2012.

FOTOGRAFÍA 36
DEPOSITACIÓN DE MINERALES CARBONATICOS DEBIDO
AL FLUJO HIDROTHERMAL

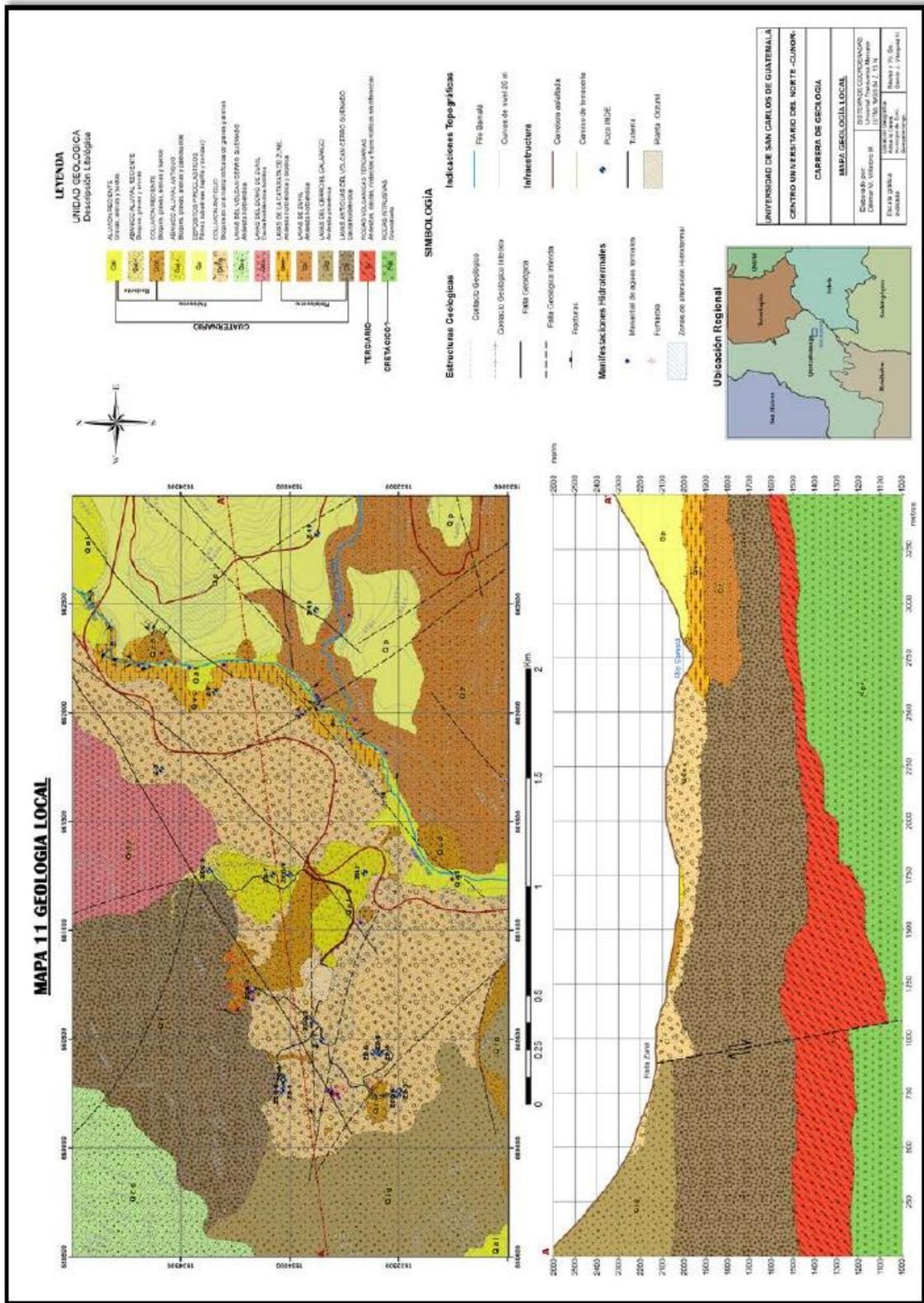


Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2012.

FOTOGRAFÍA 37
CAOLINIZACIÓN EN ROCAS VOLCANICAS COMO
RESULTADO DE ALTERACIÓN HIDROTHERMAL



Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2012.



CAPÍTULO VII

INVENTARIO DE MOVIMIENTOS DE LADERA

Como consecuencia de la interacción de distintos procesos geológico tanto exógenos como endógenos, los movimientos de ladera son un fenómeno recurrente en la zona de investigación, esto se pudo constatar en el trabajo de campo, evidenciado por depósitos de talud de diferentes eventos superpuestos uno sobre el otro; recientemente, con la lluvia como factor desencadenante, han ocurrido algunos deslizamientos y flujos de derrubios que han dañado seriamente la infraestructura del campo geotérmico, estos fueron presentados como antecedentes en el capítulo 1.

FOTOGRAFÍA 38 AFLORAMIENTO ESCARPADO DE DEPÓSITOS DE TALUD DE DISTINTOS EVENTOS



Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2012.

En la fotografía 38 se muestra un afloramiento escarpado, a orillas de la carretera, en este afloramiento se observan estratificados depósitos de talud de al menos dos eventos distintos de movimientos de ladera, ocurridos a través del tiempo geológico en el área de estudio, la coloración blanca es resultado de la alteración hidrotermal de tipo argílica.

7.1 Mapa del inventario de movimientos de ladera

Uno de los objetivos específicos de la presente investigación lo constituye la elaboración del inventario de movimientos de ladera para el área de estudio, esto se debe a que el análisis de susceptibilidad se basa en la correlación entre factores condicionantes y los movimientos en masa que puedan ser inventariados; de ese hecho el presente capítulo tiene como finalidad presentar el mapa del inventario de movimientos de ladera final.

Para la realización del inventario se tuvieron dos fases: una de gabinete en la que se partió de la identificación de movimientos de ladera en fotografías aéreas, las cuales se tenían para dos fechas distintas una tomada en el año 1977 y las otras del año 1999, seguido de esto se realizó el mismo procedimiento solo que esta vez utilizando ortofotos del año 2007 las cuales fueron cargadas en el programa *Arc Gis 9.3*; una vez terminado el trabajo de gabinete se inicio con el trabajo de campo, en el cual se utilizó la ficha para evaluación de movimientos de ladera que se presenta en el anexo 2.

A partir del análisis de fotografías aéreas, ortofotos y levantamiento en campo, se identificaron 78 movimientos de ladera siendo los deslizamientos rotacionales y los flujos de detritos (lahares) los principales tipos de movimientos en la zona. En el mapa del inventario de movimientos (Mapa 12) de ladera que se presenta al final del presente capítulo se observa la distribución espacial de los movimientos en masa en el área.

En base a esta investigación se han determinado cuatro movimientos de ladera como los que, durante el desarrollo del campo geotérmico Zunil I, mayores daños han causado a la infraestructura de este.

Dos de estos son deslizamientos rotacionales que pese a haber alcanzando un cierto equilibrio en sus laderas, la acumulación de depósitos de talud inconsolidados al pie de estos pueden repercutir, activados por fuertes lluvias, en flujos de derrubios.

Los otros dos movimientos son flujos de detritos que incluyen lodos, arena, grava, bloques de roca y materia orgánica, los cuales se dan de forma periódica activados por lluvias torrenciales.

En el anexo 5 de este informe se presenta una caracterización de cada uno de estos movimientos de ladera, basada en la ficha de campo que se muestra en el anexo 2.

CAPÍTULO VIII

DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES CONDICIONANTES

Como se mencionó en la metodología el análisis de susceptibilidad se basa en el análisis de correlación entre factores condicionantes y movimientos de ladera. Como factores condicionantes se designa a aquellos intrínsecos del sistema que controlan o condicionan la ocurrencia de los procesos de movimientos en masa.

Aunque la cantidad de factores condicionantes puede ser elevada, en base a observaciones en campo, en las que se determinó que habían ciertos factores intrínsecos al terreno que se repetían o que coincidían en las zonas donde habían ocurrido movimientos de ladera, es decir los movimientos se dan principalmente en lugares donde se tiene una geomorfología abrupta, con pendientes mayores a 30°, con rocas fracturadas y alteradas hidrotermalmente, en zonas con poca o ninguna cubierta vegetal.

Por lo que según la experiencia del investigador y la consulta de estudios similares realizados por especialistas en el tema, se definieron los siguientes factores condicionantes a ser considerados en la presente investigación: pendiente del terreno, orientación de laderas, unidades geomorfológicas, litología, alteración hidrotermal y usos del suelo.

Una vez determinados los factores condicionantes que intervendrán en nuestro análisis, se procedió a dividirlos en 4 categorías, donde 4 es la categoría que corresponde a una muy alta susceptibilidad a movimientos de ladera, 3 a

una alta susceptibilidad, 2 a una susceptibilidad moderada y finalmente 1 que corresponde a una baja susceptibilidad.

Los factores condicionantes y la forma en quedaron divididos en cuatro categorías se muestra en la tabla 4 Factores condicionantes y categorías, que se presenta a continuación; posterior a esto se presenta una descripción de la influencia de cada factor en la ocurrencia de movimientos de ladera y los criterios utilizados para su categorización y en el anexo 4 “Mapas de los factores condicionantes” se incluyen los mapas para cada factor condicionante dividido en las cuatro categorías; para los mapas de unidades geomorfológicas y usos del suelo se presentan también los mapas antes de ser clasificados, para el mapa de unidades litológicas únicamente se presenta el mapa clasificado, debido a que el mapa de unidades litológicas se basa en el mapa de geología local que se incluye en el capítulo VI.

TABLA 4 FACTORES CONDICIONANTES Y CATEGORÍAS

FACTOR CONDICIONANTE	COD	CATEGORIA	EXPLICACION
Pendientes (obtenido del Mapa topográfico con curvas de nivel cada 20 metros)	1	0° a 15°	30° se considera el umbral a partir del cual aumenta considerablemente la susceptibilidad. Los 50° representan una pendiente superior al 100%.
	2	16° a 30°	
	3	31° a 50°	
	4	> 50°	
Orientaciones de laderas (obtenido del Mapa topográfico con curvas de nivel cada 20 metros)	1	Norte (N315-N45)	Las orientaciones representan los cuatro puntos cardinales.
	2	Sur (N135-N225)	
	3	Este (N45-N135)	
	4	Oeste (N225-N315)	
Geomorfológico (elaboración propia en base a observaciones de campo y ortofotos del 2008)	1	Cima, terrazas aluviales, abanico aluvial, planicie de inundación, planicie volcánica, llanura aluvial	Las unidades definidas se agrupan en categorías con similares características del terreno. Así por ejemplo, las zonas de planicie, los conos aluviales y las terrazas se agrupan conjuntamente.
	2	Ladera de baja pendiente, Domo lávico o volcánico	
	3	Ladera de media pendiente.	
	4	Escarpe, ladera de alta pendiente, deslizamiento, flujo de detritos	
Litológico (elaboración propia en base a observaciones de campo)	1	Depósitos aluviales (Qal)	Las unidades definidas se agrupan en categorías con similares características litológicas, se incluye el grado de fracturación.
	2	Lavas del volcán Cerro Quemado (Qcq), Lavas del Domo de Zunil (Qdz), Lavas de Zunil (Qz), Lavas de la catarata de Zunil (Qvc) Depósitos de Abanico aluvial antiguo (Qal-a)	
	3	Lavas de El Galápagos (Qlg), Lavas antiguas del volcán Cerro Quemado (Qv), (Depósitos Piroclásticos (Qp), Depósitos coluviales antiguos (Qco-a)	
	4	Depósitos de abanico aluvial reciente (Qal-r) y depósitos coluviales recientes (Qco)	
Alteración hidrotermal (elaboración propia en base a observaciones de campo)	1	No alterado: no presenta alteración hidrotermal	Las unidades litológicas se agrupan en categorías según el grado de alteración hidrotermal observada.
	2	Alterado: roca presentando alteración hidrotermal, pero aun se reconoce la roca original.	
	3	Muy alterado: no es posible o es muy difícil identificar el tipo de roca original.	
	4	Completamente alterado: solo se observan productos de alteración.	
Uso de suelo (elaboración propia en base a observaciones de campo y ortofotos del 2008)	1	Poblado disperso, zona industrial,	Clasificación informal de uso del suelo enfocada a ser usada en el mapa de susceptibilidad.
	2	Bosque denso, bosque poco denso	
	3	Arbustivo, cultivos	
	4	Sin vegetación	

FUENTE: Investigación de campo.

7.1 Pendiente del terreno

Este es un mapa temático que mediante un sistema gráfico, representa los diferentes grados de pendiente de un terreno, agrupando mediante colores zonas del territorio con pendiente semejante; la pendiente topográfica es la inclinación de una superficie con respecto a la horizontal. Para la zona del campo geotérmico Zunil I se tomo como base el DEM 50 para la republica de Guatemala del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y a partir de este se generó el mapa de pendientes, que se observa al final del presente capítulo.

Como se indico en la tabla 5, las ponderaciones o categorías van de 1 a 4, siendo 1 la ponderación para pendientes menores a 15° , 2 para pendientes entre 15° y 30° , 3 para pendientes de 31° a 50° y 4 para las pendientes mayores a 50° . En esta ponderación se considera que 30° es el umbral a partir del cual aumenta considerablemente la susceptibilidad y la pendiente de 50 grados representan una pendiente superior al 100%.

En el mapa de pendientes (anexo 3), se observa como las laderas al Oeste del área de estudio, y que la recorren en dirección NE-SO, presentan una pendiente de entre 30° y 50° , a este rango de pendiente se la ha asignado una categoría de 3 con una susceptibilidad alta a presentar movimientos de ladera, esta zona es la que representa el mayor riesgo para la infraestructura del campo geotérmico (tubería, plataformas de pozos, instalaciones de la planta etc.).

Laderas con el mismo rango de pendientes se observan a ambos márgenes del río Samalá, donde incluso se observan laderas con pendientes superiores a los 50° , en esta zona se encuentran varias fumarolas y manantiales de agua caliente, los cuales son puntos de muestreo geoquímico por parte del INDE.

En sí la zona ocupada por la planta de energía Geotérmica se localiza en una zona relativamente plana, pero al estar rodeada, por lo menos en parte, por las laderas antes mencionadas, se convierte en el sitio donde se acumularían los depósitos de talud provenientes de estas laderas.

7.2 Orientación de laderas

La orientación de las laderas determina el grado de insolación de éstas así como la Erosión eólica, en función de la dirección de los vientos. Cuanto mayor sea la insolación, mayor será la evaporación del agua, cuya presencia tiene un efecto negativo en cuanto a la estabilidad de un terreno.

Por otra parte tiene un efecto positivo indirecto, ya que el aumento de la humedad da lugar a una vegetación más intensa, y ésta proporciona una mayor estabilidad, amortiguando el efecto de la gota de lluvia y absorbiendo parte del agua caída disminuyendo así la escorrentía superficial, además aporta una mayor cohesión al terreno con sus raíces; sin embargo como la vegetación ha sido considerada como un factor aparte y evaluada en el mapa de uso de suelo, se considera únicamente el efecto negativo de la insolación.

Al tomarse solo el efecto negativo debe de considerarse que las laderas más expuestas a la insolación son las orientadas al Este y las orientadas al Oeste, siendo este efecto menos importante en las laderas orientadas hacia el Norte y Sur, debido al movimiento de la tierra de rotación. Considerando este efecto de insolación se determinaron los siguientes rangos: Rango 1 Norte (N315-N45); Rango 2 Sur (N135-N225); Rango 3 Este (N45-N135) y Rango 4 Oeste (N225-N315).

En el mapa que se incluye en el anexo 4 se presenta la distribución espacial de la orientación de las laderas dentro del área de estudio, se observa una predominancia de las laderas orientadas hacia el Este y laderas

orientadas hacia el Sur, nuevamente las laderas al Oeste de la zona son las que presentan una incidencia alta en la susceptibilidad a presentar movimientos de ladera al orientarse hacia el Este, ya que debido a esta orientación se encuentran más expuestas a la insolación.

7.3 Unidades geomorfológicas

La geomorfología en el área de estudio se presenta abrupta, presentando zonas escarpadas y laderas de alta pendiente superiores a los 30°, y una diferencia de altitud que van de los 1860 m.s.n.m. hasta los 2880 m.s.n.m., además el río Samalá a formado cañones escarpados en su cauce, las únicas partes planas corresponden a lugares donde tiene o ha tenido lugar la acumulación de depósitos aluviales o depósitos de talud.

Las formas del terreno también controlan la susceptibilidad de este a presentar movimientos en masa, estas formas se encuentran controladas por la pendiente y la ocurrencia de procesos geológicos exógenos activos (meteorización, erosión, depositación, etc.) principalmente.

Las unidades geomorfológicas definidas para el área de estudio y que pueden observarse en el mapa que se incluye en el anexo 4 han sido agrupados en los siguientes rangos de susceptibilidad principalmente en base a la pendiente de cada unidad:

Baja susceptibilidad (Rango 1): Cima, terrazas aluviales, abanico aluvial, planicie de inundación, planicie volcánica, llanura aluvial. Estas unidades son las que presentan la menor pendiente dentro del área de estudio y aunque se encuentran formadas en su mayoría por material inconsolidado los procesos de erosión son menos intensos, por lo que se consideraron con una susceptibilidad baja a presentar movimientos de ladera.

Susceptibilidad moderada (Rango 2): Ladera de baja pendiente, Domo volcánico. Las laderas de baja pendiente presentan una inclinación menor al 10%, siendo estas por lo tanto menos susceptibles a los movimientos en masa. Por su parte el domo volcánico Cerro Quemado se encuentra en el extremo suroccidental del área y no presenta una pendiente de baja a media por lo que también se incluyó en esta categoría.

Alta Susceptibilidad (Rango 3): Ladera de media pendiente. En estas laderas la pendiente se encuentra entre el 10 y el 30%, por lo que ya presentan una susceptibilidad a presentar movimientos gravitatorios.

Muy alta susceptibilidad (Rango 4): Escarpe, ladera de alta pendiente, deslizamiento, flujo de detritos. En este rango se han agrupado las unidades morfológicas que presentan una mayor pendiente con pendientes superiores al 30%, además tanto los escarpes como las laderas de alta pendiente se sitúan en las partes más altas, en donde se capta la mayor parte del agua de lluvia por lo que se encuentran más expuestas a la meteorización. En cuanto a las cicatrices de deslizamientos y las quebradas por donde bajan los flujos de detritos, se colocaron en este rango debido a la intensidad de los procesos de erosión y transporte de material inconsolidado que se da en estas unidades.

En el anexo 4 “Mapas de los factores condicionantes” además del mapa de unidades geomorfológicas también se incluye un mapa de las unidades geomorfológicas clasificadas en los cuatro rangos de susceptibilidad, que se describieron anteriormente.

7.4 Unidades litológicas

La geología es un agente muy importante entre los factores condicionantes en la susceptibilidad de los movimientos en masa, cada unidad litológica tiene características distintivas para ser divididas, en la

tabla 5 se resumen cada una de las unidades y las ponderaciones como sigue a continuación:

Rango 1: Depósitos Aluviales, Esta unidad se presenta como terrazas aluviales en las partes más bajas en las márgenes de los ríos, en especial en la margen del Rio Samalá, el rango ponderado a esta unidad es de 1 ya que representa dentro del campo una susceptibilidad muy baja ya que a pesar de encontrarse de forma inconsolidada y algunas veces levemente alterada se encuentra en zonas muy planas y bajas de la zona de estudio.

Rango 2: Lavas del volcán Cerro Quemado y Depósitos de abanico aluvial Antiguo, Estas dos unidades se encuentran la primera en la zona más alta y al Nor-oeste de la zona y la otra en la zona central de la zona de estudio, estas unidades se caracterizan por encontrarse en zonas semi-planas y son unidades muy consolidadas. Las lavas del volcán cerro quemado son muy recientes en edad y estas son muy masivas, mientras los depósitos aluviales antiguos son terrazas levemente consolidadas y alteradas las cuales han quedado sobreyacidas por la mayoría de unidades recientes de la zona de estudio.

Rango 3: Lavas de Zunil, lavas del domo de Zunil, Lavas de la catarata de Zunil y Lavas del cerro El Galápagos, Depósitos piroclásticos y depósitos coluviales antiguos: Estas unidades regularmente son las rocas que proveen la gran cantidad de materiales a deslizarse en las laderas de la zona de estudio, su grado de consolidación, alteración y fracturación propicien en su mayoría un sinfín de derrumbes dentro de estas unidades.

Rango 4: Depósitos de abanicos aluviales recientes y depósitos coluviales recientes: Estas unidades de roca muy recientes corresponden a muchos de los eventos actuales de la zona de estudio y que en este

momento representan un peligro latente para las estructuras del campo geotérmico Zunil I, es por ello que se ha asignado una ponderación alta a estas unidades debido a que constantemente las rocas que los conforman están en constante acomodo en busca de la estabilidad o reposo.

En el anexo 4 se presenta el mapa de unidades litológicas clasificadas en los cuatro rangos de susceptibilidad de la forma antes mencionada, el mapa de unidades litológicas sin clasificar no se presenta ya que se basa en el mapa Geología Local (Mapa 11, p. 119).

7.5 Alteración hidrotermal

Las manifestaciones geotermales se encuentran principalmente en las márgenes del río Samalá, aunque estas manifestaciones se observan por toda el área, incluso la carretera principal atraviesa una pequeña zona fumarolizada

En el área de estudio debido a la presencia en superficie de manifestaciones hidrotermales, las rocas que cubren una buena proporción de la zona se encuentran alteradas hidrotermalmente lo cual puede constatarse en mapa de alteración hidrotermal (anexo 4); esta alteración hidrotermal afecta las propiedades físicas y químicas de las rocas según el grado de alteración que estas presenten, aumentando con el grado de alteración la susceptibilidad de las unidades litológicas a presentar movimientos de ladera.

En el presente estudio se consideró que la influencia de la alteración hidrotermal en la susceptibilidad a movimientos gravitatorios era tal que al no contarse con un estudio geotécnico en la unidades litológicas, debía ser analizada como un factor desencadenante independiente de la litología, la cual en muchos casos debido a la intensidad de la alteración en las rocas no

era posible identificar la roca original y únicamente se observaron productos de la alteración.

En base a lo anterior se distinguieron las siguientes cuatro categorías de alteración hidrotermal en la zona que son:

Roca no alterada (Rango 1): en este rango se agrupan las rocas que no presentan alteración hidrotermal.

Roca alterada (Rango 2): las rocas en esta categoría presentan alteración hidrotermal, pero aun se reconoce la roca original, es decir podemos hablar de un basalto, una andesita o una riolita alterada hidrotermalmente.

Roca Muy alterada (Rango 3): en este rango no es posible o es muy difícil identificar el tipo de roca original, prevaleciendo los productos de alteración hidrotermal principalmente caolín, hematita y azufre.

Roca Completamente alterada (Rango 4): en esta categoría solo se observan productos de alteración, que como se menciono arriba corresponden a caolín, hematita y azufre principalmente, aunque también se observó sílice amorfo.

7.6 Uso de suelos

El uso del suelo no es más que una área utilizada por el hombre en determinada actividad, el uso de suelo es considerado dentro de los factores condicionantes a la susceptibilidad de movimientos en masa debido a que los terrenos sin uso y sin vegetación son más susceptibles a deslizarse que aquellos que son planos y se encuentran con tejidos urbanos densos o dispersos.

A partir del mapa de uso del suelo para los alrededores del campo geotérmico Zunil I que se incluye en el Anexo 3, se clasificaron los usos de la siguiente manera: Poblado disperso y zona industrial con ponderación 1, bosque denso y bosque poco denso con ponderación de 2, zonas de arbustos y cultivos con ponderación de 3 y zonas sin vegetación con ponderación de 4. (Mapa de usos de suelo clasificados, Anexo 4).

CAPÍTULO IX

SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE LADERA

El análisis de susceptibilidad se realizó en base a la correlación entre el mapa de inventario de movimientos de ladera, fundamentado en el principio de que las áreas que sufren o han sufrido movimientos en masa pueden volver a sufrirlos; con los mapas de los factores condicionantes, bajo la premisa de que las áreas en que confluyen determinados factores, están condicionadas a la ocurrencia de movimientos de ladera, aunque estos no hayan ocurrido anteriormente pueden darse en un futuro.

El mapa que se presenta en esta investigación podría llamarse, según algunos autores, mapa de susceptibilidad natural a movimientos de ladera, ya que no se está considerando el factor antrópico, únicamente se incluye en el análisis de manera indirecta en los usos del suelo.

9.1 Matriz de susceptibilidad

Previo a realizar la matriz de susceptibilidad se debe haber cumplido con los siguientes pasos: en primer lugar el levantamiento y elaboración del mapa de inventario de movimientos de ladera, seguido de esto la elaboración y clasificación de los mapas de los factores condicionantes en cuatro rangos de baja, moderada, alta y muy alta incidencia en la ocurrencia de movimientos en masa.

La tabla 5 la cual se presenta en este capítulo, corresponde a la matriz de susceptibilidad resultante para la presente investigación, a continuación se explica por medio de un ejemplo la forma en la que se obtuvo:

Se va a considerar la presencia de movimientos de ladera no de una manera absoluta, sino de forma relativa en relación a la superficie ocupada por el rango en el que se encuentran los movimientos.

En la tabla 5 se refleja el modo de rellenar la matriz de susceptibilidad, primero se introducen el número de movimientos de ladera ocurridos dentro de cada rango para los diferentes factores condicionantes, posterior a esto el área que ocupa cada rango de cada factor condicionante; por ejemplo en el rango 3 de litología tenemos 32 movimientos, por otro lado tenemos la superficie ocupada por el rango 3 de litología, en este caso el área es 5.864 km².

La siguiente acción es dividir los dos valores anteriores, es decir, el número de movimientos entre el área ocupada. En este caso 32 dividido entre 5.864 resultando 5.46; a continuación se relativiza la ponderación de los rangos dentro de cada factor condicionante para obtener valores entre 0 y 1. Para esto se divide el resultado de la fracción anterior de cada rango por el valor máximo dentro de cada factor condicionante. Para el ejemplo que estamos siguiendo dividiríamos 5.46 entre 119.79 (el máximo dentro del factor litología) obteniendo un valor de 0.045 como se observa en la sección Pr.

El procedimiento anterior se repite para cada categoría de cada factor condicionante, una vez completada la tabla, reclasificamos los mapas base de los factores condicionantes que habíamos agrupado en cuatro

rangos y les implementamos los nuevos valores generados por la matriz de susceptibilidad (valor Pr de la tabla 6).

9.2 Mapa de susceptibilidad a movimientos de ladera

Una vez completada la matriz de susceptibilidad se le otorgan diferentes coeficientes de peso a los factores condicionantes según la importancia o el grado de incidencia que estos tengan en la ocurrencia de movimientos de ladera, de ahí se obtienen diferentes arreglos los cuales se basan tanto en la experiencia de este investigador como en la de otros especialistas en el tema, cada arreglo constituye una hipótesis distinta en la que la suma de todos los coeficiente de peso de los factores condicionantes debe ser igual a uno; para la presente investigación se consideraron cuatro arreglos distintos para los coeficientes de peso y estos se muestran en la tabla 7.

A partir de la suma de los mapas de los factores condicionantes ponderados (Valor Pr de la tabla 5) y utilizando los cuatro diferentes arreglos para los coeficientes de peso de los factores condicionantes (tabla 6), se obtuvo 4 mapas de susceptibilidad para el área de estudio.

Para obtener el mapa de susceptibilidad final, se definió que aquella hipótesis donde el mayor número de movimientos estén entre las susceptibilidades alta, y muy alta, será la escogida, por lo que para la presente investigación se eligió el mapa resultante de utilizar la hipótesis A de la tabla 7 como mapa de susceptibilidad a movimientos de ladera final, este se presenta al final de este capítulo.

TABLA 5
MATRIZ DE SUSCEPTIBILIDAD

	Numero de movimientos					Superficie areal (Km ²)=7						
	Pendiente	Orientaciones	Geomorfología	Litología	Alteración hidrotermal	Uso del suelo	Pendientes	Orientaciones	Geomorfología	Litología	Alteración hidrotermal	Uso del suelo
Rango 4	0	11	60	43	14	8	0.052927	1.097501	3.602725	0.358965	0.144881	0.271992
Rango 3	45	30	14	32	12	21	2.933424	2.519497	1.123797	5.86429	0.382536	2.530951
Rango 2	31	28	0	3	7	49	2.616398	2.325842	0.882589	0.552896	0.314122	3.887138
Rango 1	2	9	4	0	45	0	1.397251	1.035742	1.418374	0.235329	6.158387	0.317784
	78	78	78	78	78	78	7	6.978582	7.027485	7.01148	6.999926	7.007865

	Numero de movimientos/Superficie					Pr						
Rango 4	0	10.0227	16.654060	119.788	96.631028	29.412	0	0.832549	1	1	1	1
Rango 3	15.340	11.9071	12.457765	5.45675	31.369596	8.2972	1	0.989075	0.7480317	0.0455	0.324632752	0.282099
Rango 2	11.848	12.0386	0	5.4259752	22.284335	12.605	0.77236078	1	0	0.0452	0.230612628	0.428580
Rango 1	1.4313	8.68942	2.8201306	0	7.3071081	0	0.09330779	0.721793	0.1693359	0	0.075618653	0

FUENTE: Investigación de campo.

TABLA 6
COEFICIENTES DE PESO DE LOS FACTORES
CONDICIONANTES

	A	B	C	D
Pendiente	0.30	0.40	0.20	0.40
Orientaciones	0.05	0.10	0.05	0.05
Geomorfología	0.20	0.10	0.20	0.10
Litología	0.20	0.20	0.20	0.30
Alteración hidrotermal	0.20	0.10	0.20	0.10
Uso del suelo	0.05	0.10	0.15	0.05

FUENTE: Investigación de campo, en base al criterio propio y al de otros especialistas en el tema.

Dentro del campo geotérmico, según se observan en el mapa de susceptibilidad a movimientos de ladera, se encuentran al menos 4 zonas que presentan una muy alta susceptibilidad a presentar movimientos de ladera, en estas zonas además se encuentra en riesgo parte de la infraestructura del campo poniendo en riesgo el normal funcionamiento de la planta de energía geotérmica.

Estas zonas con muy alta susceptibilidad y que podrían afectar la infraestructura del campo son: una zona de flujo de detritos que inicia en la parte y que prácticamente atraviesa la plataforma del pozo ZCQ-2, este flujo baja por una quebrada en donde se interceptan y unen dos corrientes en la parte alta de la ladera Sureste del complejo dómico Cerro Quemado al Noroeste de la plataforma de este pozo. Según se constato en campo este flujo de detritos además de lodos puede acarrear bloques de varios metros de diámetro, debido a la intensidad de los procesos fluviales de erosión.

Otra de estas zonas se encuentra en los alrededores del pozo ZCQ-4, en este lugar se conjugan la mayoría de los factores condicionantes en

un rango de muy alta susceptibilidad, ya que es una zona de alta pendiente, con una litología fracturada y muy alterada hidrotermalmente, desprovista de cobertura vegetal y en la que ya se han dado deslizamientos en el pasado, ya que como se mencionó en los antecedentes, en este sitio ya tuvo lugar un deslizamiento que causo daños considerables y sepulto este pozo; a la par de este se ubica otro deslizamiento y la zona aun no se observa estable.

Por aparte al norte de la plataforma de los pozos ZCQ-5, ZD-1 y ZD-2, se ubica otra zona de muy alta susceptibilidad, debido a la presencia de quebradas que tienen sus cabeceras en la parte alta de la ladera y por las cuales bajan flujos de detritos arrastrando lodos y bloques de varios metros de diámetro que pueden causar daños en la infraestructura, principalmente en las tuberías de conducción y a la plataforma del pozo ZCQ-3 la cual se encuentra en la parte baja del cauce de este flujo.

En otro sitio al Norte de la plataforma de los pozos ZCQ-6 y ZD-3 se ubica otra de estas zonas con muy alta susceptibilidad, debido principalmente a la pendiente y a la alteración hidrotermal de las rocas; en este lugar en septiembre de 2010 tuvo lugar un deslizamiento que acarreo la tubería de conducción de estos pozos, este deslizamiento aun no ha alcanzado un punto de equilibrio por lo que aun representa un riesgo para la infraestructura del campo.

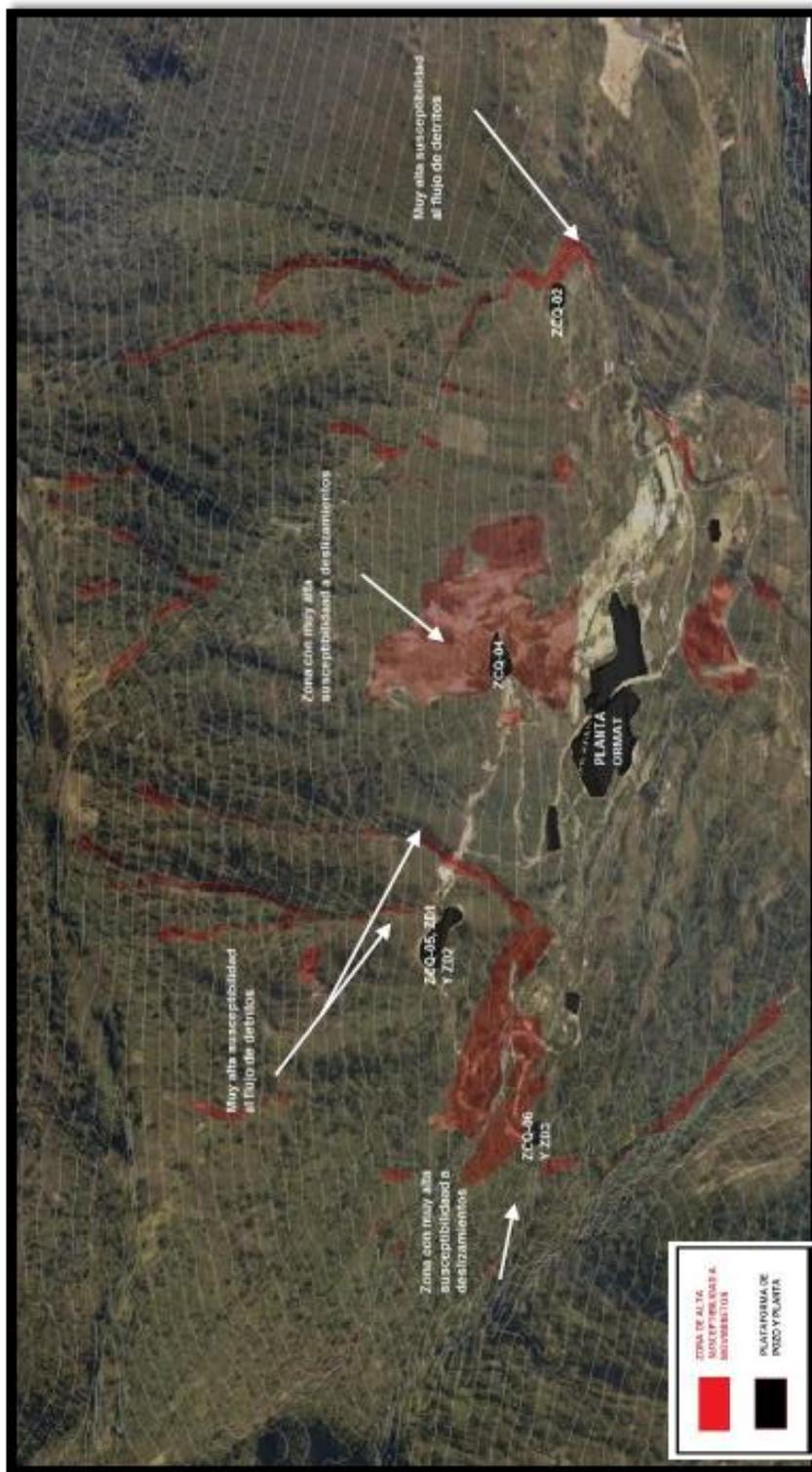
Con la finalidad de visualizar de una mejor manera las zonas antes descritas con una muy alta susceptibilidad dentro del campo geotérmico, se presenta la imagen 2, donde sobre el Modelo de Elevación Digital (DEM por sus siglas en inglés) se han superpuesto las áreas con una muy alta susceptibilidad a los movimientos de ladera junto con los pozos cuya infraestructura podría ser afectada.

Finalmente otras zonas con muy alta susceptibilidad se observan en las laderas en los márgenes del río Samalá, las que se podrían afectar manantiales de agua caliente que son puntos de muestreo para análisis geoquímico por parte del INDE.

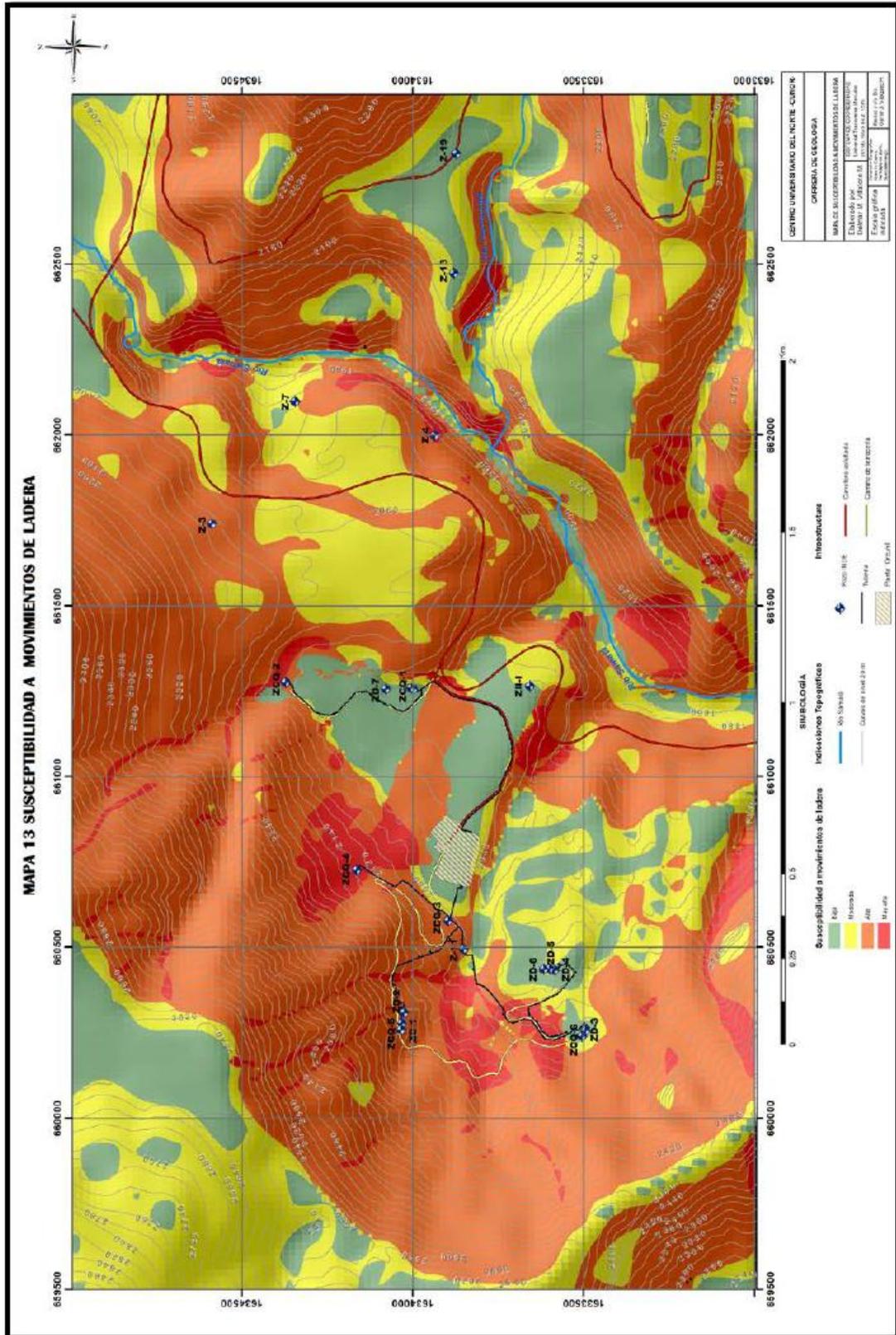
Las áreas de susceptibilidad alta se encuentran principalmente en las laderas al Oeste y Norte del campo geotérmico, atravesándolo en dirección NE-SO, las cuales además de la alta pendiente presentan en algunas zonas alteración hidrotermal.

El resto del área presenta una susceptibilidad de moderada a baja debido principalmente a ser zonas de menor pendiente en las que los procesos de erosión fluvial no actúan con tanta intensidad.

IMAGEN 2
MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL MOSTRANDO LAS ZONAS DE MUY ALTA SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE LADERA DENTRO DEL CAMPO GEOTÉRMICO ZUNIL I



FUENTE: Investigación de campo, obtenido en ArcGis v. 9.3.



CAPÍTULO X

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El resultado final de esta investigación lo constituye el mapa de susceptibilidad a movimientos de ladera, sin embargo para realizar dicho mapa se debieron efectuar una serie de fases previas, en cada una de estas etapas se obtuvieron resultados, si bien preliminares, también debe resaltarse que sin alguno de estos no habría sido posible obtener el resultado final de este estudio.

Se considera que tras la ejecución de la presente investigación se obtuvieron principalmente los siguientes resultados: los mapas temáticos de cada uno de los factores condicionantes; el inventario de movimientos de ladera; la implementación del método estadístico bivariante para realizar la correlación entre los factores condicionantes y los movimientos de ladera; y por último el mapa de susceptibilidad natural a movimientos de ladera; estos resultados serán analizados a continuación.

10.1 Análisis de los mapas de los factores condicionantes

El primer mapa que se presenta en el capítulo VIII es el de pendientes, la pendiente del terreno, según los diversos autores consultados y las observaciones de campo, es el principal factor que condiciona el terreno a la ocurrencia de movimientos en masa, en efecto la pendiente condiciona la estabilidad de una ladera, ya que con ella varían las componentes de la gravedad y el rozamiento del talud, fuerzas que van a determinar su equilibrio; los movimientos gravitatorios se dan en el momento en que se produce un desequilibrio entre las fuerzas existentes en un talud; al aumentar la pendiente aumenta la componente

tangencial de la gravedad, que es una de las fuerzas desestabilizadoras, y disminuye el rozamiento o resistencia a la cizalla que actúa como fuerza estabilizadora.

Por lo tanto a mayores pendientes será necesaria una mayor cohesión del talud para mantener el estado de equilibrio, así como unas presiones de agua menores para que este equilibrio se pierda. Para cada material existe un esfuerzo admisible relacionado con cada valor determinado de la inclinación del terreno, denominado ángulo de reposo, este ángulo de reposo determina el talud natural del terreno.

Por aparte en el mapa de orientación de laderas, como se mencionó en el capítulo VIII, se considera únicamente el efecto negativo de la insolación en las laderas, el cual se basa en que a mayor insolación mayor será la evaporación del agua, la evaporación tiene un efecto negativo en cuanto a la estabilidad de un terreno; en esta investigación no se considera que la orientación de las laderas tenga una gran influencia en la ocurrencia de movimientos de ladera, de ahí que se le diera un coeficiente de peso de 0.005 en el mapa de susceptibilidad final, se tomó este factor principalmente porque era considerado por todas las investigaciones de este tipo que fueron consultadas y por la fácil elaboración y clasificación en rangos de este mapa.

La división en cuatro categorías del mapa de unidades geomorfológicas, guarda una estrecha relación con la pendiente, ya que aquellas formas del terreno que presentan una mayor inclinación han sido colocadas en el rango más alto y las formas relativamente planas en la categoría uno; asimismo la categorización de este mapa guarda una relación menos directa con el tipo de litología o materiales este compuesto así por ejemplo una Unidad que presente bastante inclinación como la de domo volcánico (láxico), pero que está constituida por una roca bastante

consolidada se encuentre en una categoría menor que otras unidades con relativa mayor pendiente.

La división en rangos de las Unidades litológicas se realizó en base a elementos cualitativos, principalmente la compactación de la roca, su dureza, grado de meteorización y la presencia de diaclasas, fallas y otras estructuras que pudieran estar afectando a las rocas; la alteración hidrotermal fue considerada con un factor condicionante a parte del tipo de litología, por considerarse un factor importante debido a encontrarnos en una zona geotérmica.

En esta investigación no fue considerada la fracturación o densidad de fracturas como un factor condicionante aparte, únicamente se incluye en el mapa de Unidades litológicas, esto principalmente debido a que no se tenían datos de fracturas para toda el área de estudio ya que una buena parte de esta se encuentra cubierta por material coluvial reciente el cual cubre las estructuras geológicas preexistentes; además en zonas con una intensa alteración hidrotermal, ya no se observan las estructuras en las rocas, por lo que era poco viable la realización de un mapa de densidad de fracturas para el área de estudio.

Por aparte debido a encontrarnos en una zona geotermal activa la alteración hidrotermal, se considera como un factor condicionante importante para la ocurrencia de movimientos en masa, de ahí que se decidiera analizarse como un factor aparte de las Unidades litológicas; lo anterior debido a que la circulación de fluidos hidrotermales, cambia las propiedades físicas y mecánicas de las rocas, haciéndolas menos consolidadas, disminuyendo su cohesión y de esta forma reduce la fuerza desestabilizadora necesaria para que se produzcan los movimientos. La división en rangos de la alteración hidrotermal no se realiza en base a los

tipos de alteración observados sino al grado de afectación en las rocas, desde rocas no alteradas hasta rocas completamente alteradas.

Finalmente en cuanto al mapa de usos del suelo, para su categorización se parte de considerar la presencia de arboles y vegetación como un aspecto positivo en la estabilidad de las laderas, ya que estos proporcionan una mayor estabilidad, amortiguando el efecto de la gota de lluvia, absorbiendo parte del agua caída disminuyendo así la escorrentía superficial. Además aporta una mayor cohesión al terreno con sus raíces; por lo que se considero que aquellas áreas con una densa vegetación tienen una menor susceptibilidad a presentar movimiento de ladera que aquellas en las que por el uso del suelo como su utilización para cultivos o áreas para la obtención de madera, han sido deforestadas.

10.2 Análisis del inventario de movimientos de ladera

Aunque parezca redundante, porque ya se menciona antes en este informe, el inventario de movimientos de ladera constituye no solo la base sino también la comprobación de esta investigación.

Es la base del estudio porque se parte del principio de que en los lugares en los que han ocurrido movimientos de ladera en el pasado, es posible que vuelvan a ocurrir, por lo que es importante determinar qué factores intrínsecos al terreno interactúan en estos sitios, haciéndolos susceptibles a los procesos de movimientos en masa.

Por aparte por medio del inventario de movimientos de ladera se comprueba si los escenarios planteados y la metodología utilizada fueron los adecuados, contrastando el mapa de susceptibilidad obtenido con la realidad; haciendo un análisis numérico simple de cuantos movimientos de ladera caen dentro de cada categoría del mapa, hay que recordar que al principio se plantearon cuatro escenarios o hipótesis, otorgándole

diferentes valores a los coeficientes de peso de cada factor condicionante, por lo que el resultado son cuatro mapas de susceptibilidad, el mapa en el que el mayor número de movimientos de ladera se encuentren en el rango de muy alta susceptibilidad (rango 4) fue seleccionado como el mapa final.

En el área de estudio se dan principalmente dos tipos de movimientos de ladera que son: deslizamientos rotacionales y flujos de detritos, aunque también se observó caída de bloques en zonas escarpadas, estos movimientos se dan en la mayoría de los casos en sitios sin vegetación, con formas del terreno con pendientes abruptas, compuestas por unidades litológicas poco consolidadas, que presentan una deformación frágil debido a los esfuerzos y se encuentran alteradas hidrotermalmente por la circulación de fluidos hidrotermales a través de fallas y fracturas.

La coexistencia de todos o algunos de los factores arriba descritos es bastante común dentro del área de investigación, por lo que la ocurrencia de movimientos de ladera es un fenómeno relativamente común en la zona, esto se evidenció en los antecedentes presentados en el capítulo 1, donde se mostraron los daños ocasionados en tiempos recientes a la infraestructura del campo geotérmico, además por el trabajo de campo se pudo constatar que estos fenómenos se han dado en la zona a lo largo del tiempo geológico encontrándose depósitos coluviales y de flujos de detritos recientes cubriendo capas de depósitos del mismo tipo más antiguos ya completamente litificados.

Aunque en los movimientos de ladera que han ocurrido recientemente en el campo geotérmico Zunil I y sus alrededores, ha sido la lluvia el factor desencadenante, la presente investigación no lo analiza ya que se trata únicamente de un análisis de susceptibilidad en el que no se toma en cuenta los factores desencadenantes, se recomienda realizar el

análisis de factores desencadenantes en conjunto con una evaluación de la probabilidad de ocurrencia de los fenómenos (predicción espacial y temporal), con lo que se estaría evaluando la peligrosidad en el área de estudio y no solo la susceptibilidad.

10.3 Análisis de la metodología para la correlación entre factores condicionantes y movimientos de ladera

El campo geotérmico Zunil I y sus alrededores es un área donde los movimientos de ladera son un fenómeno que se da regularmente, especialmente en épocas de intensas lluvias, al realizar el trabajo de campo se pudo inferir que existían ciertos factores propios del terreno los cuales incidían en la susceptibilidad de este a la ocurrencia de estos fenómenos. Sin embargo el trabajo de campo únicamente nos permitió inferir esta relación de una manera cualitativa, se necesitaba un método que permitiera evaluar esta correlación de una manera cuantitativa, es decir pasar de cualidades del terreno y su posible incidencia en los movimientos de ladera a números y posteriormente a vectores los cuales por medio de un programa de computo pudieran ser analizados.

En base a lo anterior podemos concluir que para realizar nuestro análisis de correlación entre factores condicionantes y movimientos de ladera, necesitamos pasar de lo cualitativo a lo cuantitativo, transformando en valores numéricos la influencia de los distintos factores condicionantes en la ocurrencia de movimientos de ladera en un lugar determinado, para lo cual se utilizó la estadística, utilizando un método que en la literatura consultada recibe el nombre de método estadístico bivariante

El método estadístico bivariante, analiza la ocurrencia de un fenómeno como variable dependiente de otras variables o factores independientes; específicamente para la presente investigación este método nos permite correlacionar el número de movimientos de ladera con

el área ocupada en cada una de las categorías en las que se han dividido los mapas de factores condicionantes, es decir se va a considerar la presencia de movimientos de ladera no de una manera absoluta, sino de forma relativa en relación a la superficie ocupada por el rango en el que se encuentran los movimientos. Así se asignará un peso diferente según el porcentaje sea menor o mayor respectivamente.

En el capítulo IX (susceptibilidad a movimientos de ladera) se presenta la matriz de susceptibilidad la cual sintetiza lo expuesto en el párrafo anterior, el resultado final es una ponderación relativizada (Pr) con valores entre 0 y 1 para cada categoría de los mapas de los factores condicionantes; tras efectuar el análisis de correlación reclasificamos los mapas base de los factores condicionantes que habíamos agrupado en cuatro rangos y les implementamos los nuevos valores generados por la matriz de susceptibilidad.

Podemos concluir nuestro análisis diciendo que el método estadístico utilizado, nos permite evaluar la correlación entre factores condicionantes y movimientos de ladera por medio de un análisis numérico relativamente sencillo, obteniéndose una ponderación relativizada para cada rango en el que han sido divididos los factores condicionantes, dando un valor numérico a la incidencia de cada factor sobre el terreno en la ocurrencia de movimientos en masa.

10.4 Análisis del mapa de susceptibilidad a movimientos de ladera final

Debido a la metodología empleada para realizar el análisis de susceptibilidad, se obtuvieron cuatro mapas de susceptibilidad distintos, esto debido a cuatro distintos arreglos de los coeficientes de peso de los factores condicionantes (ver tabla 7 del capítulo IX), luego contrastando cada mapa con el inventario de movimientos de ladera, se determinó que

mapa representaba de manera más exacta la distribución de movimientos de ladera en relación a la susceptibilidad del terreno.

Para la presente investigación se determinó que el mapa generado empleando la hipótesis A en la que se le daba un coeficiente de peso de 0.3 a la pendiente, 0.05 a la orientación de las laderas, 0.2 a la geomorfología, 0.2 a la litología, 0.2 a la alteración hidrotermal y 0.05 al uso del suelo, fue tomado como el mapa que más se asemeja a la realidad, ya que en las zonas clasificadas como categoría 4 coincidieron con la presencia de mayor número de movimientos de ladera, la categoría 3 en segundo lugar y las categorías 1 y 2 en las que prácticamente no se tienen movimientos, esto se observa en el mapa 14 que se muestra al final del presente capítulo.

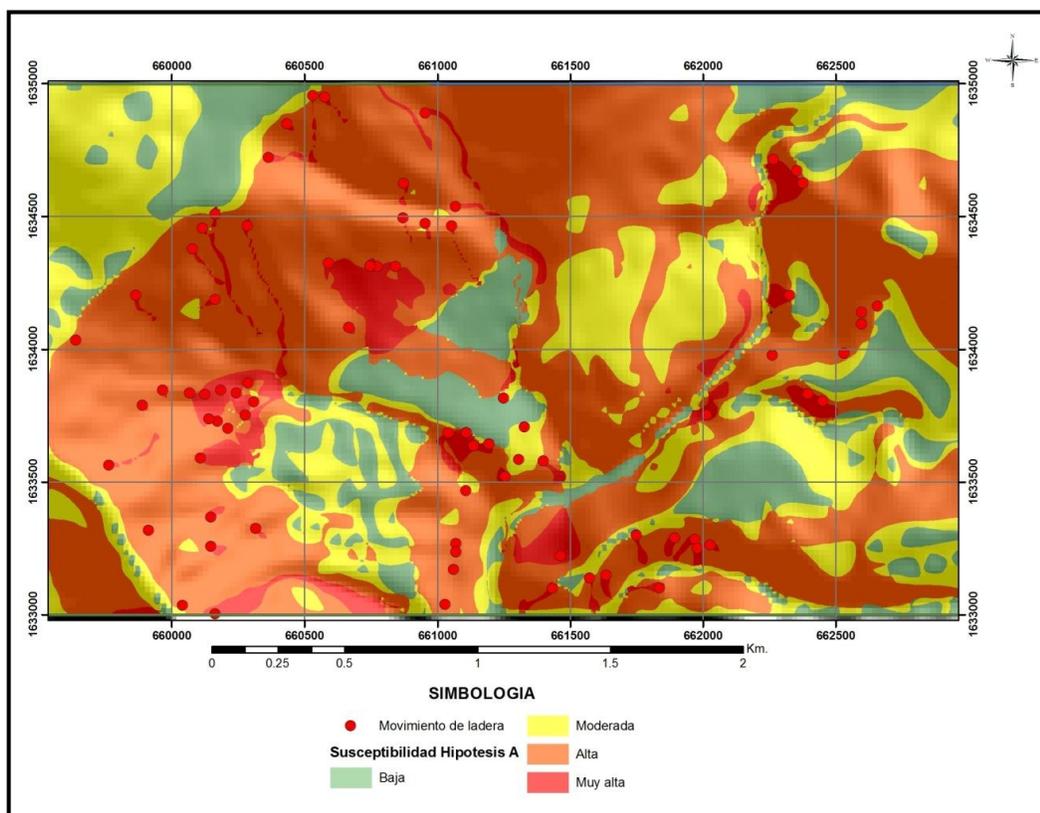
La zonificación de la susceptibilidad se encuentra controlada por los factores condicionantes, especialmente por las pendientes, la geomorfología y la litología, como factores de mayor peso, es decir aquellos sitios donde se tenga una ladera con una pendiente mayor a 30°, con rocas fracturadas y alteradas hidrotermalmente, tienen una alta susceptibilidad a presentar movimientos en masa.

En el mapa seleccionado como mapa de susceptibilidad natural a movimientos de ladera, se observa que en la mayor parte del área de estudio se tiene una alta susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos en masa, esto como consecuencia del ambiente geológico, el cual predispone el terreno a la ocurrencia de movimientos de ladera y con la lluvia como principal factor desencadenante.

Como resultado del mapa de susceptibilidad generado se identificaron cuatro zonas con una muy alta susceptibilidad a movimientos de ladera, de estas zonas tres fueron priorizadas y se han realizado

trabajos ingenieriles dirigidos mitigar los posibles daños a la infraestructura del campo geotérmico Zunil I, estas obras han sido distintas y específicas para cada caso.

MAPA 14 CONTRASTE ENTRE EL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD DE LA HIPÓTESIS A CON LOS MOVIMIENTOS DE LADERA



FUENTE: Investigación de campo, obtenido en ArcGis v. 9.3.

CONCLUSIONES

- En el área de estudio que comprende el campo geotérmico Zunil I y sus alrededores se determinó, en principio en forma cualitativa (a partir de observaciones de campo) y posteriormente en forma cuantitativa (utilizando el método estadístico bivariante), que los movimientos de ladera se dan principalmente en lugares donde se tiene una geomorfología abrupta, con pendientes mayores a 30°, con rocas poco consolidadas y/o fracturadas y alteradas hidrotermalmente, en zonas con poca o ninguna cubierta vegetal.
- A partir de de lo anterior se concluyó que los principales factores naturales que condicionan la susceptibilidad del terreno a presentar movimientos en masa son los siguientes: a) la pendiente del terreno; B) la orientación de las laderas; c) las formas del terreno (geomorfología), d) los tipos de litología; e) el grado de alteración hidrotermal que puedan presentar las rocas y f) el uso del suelo. De los que se considera que la pendiente, la geomorfología, la litología y la alteración hidrotermal son los factores de mayor peso.
- Se elaboraron mapas temáticos para cada uno de los factores condicionantes, estos mapas sintetizan y muestran de forma grafica la información recopilada para la realización del estudio.
- Los factores condicionantes fueron categorizados en 4 rangos, debido a que para el mapa de susceptibilidad final se utilizaron 4 categorías (baja, moderada, alta y muy alta), esta clasificación se realizó según la influencia de las categorías de cada factor en la predisposición del terreno a presentar movimientos de ladera; quedando los factores condicionantes categorizados de la manera en que se observa en la tabla 5 Factores condicionantes y categorías,

donde 1 corresponde a los menos importantes y 4 a los más influyentes.

- Se identificaron 78 movimientos de ladera en la zona, siendo los deslizamientos rotacionales y flujos de detritos los fenómenos que se dan con más frecuencia, se pudo constatar que la ocurrencia de estos movimientos de ladera se encuentra determinada de forma directa por los factores condicionante, observándose el mayor número de movimientos en aquellas zonas donde se da la confluencia de la mayoría de estos factores en una categoría de alta incidencia (rango 3 y 4).

- Dentro del campo geotérmico Zunil I, se distinguen a partir del mapa de susceptibilidad, al menos 4 zonas en las que se encuentra en riesgo parte de la infraestructura del campo debido a que presentan una muy alta susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos de ladera, poniendo en riesgo el normal funcionamiento de la planta de energía geotérmica, y a las cuales se debe dar prioridad en cuanto a tomar las medidas pertinentes para evitar o mitigar daños. Estas zonas son las siguientes:

- a. El pozo ZCQ2 se ubica en un área que se ve afectada en épocas de intensa lluvia por un flujo de detritos que prácticamente atraviesa la plataforma del pozo, según se constato en campo este flujo de detritos además de lodos puede acarrear bloques de varios metros de diámetro, debido a la intensidad de los procesos de erosión hídricos, este flujo podría llegar a sepultar el pozo y debido al tamaño de los bloques que acarrea también puede dañar el cabezal y tubería del pozo.
- b. Otro de estos sitios se encuentra en los alrededores del pozo ZCQ-4, en este lugar se conjugan la mayoría de los factores condicionantes en un rango de muy alta incidencia e importancia en la ocurrencia de movimientos en masa, en este lugar además

se ubican dos deslizamientos anteriores los cuales aun no se observan estabilizados y podrían ser activados si se da una precipitación pluvial importante, causando daños a la infraestructura del pozo.

- c. Al norte de los pozos ZCQ-5, ZD1 y ZD2, se encuentra otra zona de muy alta susceptibilidad debido a la presencia de quebradas que tienen sus cabeceras en la parte alta de la ladera y por las cuales bajan flujos de detritos arrastrando lodos y bloques de varios metros de diámetro que pueden causar daños en la infraestructura, principalmente en las tuberías de conducción.
- d. Finalmente al Norte de la plataforma de los pozos ZCQ6 y ZD3 se ubica otro lugar con muy alta susceptibilidad, debido principalmente a la pendiente y a la alteración hidrotermal de las rocas; en este lugar en septiembre del año 2010 tuvo lugar un deslizamiento que daño la tubería de conducción este deslizamiento aún no se encuentra estable y de no tomarse alguna medida de mitigación podría causar nuevamente daños en las instalaciones.

- Las áreas de susceptibilidad alta se encuentran principalmente en las laderas al Oeste y Norte del campo geotérmico y el resto del área presenta una susceptibilidad de moderada a baja debido principalmente a ser zonas de menor pendiente en las que los procesos de erosión fluvial no actúan con tanta intensidad.

RECOMENDACIONES

- Debido a que el campo geotérmico Zunil I se encuentra en una región con alta susceptibilidad a movimientos en masa, al momento de programarse una expansión del campo debe tomarse en cuenta este factor para que los pozos no sean perforados en lugares no adecuados en los que se encuentren en riesgo su infraestructura.
- Al considerarse la lluvia como el principal factor desencadenante de los movimientos de ladera en el área, se recomienda realizar un análisis del factor de lluvia, el cual parte del estudio de las precipitaciones máximas diarias; esto debido a que es importante llegar a establecer umbrales de lluvia a partir de los cuales establecer unos valores desencadenantes de los movimientos. Además determinar la precipitación acumulada durante un cierto periodo de tiempo es importante a la hora de desencadenarse un movimiento de ladera.
- La plataforma del pozo ZCQ-2 se encuentra en una zona de muy alta susceptibilidad a movimientos en masa, más específicamente a los flujos de detritos provenientes de una quebrada que pasa muy cercana al pozo, para mitigar los daños en esta zona durante eventos catastróficos, debe construirse un drenaje adecuado en el cauce natural de la quebrada el cual no solo canalice el flujo sino además soporte el embate de los bloques que podría acarrear la correntada. Aunque el tamaño de los bloques de roca arrastrados cuando las lluvias son intensas y su duración de varias horas, es de hasta 3 m o 4 m de diámetro, se recomienda la construcción de un muro de contención y encarrilamiento de flujos de derrubios, el cual proteja la plataforma del pozo

ZCQ-2, encarrilando el flujo hacia el curso natural de la quebrada.

- La tubería que conduce los fluidos hacia la planta, de la plataforma de los pozos ZCQ-5, ZD1 y ZD2, se encuentran en una zona de alta susceptibilidad a movimientos en masa, donde por ejemplo flujos de detritos en fenómenos atmosféricos que provoquen lluvias intensas pueden acarrear la tubería, por lo que se recomienda realizar medidas preventivas para evitar daños, las cuales podrían ser la construcción de cunetas que conduzcan el flujo o elevar la tubería del nivel del suelo dejando libre el paso a la correntada.

- Debido a que la plataforma del pozo ZCQ-3 se encuentra en la parte baja y de menor pendiente del cauce del flujo antes mencionado, al perder esta velocidad debido al cambio de pendiente, deposita en forma de abanico todos los derrubios que transportaba, enterrando la plataforma, por lo que se recomienda proteger con un muro de contención y encarrilamiento de flujo de derrubios la plataforma del pozo ZCQ-3, desviando el flujo hacia el cauce natural de la quebrada.

- Las plataformas de los pozos ZCQ-4, ZCQ-6 y ZD-3 se encuentran en zonas con movimientos de laderas recientes, el pozo ZCQ-4 fue dañado y enterrado por un deslizamiento rotacional de importantes dimensiones como se observa en la caracterización presentada en el capítulo 8 y en la plataforma del pozo ZCQ-6 y ZD3 se originó un evento de acomodo de coluviones antiguos, por lo que estas zonas necesitan un trabajo especial de estabilización, para lo que se recomienda lo siguiente:

- a. realizar de un estudio geotécnico y geofísico que permita entender la geometría del subsuelo de dichos derrumbes ya que en las paredes solamente se observan materiales de la misma proveniencia del derrumbe anterior. Para ello es necesario realizar unos sondeos de geofísica a través de sondeos eléctricos

verticales (S.E.V.) para establecer la profundidad de la roca del basamento y así poder a través de estos datos orientar las recomendaciones geotécnicas pertinentes para la estabilización, tal como el tipo, tamaño, la orientación y profundidad de los anclajes y la construcción de drenajes dentro del núcleo de los derrumbes.

- b. Posterior a conocer la geometría de los deslizamientos otra de las recomendaciones consiste en la fabricación de terrazas o bermas ya que en la actualidad las únicas existentes corresponden a la plataforma del pozo para ZCQ-04 y el camino por donde pasan las tuberías con los fluidos hidrotermales para ZCQ-06 y ZD3, estas terrazas deben ser construidas con un drenaje apropiado y un revestimiento de concreto que impida la infiltración y posterior saturación del terreno con aguas meteóricas o pluviales, las cuales puedan desencadenar en un nuevo evento de deslizamiento.
- c. Ya establecidas las bermas o terrazas de estabilización se debe determinar si se van a impermeabilizar, reforestar o preparar para zonas de cultivos.
- d. Finalmente construir cunetas o canales para la conducción de los flujos de derrubios que en épocas de lluvia Bajan por las quebradas contribuyendo a la saturación de agua en el área de los derrumbes.

BIBLIOGRAFÍA

- Análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante un sig en la cuenca vertiente al embalse de rules granada.* http://www.ugr.es/~ren03366/DEA/TEMAS/memoria/3_MOVIMIENTOS.pdf (04 de septiembre de 2 012).
- Capacity Building for Natural Disaster Reduction –CBNDR- Regional action program for Central America –RAPCA-. *Zonificación de Amenazas Naturales en la cuenca del río Samalá y Análisis de vulnerabilidad y riesgo en la población de San Sebastián Retalhuleu, Guatemala, Centro América.* Guatemala: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 2 003.
- Carías González, Carlos Armando. *Costos y rentabilidad de unidades pecuarias (producción de leche) Municipio de Zunil departamento de Quetzaltenango.* Ejercicio Profesional Supervisado. Facultad de Veterinaria y Zootecnia. http://biblioteca.usac.edu.gt/EPS/03/03_0675_v6.pdf (18 de septiembre de 2 012).
- Consejo departamental de desarrollo Quetzaltenango –CODEDEQ-. *Gerencia para la reconstrucción de Quetzaltenango.* <http://www.segeplan.gob.gt/stan/Reconst/ReconstQuetzaltenango.pdf> (04 de abril de 2 013).
- Cordon y Merida Ings, MK Ferguson Company. *Informe final planta geotermoelectrica de 15 MW proyecto Zunil I Quetzaltenango.* Quetzaltenango, Guatemala: Cordon y Merida Ings, MK Ferguson Company, 1 993.
- Dengo, Gabriel. *Marco tectónico de la región del Caribe: Reseña histórica.* 1978. <http://www.crid.or.cr/digitalizacion/pdf/spa/doc5164/doc5164.htm> (10 de octubre de 2 012).
- Domínguez Cuesta, María José. *Geomorfología e inestabilidad de laderas en la cuenca carbonífera central (Valle del Nalón, Asturias). Análisis de la susceptibilidad ligada a los movimientos superficiales del terreno.* Tesis Doctoral en Geología. Oviedo España: Universidad de Oviedo. Biblioteca Universitaria, 2 010.

Concepto de lahar. <http://vcd.crid.or.cr/vcd/index.php/LAHARES> (20 de octubre de 2 012).

Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas -UNISDR-. *Terminología sobre reducción del riesgo de desastres.* Ginebra, Suiza: UNISDR; 2 009.

Fernández, Tomás. Et. Al. *Diseño grafico de un mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera.* VIII Congreso Nacional de Tipografía y Cartografía -TOPCART 2004-. Madrid, España 19-22 de octubre 2 004.

Fernández Lavado, Carles. *Manual metodológico para la evaluación de movimientos de ladera en el área metropolitana de San Salvador El Salvador.* San Salvador, El Salvador: Geólogos del Mundo, 2 008.

Diagnosis e inventario de la susceptibilidad a las inestabilidades en las áreas afectadas por los terremotos del 2001 en el volcán de Usulután. Geólogos del Mundo 2 002. <http://www.snet.gob.sv/Documentos/geologos/9.AnalisisInestabilidades/9.2.Caracterizacion%20de%20la%20susceptibilidad/9.2.Caracterizacion%20de%20la%20Susceptibilidad.pdf> (06 de mayo de 2 013).

Comisión Económica para América Latina y El Caribe -CEPAL- Et. Al. *Evaluación de daños y pérdidas sectoriales ocasionados por la Depresión Tropical 12- E noviembre de 2011.* http://www.conred.gob.gt/documentos/secretaria-ejecutiva/CEPAL%20-%20Evaluacion_Danos_y_Perdidas%20-DT12E.pdf (07 de mayo de 2 013).

González de Vallejo, Luis. Et. Al. *Ingeniería Geológica.* Madrid, España: Pearson Educación, 2 002.

Oyarzún, Jorge. *Léxico sobre procesos y estructuras geológicas.* La Serena, Chile: Universidad de La Serena, 2 009.

Rivera Rosado, Huber Alberto. Et. Al. *Zonificación Preliminar de Amenaza por Avenidas Torrenciales en la Cuenca Media y Baja del Cucuana.* Bogotá, Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2 011.

Suárez Díaz, Jaime. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales.* Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2 001.

Tobías Gutiérrez, Edgar. *Proyecto Zunil estudio de factibilidad preliminar: Informe geológico y vulcanológico.* Guatemala: Instituto Nacional de Electrificación, 1 977.

Wantland, Karen. Et. Al. *Amenaza por movimientos de ladera en las cuencas hidrográficas Coyolate, Madre Vieja, Nahualate y Suchiate*. Guatemala: Instituto Geográfico Nacional, 2 010.



Vº Bº.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Adán García Véliz', written over a horizontal line.

Adán García Véliz
Licenciado en Pedagogía e Investigación Educativa
BIBLIOTECARIO



ANEXOS

ANEXO 1 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Cronograma de actividades						
Actividad	diciembre 2011	15 de enero a 30 de marzo (2012)	01 de abril a 30 de junio (2012)	01 de julio a 30 de septiembre (2012)	01 de octubre (2012) a 31 de marzo (2013)	1 de abril a 31 de agosto (2013)
Establecer metodología y escala de trabajo						
Recopilación bibliográfica y obtención de mapas topográficos, fotografías aéreas y ortofotos						
Elaboración del inventario de movimientos de ladera						
Levantamiento geológico						
Gabinete	Estudio y síntesis de la recopilación bibliográfica					
	Elaboración de mapas regionales y temáticos					
	Análisis de la información generada y elaboración del mapa de susceptibilidad					
	Elaboración del informe final					

Fuente: Investigación de campo.

ANEXO 2
FICHA DE CAMPO PARA LEVANTAMIENTO DEL INVENTARIO
DE MOVIMIENTOS DE LADERA

HOJA DE EVALUACION DE MOVIMIENTOS DE LADERA

Fecha ____/____/____ Hora _____

Responsable de la inspección:

Institución/organización:

Dirección/tel./fax/e-mail: _____

Número ficha: _____

TIPO DE MOVIMIENTO:

Deslizamiento ()

Desprendimiento o vuelco ()

Flujo ()

Complejo ()

DATOS DEL MOVIMIENTO DE LADERA

1. FECHA DE OCURRENCIA Y UBICACIÓN

Fecha en que ocurrió el movimiento ____/____/____

Coordenadas X: _____ Y: _____

Sistema de Coordenadas: _____

Departamento: _____ Municipio: _____

Cantón _____ Caserío/Barrio _____

Colonia/Residencial/Otros _____

Calle/Número de las viviendas/Otros _____

2. CONDICIONES TOPOGRÁFICAS Y GEOMETRICAS

Altura de la corona _____ (msnm) Altura del talud (T) _____(m)

Pendiente promedio del talud originado _____ (°)

Pendiente del talud original _____ (°)

Grietas en la parte superior de la corona () Abertura ____ (cm)

Longitud ____ (cm) Profundidad ____ (cm)

Escalones () Altura _____ (m)

Medidas de la superficie de ruptura:

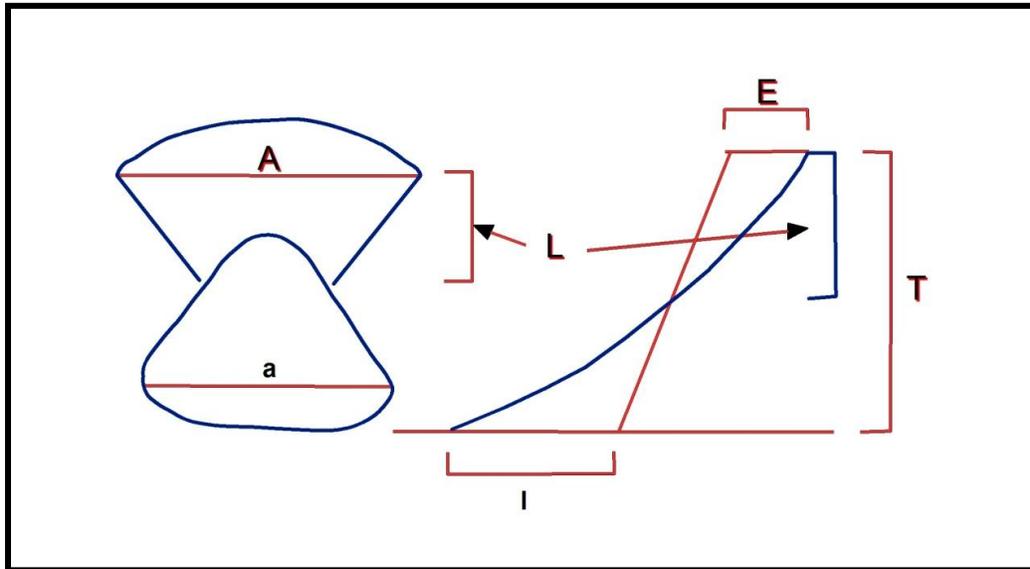
Ancho (A) _____ (m)

Largo (L) _____ (m)

Espesor (E) _____ (m)

Volumen estimado ($A \times L \times E$) _____ (m^3)

FIGURA 11 Diagrama con medidas para deslizamiento



FUENTE: Modificado de Carles Fernández Lavado

3. MATERIAL DESLIZADO

Suelos ()

Rocas ()

Relleno ()

Basura y ripio ()

Árboles ()

Otros _____

Superficie de afectación: Ancho(a) _____ (m) Largo (l) _____ (m)

Área (axl) _____ (m²)

Ocupando cauce de río o quebrada () Permanece: (SI) (NO)

Viabilidad de movilizar el material (palas, máquina...)

4. FACTORES GENERADORES

Factores Naturales:

Escorrentía Superficial ()

Lluvias ()

Sismos ()

Factores Antrópicos:

Cortes de caminos y/o construcción ()

Drenajes ()

Acumulación de sobrecargas ()

Otros: _____

Comentarios: _____

5. EVALUACIÓN DE DAÑOS (poner la cantidad en los casos que se conozca el dato)

Carreteras/caminos: () Viviendas: ()

Acueductos: () Tendido eléctrico: ()

Personas heridas: Hom () Muj () Personas fallecidas: Hom () Muj ()

Cultivos: ()

Otros: _____

Comentarios: _____

6. ELEMENTOS EXPUESTOS (poner la cantidad en los casos que se conozca el dato)

Carreteras/caminos: () Viviendas: ()

Acueductos: () Tendido eléctrico: ()

Personas: Hom () Muj () Cultivos ()

Otros: _____

Comentarios: _____

7. MEDIDAS DE PRECAUCION REALIZADAS:

Evacuación de la zona afectada: () Desalojo del material deslizado: ()

Cubrir el talud con plástico: () Señales de precaución: ()

Otros: _____

8. PROPUESTAS DE SOLUCION:

Conformación del talud: () Construcción de muros/gaviones: ()

Reforestación: () Construcción de drenajes: ()

Instalación de SAT: ()

Otros: _____

9. ANTECEDENTES.

Ha ocurrido antes otro deslizamiento en el mismo lugar o cerca del mismo: ()

En el caso que sea cerca, ¿a qué distancia? _____ (m)

10. CROQUIS.

Haga un diagrama en planta y perfil del deslizamiento, indicando la situación de las medidas tomadas.

11. FOTOGRAFIAS.

Anexar las fotografías que considere convenientes. Importante que aparezca una referencia que sirva de escala de medida. (Vista general del contexto, vista general del deslizamiento, detalle de la cabecera, detalle de la superficie de ruptura, detalle del material deslizado, grietas existentes, incisiones de regueros, surgencias de agua, contacto entre materiales diferentes, zona de afectación, daños ocasionados).

ANEXO 3

UTILIZACIÓN DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) EN LA GENERACIÓN DE MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) por medio de la utilización de señales emitidas por satélites en conjunto con aparatos receptores, han permitido la georeferenciación de diversa información, es decir poder ubicar geográficamente en tres dimensiones, cualquier clase de datos o información de un lugar en cuestión, estos pueden ser el tipo de roca, fotografías aéreas, imágenes satelitales, clase de suelo, cultivos, densidad poblacional, sitios importantes, etc., presentes en un determinado sitio geográfico.

Utilizando los distintos programas de computadora para análisis de datos georeferenciados que a la fecha han sido desarrollados como por ejemplo: *ArcView*, *ArcGis*, *Map Source*, *Autocad Map*, etc., la información puede no solo ser visualizada en forma de capas sino que estos software permiten la realización de operaciones entre capas, transformando las características cualitativas en cuantitativas, o dicho de otra manera convirtiendo en números la información con referencia espacial.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) actualmente se han constituido en una herramienta eficaz para análisis de susceptibilidad y/o amenaza, esto debido a la capacidad que poseen de almacenar ordenadamente gran cantidad de datos georeferenciados, la rapidez de procesamiento y actualización de los mismos, así como la facilidad para la combinación y representación gráfica de ellos. Entre los conceptos fundamentales en la utilización de la herramienta SIG, para la generación de mapas de

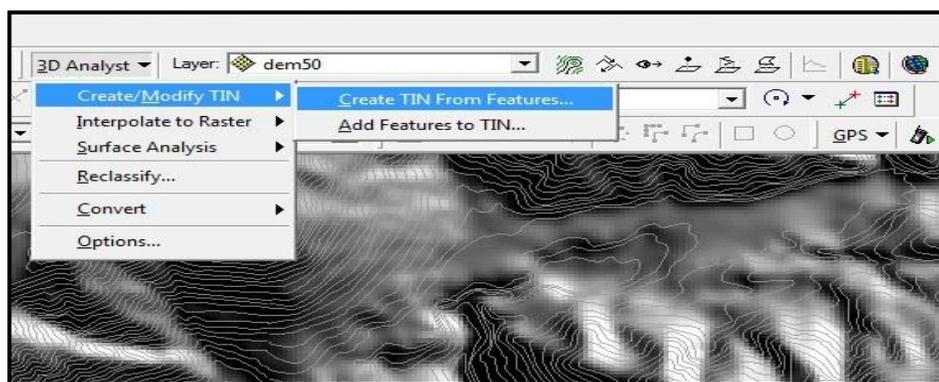
susceptibilidad a los movimientos de ladera tenemos: la creación de categorías dentro de los diferentes mapas temáticos y la reclasificación de los mismos.

Los procesos que se presentan a continuación están basados en el software *ArcGIS versión 9.3* de ESRI y fueron tomados del manual metodológico para la evaluación de movimientos de ladera en el AMSS (El Salvador, CA), realizado por Carles Fernández Lavado de Geólogos del Mundo, el cual se encuentra disponible en la web; se utilizó este manual debido a que se obtuvo una capacitación directamente de su autor, lo que facilitó en gran manera su utilización en la presente investigación.

a) Creación del modelo TIN

TIN significa “*Triangular Irregular Network*”; a partir de la topografía el programa genera una estructura espacial basada en triángulos de la cual se obtiene un modelo en relieve del área interpretada. El proceso con el cual *ArcGIS* realiza un *TIN* (figura 12), es a través de la extensión “*3D Analyst*”, la opción “*Create TIN from Features*” abrirá una nueva ventana en la que se especifica la capa a partir de la cual se va a generar el *TIN*. Esta capa suele ser la topografía dentro de la cual una de sus campos es la altura respecto al nivel del mar.

FIGURA 12
CREACIÓN DE UN TIN

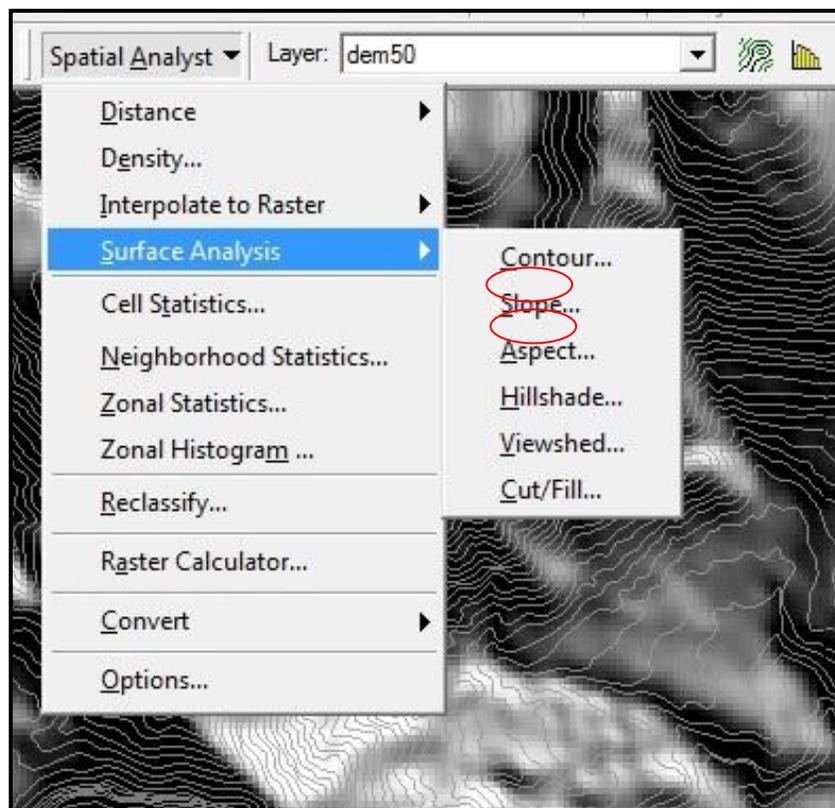


Fuente: Investigación de campo; obtenido en *ArcGis v. 9.3*.

b) Creación del mapa de pendientes y orientaciones

A partir del TIN, se puede obtener el mapa de pendientes y el de orientaciones de la zona de estudio. La extensión que permite realizar la creación de estos mapas se llama “*Spatial Analyst*” (figura 13). Dentro del submenú de “*Surface Analysis*”, la opción “*Slope*” genera el mapa de pendientes y la opción “*Aspect*” genera el mapa de orientaciones.

FIGURA 13
CREACIÓN DEL MAPA DE PENDIENTES Y EL DE ORIENTACIONES



Fuente: Investigación de campo; obtenido en ArcGis v. 9.3.

c) Reclasificación de capas “*Raster*”

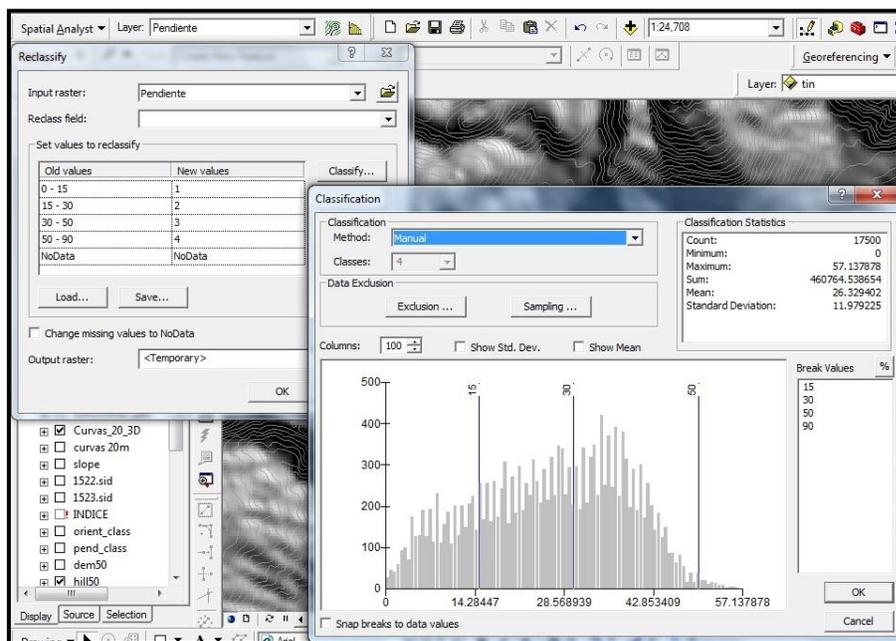
Los mapas obtenidos tanto para la pendiente como para orientación, generan la información con un rango de valores predeterminados. Para obtener un rango de valores que contemple 4 categorías (como los que se usaron para el mapa de susceptibilidad), hay que establecer agrupaciones. Estas agrupaciones se realizan de manera diferente si se parte de una capa “*raster*” (orientaciones o pendientes) o una capa vectorial (uso de suelo, geomorfológico, geología); a este proceso se le llama reclasificación.

Un *raster* es una malla o matriz regular de celdas de un área determinada donde cada una de estas celdas tiene un valor. Para reclasificar un *raster* usamos la opción “*Reclassify*” ubicada dentro de la extensión “*Spatial Analyst*” (figura 14). Aquí se pueden definir los valores de cada rango y el nuevo valor que se le quiere asignar. En la figura 15 se ve como queda la leyenda de una reclasificación del mapa de pendientes según la tabla 5 del capítulo VIII Determinación de los factores condicionantes.

Dentro de “*Reclassify*” podemos definir el número de clases que se desea para el presente mapa y qué rango de valores se va a aplicar en la ventana de *Break Values*. Para el caso de las pendientes, se seleccionó 4 clases y los valores para *break values* serían: 15, 30, 50 y 90 de acuerdo a la tabla 5.

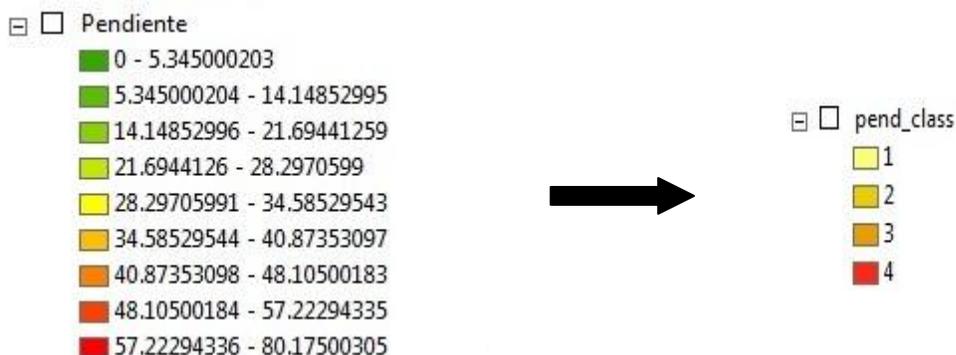
Al hacer esta reclasificación el resultado es un nuevo *raster* en el que las pendientes entre 0-15° se convierten en una sola agrupación que adopta el valor 1, de 15-30° el valor 2, de 30 a 50° el valor de 3 y >50° el valor de 4.

FIGURA 14 PROCEDIMIENTO DE RECLASIFICACIÓN DE UN RASTER



Fuente: Investigación de campo; obtenido en ArcGis v. 9.3.

FIGURA 15 RESULTADO DE LA RECLASIFICACIÓN DE LA PENDIENTE EN 4 CATEGORÍAS



Fuente: Investigación de campo; obtenido en ArcGis v. 9.3.

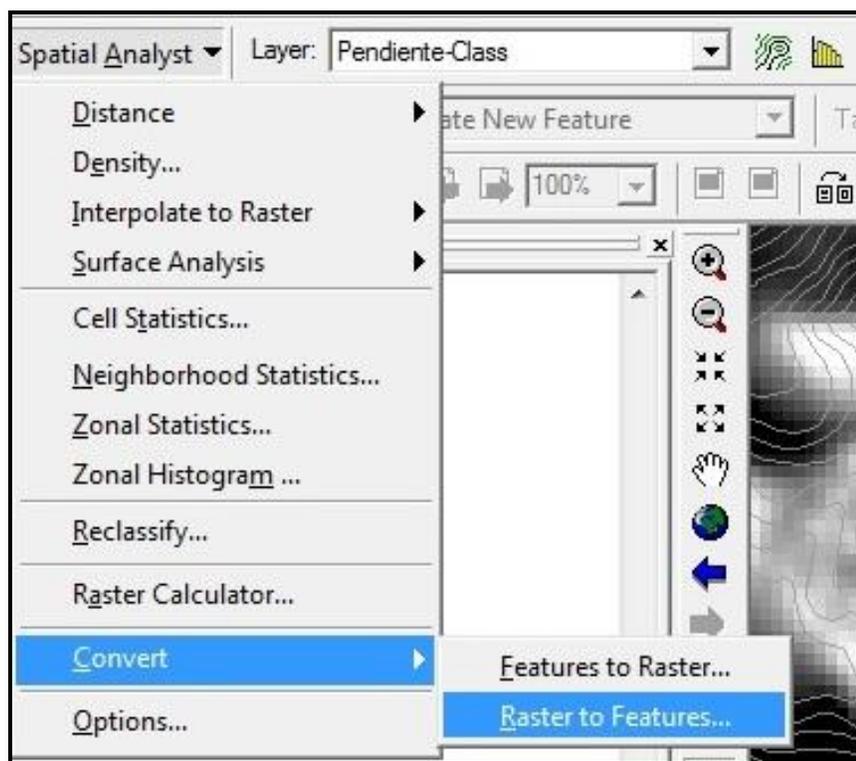
d) Conversión de *Raster* a capa Vectorial (*Feature*)

Los valores de 1 a 4 obtenidos en la etapa anterior hay que cambiarlos por la ponderación obtenida en la matriz de susceptibilidad y debido a que estos cambios no pueden hacerse en un *raster*, primero hay que

convertirlo a capa vectorial (*feature*). Para realizar esta transformación se utiliza la opción *Convert _ Raster to feature* de la extensión *Spatial Analyst* (figura 16). Una vez creada la capa en formato vector, se cambian los campos del rango 1 por el valor obtenido en la matriz de susceptibilidad, y así sucesivamente para los otros tres rangos.

Una vez terminada esta operación, y en vías de que sólo se pueden hacer operaciones con capas si estas están en formato *raster*, se vuelve a convertir la capa *vectorial a raster*, usando los nuevos valores de ponderación introducidos. La reclasificación de capas vectoriales se explica en el siguiente apartado.

FIGURA 16
CONVERSIÓN DE RASTER A VECTOR (FEATURE)



Fuente: Investigación de campo; obtenido en *ArcGis v. 9.3*.

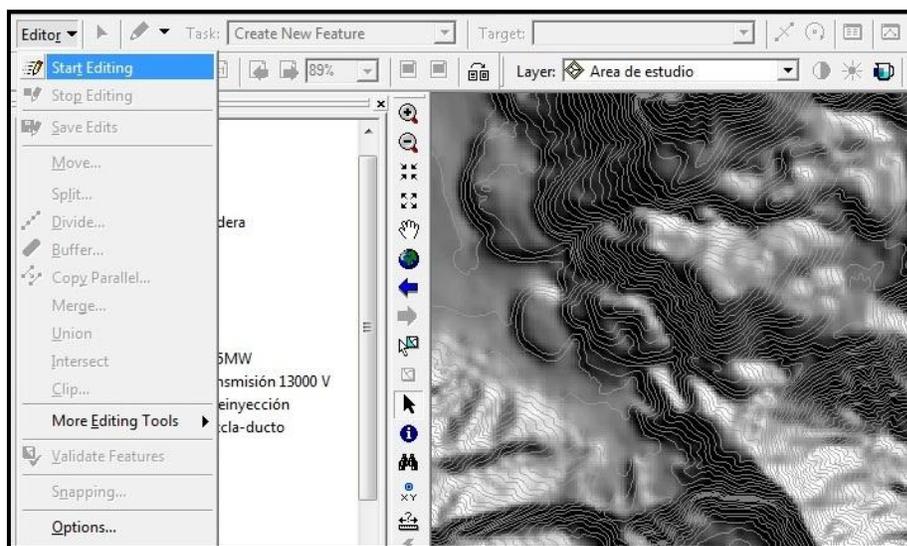
e) Reclasificación de capas vectoriales

Las capas vectoriales son aquellas que se expresan como puntos, líneas o polígonos y llevan asociadas una base de datos con sus correspondientes campos. Suponiendo una capa vectorial del uso de suelo, se podría tener cientos de polígonos definiendo cada una de las clases de uso (urbano, bosque denso, entre otras).

El procedimiento para reclasificar todas esas clases en cuatro categorías es el siguiente:

Antes de iniciar la edición se creará un campo nuevo (*Add Field*) en la tabla, al que se designará [COD]. Este será de carácter numérico donde se va a introducir un código o número entero, para agrupar las categorías. Considerando la capa de los usos de suelo, se introducen los valores [COD] de cada categoría de acuerdo con la tabla 5 que se muestra en el Capítulo VIII. Esto se realiza mediante la barra de Editor. Se inicia una sesión de edición (*“Start Editing”*), seleccionando la capa a editar (figura 17).

FIGURA 17
EDITOR DE CAPAS



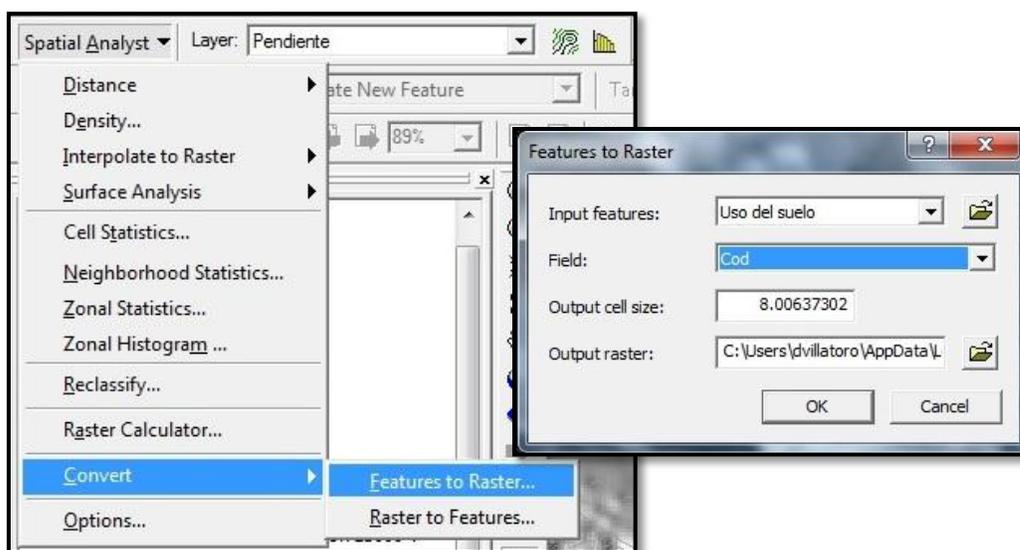
Fuente: Investigación de campo; obtenido en ArcGis v. 9.3.

Una vez introducidos los códigos, se cierra la sesión de edición y convertiremos la capa vectorial a “ráster” con la aplicación “Convert” del *Spatial Analyst*. Se indicará que la conversión se quiere hacer a partir del campo de código [COD]. Así se obtiene un *raster* con cuatro categorías (figura 18).

Al igual que en el *reclassify* es necesario cambiar los valores del campo [COD] por la ponderación obtenida en la matriz de susceptibilidad y habrá que convertirlo en vector como ya se ha explicado para el caso anterior. Algunas de estas conversiones pueden evitarse si de una sola vez se agregan los campos [COD] y [SUSC], donde se entrará el valor ponderado en la matriz de susceptibilidad, es decir valor Pr.

La opción *Output cell size* permite definir la dimensión de píxel del *ráster* que se pretende crear. Normalmente el programa genera una medida de píxel por defecto según cree más adecuada en función de la capa de entrada.

FIGURA 18 CONVERSIÓN DE VECTOR A RASTER



Fuente: Investigación de campo; obtenido en ArcGis v. 9.3.

f) Relleno de la matriz de susceptibilidad

Para completar la matriz de susceptibilidad según se explica en el apartado 9.1 “Matriz de Susceptibilidad”, se aplica en el S/G un sistema de búsquedas consistente en identificar qué cantidad de movimientos de ladera se ubican en cada categoría definida para cada uno de los factores condicionantes, ya detallados en la tabla 5.

Estas búsquedas son multi-operacionales, eso quiere decir que a la vez que se selecciona una categoría se realiza una búsqueda dentro de la misma y comprobamos en la tabla de movimientos cuántos de ellos han sido seleccionados. A continuación se explican en más detalle estas acciones.

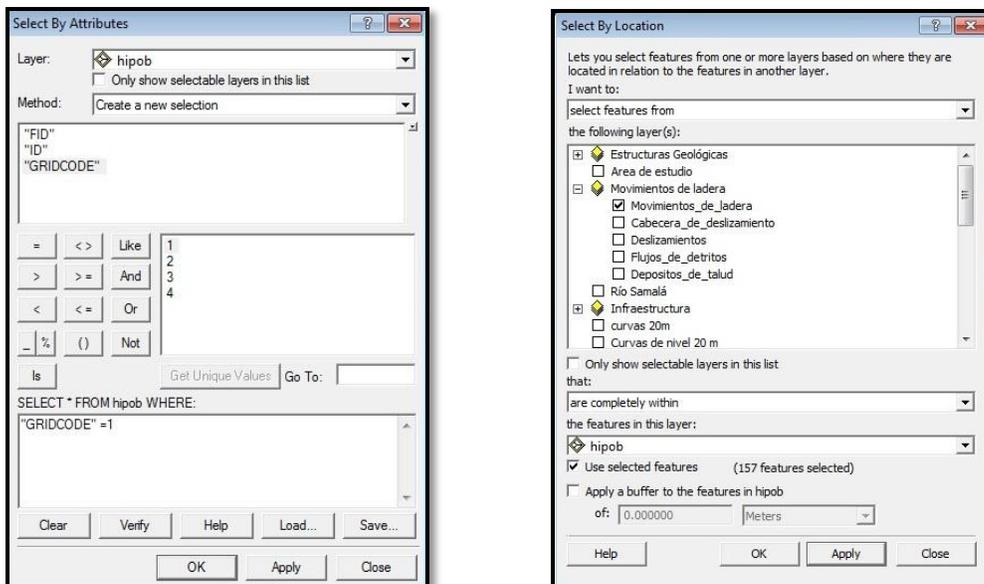
Primeramente se selecciono aquellas categorías cuyo código [COD] sea igual a 1. Para seleccionar utilizaremos la opción de la barra de herramientas: *Selection* → *Selection by attributes*. Para ello se especifica el layer del cual se quiere hacer la selección y el atributo a buscar, [COD]=1 en este caso. (Figura 19).

A continuación se buscará cuantos movimientos caen dentro de la selección anteriormente realizada. La manera de realizar esta consulta es a través de: *Selection* → *Selection by Location*. En esta ventana se selecciona la capa o layer donde se encuentran los movimientos de ladera y se hará referencia a que estos tengan su centro completamente dentro de cada una de las categorías seleccionadas en el paso de seleccionar por atributos (figura 20).

Luego de realizado lo anterior se abrirá la tabla de atributos vinculada a los movimientos de ladera y se comprobará cuántos de esos movimientos han sido seleccionados, siendo ese número el que se introducirá en la casilla de la matriz de susceptibilidad (tabla 6). Todo este procedimiento se repetirá

para las otras categorías, es decir [GRIDCODE= 2, 3,4], y para todos los mapas de cada uno de los factores condicionantes hasta completar la matriz.

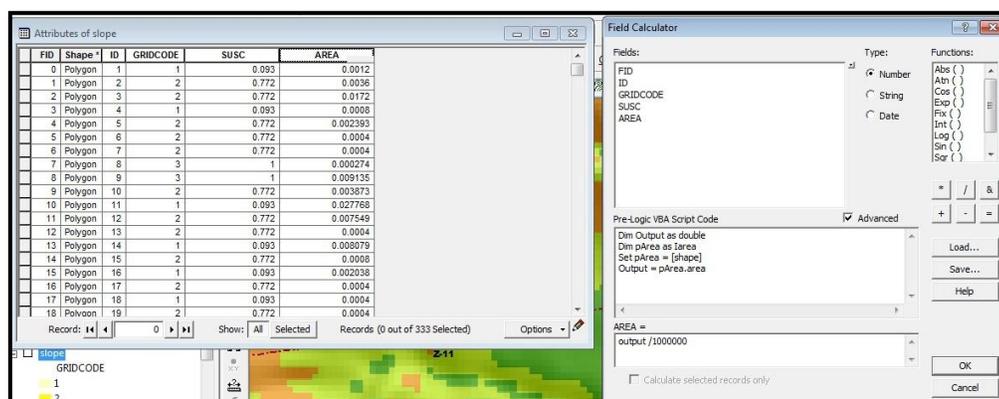
FIGURAS 19 Y 20 SELECCIONAR POR ATRIBUTOS Y SELECCIONAR POR LOCALIZACIÓN



Fuente: Investigación de campo; obtenido en ArcGis v. 9.3.

Una vez conocidos el número de movimientos de ladera por cada categoría de cada factor condicionante según se puede apreciar en la Matriz de susceptibilidad (Tabla 6) hay que conocer el área de cada una de las categorías de los diferentes mapas. Para ello, si se abre la tabla de atributos de la capa correspondiente (el mapa de pendientes en este caso), se oprime el botón derecho sobre la columna [AREA] > *Calculate Values*, nos aparecerá una ventana como la que se observa en la figura 21, donde el texto para la obtención del área en el cuadro *Script Code* puede copiarse en el modo *Advanced* abriendo la ayuda (*Help*). Para realizar esto se debe estar en modo edición.

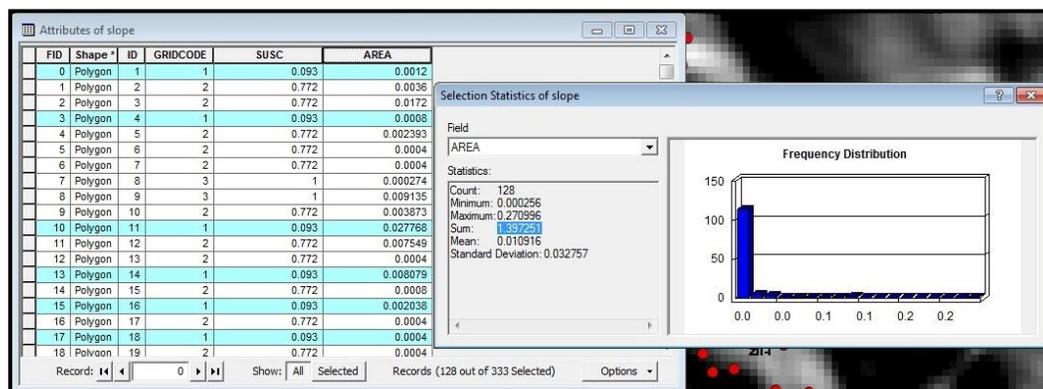
**FIGURA 21
CALCULO DEL ÁREA**



Fuente: Investigación de campo; obtenido en ArcGis v. 9.3.

Se procede a rellenar las casillas de área en la hoja de cálculo. Para el caso del mapa de pendientes, después de haber realizado la acción anterior, aplico Selection > Selection By Attributes, Selecciono cuyos campos [GRIDCODE] son iguales a 1, Hacer clic sobre el botón derecho de la columna [AREA] > Statistics. A continuación se puede observar en el apartado Sum, el valor del área en km² para la categoría 1 del mapa de pendientes (figura 22).

**FIGURA 22
CALCULO DEL ÁREA DEL GRIDCODE=1 DEL MAPA DE
PENDIENTES**



Fuente: Investigación de campo; obtenido en ArcGis v. 9.3.

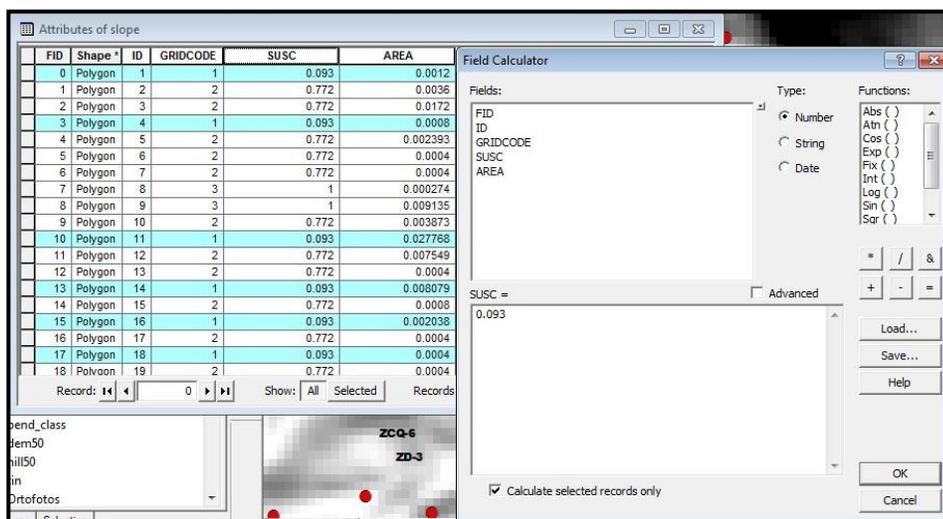
Ese valor se introduce en la hoja de cálculo. Hay que realizar lo mismo para cada categoría y cada mapa. De acá se continua el procedimiento descrito en el apartado 9.1, hasta conocer los valores de Pr generados por la matriz de susceptibilidad, el cual debe ser introducido en la hoja de cálculo (Tabla 6).

El siguiente paso es introducir el valor Pr de susceptibilidad de la matriz en el mapa correspondiente. Para realizar lo anterior se crea el campo [SUSC] en la tabla de Atributos. A continuación se introduce en dicha columna el valor correspondiente de susceptibilidad (utilizando 0,093 para el ejemplo). Como pudieran existir centenares de entradas para [GRIDCODE]=1 y no se quiere introducirlas una a una, se establece una selección por atributos ya anteriormente comentada.

Una vez hecha esta seleccion se situará en la cabecera de la columna recién creada [SUSC] y se dará clic al botón derecho para seleccionar Calculate Values (figura 23) y en la ventana se introduce el valor (para este ejemplo 0,093). La operación se repite para el resto de [GRIDCODE= 2, 3, 4] introduciendo el valor correspondiente.

A continuación, se convierten las capas a raster empleando la herramienta Spatial Analyst > Convert > Features to Raster (apartado d). En este punto se han generado todos los mapas base para realizar el análisis de susceptibilidad.

FIGURA 23 INTRODUCCIÓN DEL VALOR PARA GRIDCODE=1 DEL MAPA DE PENDIENTES



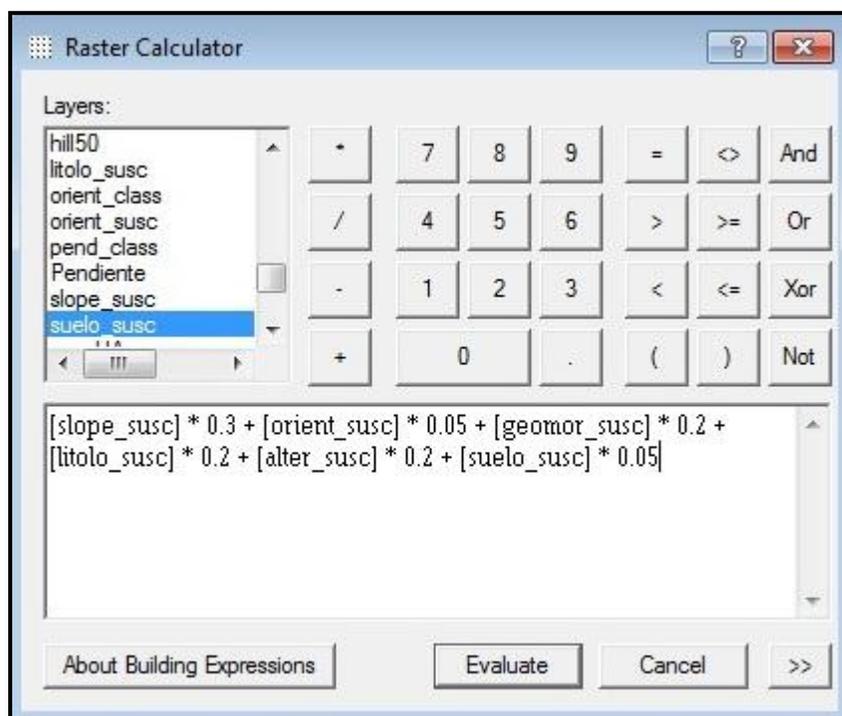
Fuente: Investigación de campo; obtenido en ArcGis v. 9.3.

g) Suma de capas (*Raster Calculator*)

En el momento de usar la opción *Raster Calculator* en nuestro análisis, los diferentes mapas de los factores condicionantes considerados están ponderados según la matriz de susceptibilidad y en formato *raster*. Lo siguiente es tratar esa información para obtener el mapa de susceptibilidad final para cada una de las opciones según el peso de los factores condicionantes (tabla 4).

La opción *Raster Calculator* se encuentra dentro de la extensión *Spatial Analyst*. Como ejemplo didáctico en la siguiente figura (figura 24) se muestra la sintaxis a emplear para la suma de los diferentes mapas según la opción A para los coeficientes de peso de los factores condicionantes de la tabla 7 “Coeficientes de peso de los factores condicionantes”, y que nos permitirá obtener el mapa de susceptibilidad de nuestra zona de estudio; esto se debe realizar con cada una de las opciones planteadas en la tabla 7.

FIGURA 24
USO DE RASTER CALCULATOR



Fuente: Investigación de campo; obtenido en *ArcGis v. 9.3*.

No todos los factores condicionantes tienen la misma importancia, ya que eso depende de varias consideraciones (escala y calidad de la información por ejemplo). Se puede asignar esa diferencia de importancia multiplicando cada mapa base (mapas de los factores condicionantes en formato raster) por un porcentaje que puede variar bien por la experiencia de la persona que genera el mapa o por la aplicación de diversas opciones.

Ese porcentaje se expresa en tanto por uno. Por ejemplo en la figura anterior, al mapa de pendientes se le dio una importancia del 30%, lo que significa multiplicar ese mapa por 0,3, y así sucesivamente para los otros mapas. El resultado es un mapa raster que muestra la susceptibilidad del área de estudio.

Sin embargo la leyenda muestra todo un rango gradado denominado (*stretched*) que puede observarse en la simbología al hacer doble clic sobre la capa. Como se mencionó al principio, el mapa resultante constará de 4 rangos de susceptibilidad. Para obtenerlos, en la simbología se selecciona “*Classified*” y luego se clasifica en 4 clases según el método “*Equal Interval*” (figura 25).

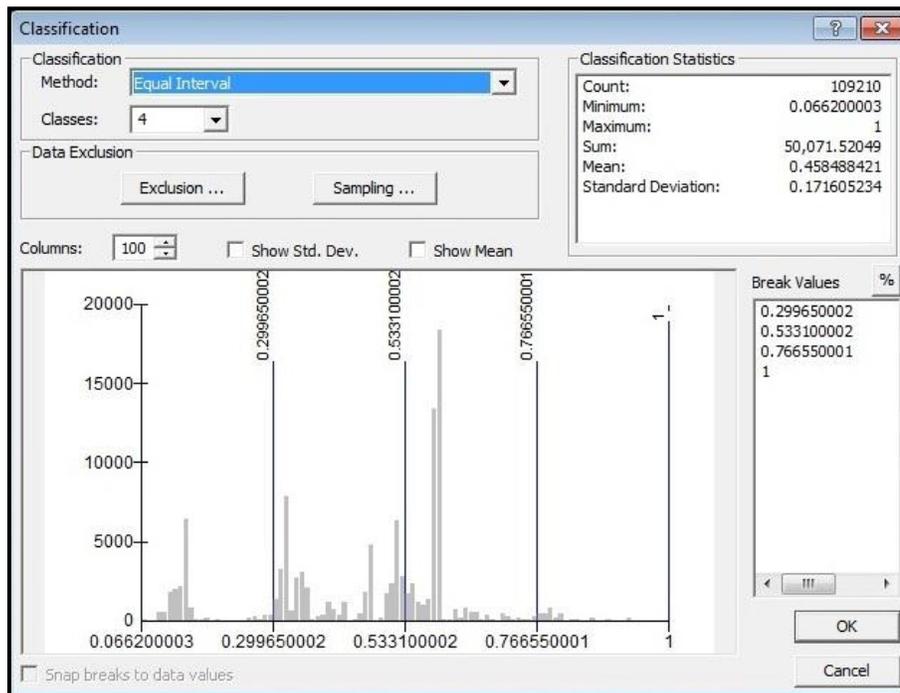
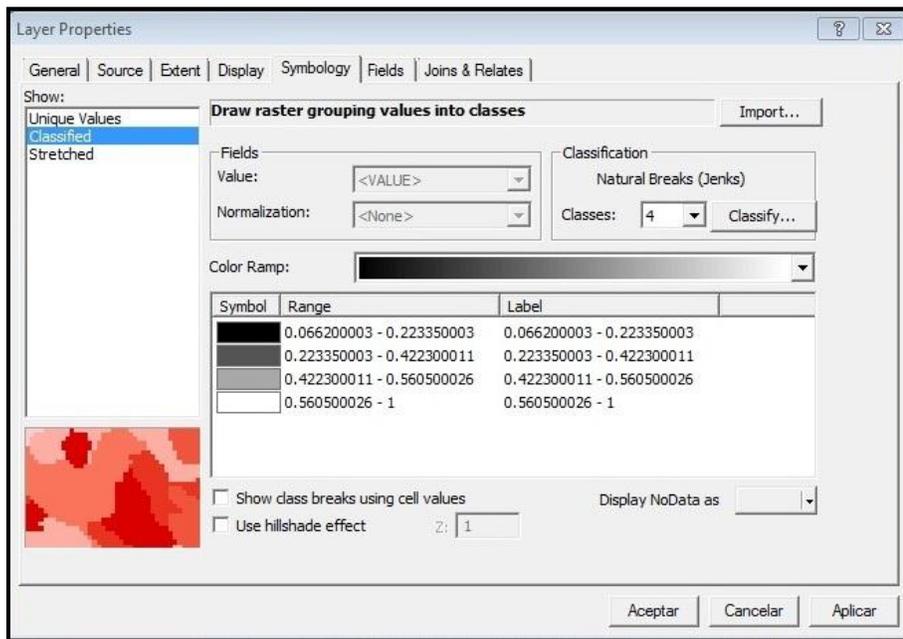
Es importante mencionar que el resultado obtenido de aplicar el *Raster Calculator* genera un *raster* temporal llamado *Calculation*. Para guardar el mapa resultante se da un clic derecho sobre la capa y seguidamente: *Data* ► *Export Data*. En *location* se busca la carpeta destino y se guarda con un nombre que se introduce en la casilla *Name*.

Seguidamente convertiremos el mapa de susceptibilidad de las cuatro hipótesis a formato vectorial con los nombre hipoA.shp, hipoB.shp, hipoC.shp e hipoD.shp. Procedemos con *Spatial Analyst* > *Convert* > *Convert Raster To Feature*; como en el apartado d) Conversión de *raster* a capa vectorial (*feature*).

Posterior a esto hay que validar cual de los cuatro mapas de susceptibilidad natural obtenidos se ajusta más a la realidad por medio del número de movimientos de ladera, por medio del siguiente procedimiento:

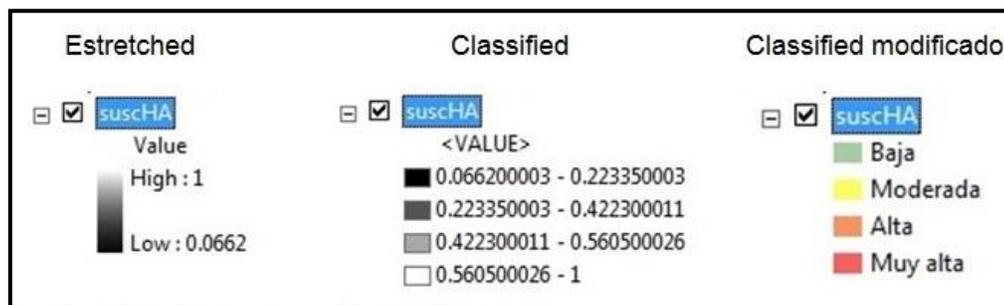
Una vez se obtienen las capas vectoriales, se vuelve a realizar una búsqueda utilizando *Select By Attributes* y *Select By Location*; en esta ocasión, se tratará de analizar cuantos movimientos de la base de datos se encuentran dentro de cada uno de los rangos de susceptibilidad, Aquella opción donde el mayor número de movimientos estén entre las susceptibilidades alta, y muy alta, será la escogida como el mapa de susceptibilidad natural final.

FIGURA 25
PROCESO DE CLASIFICACIÓN DE LA LEYENDA



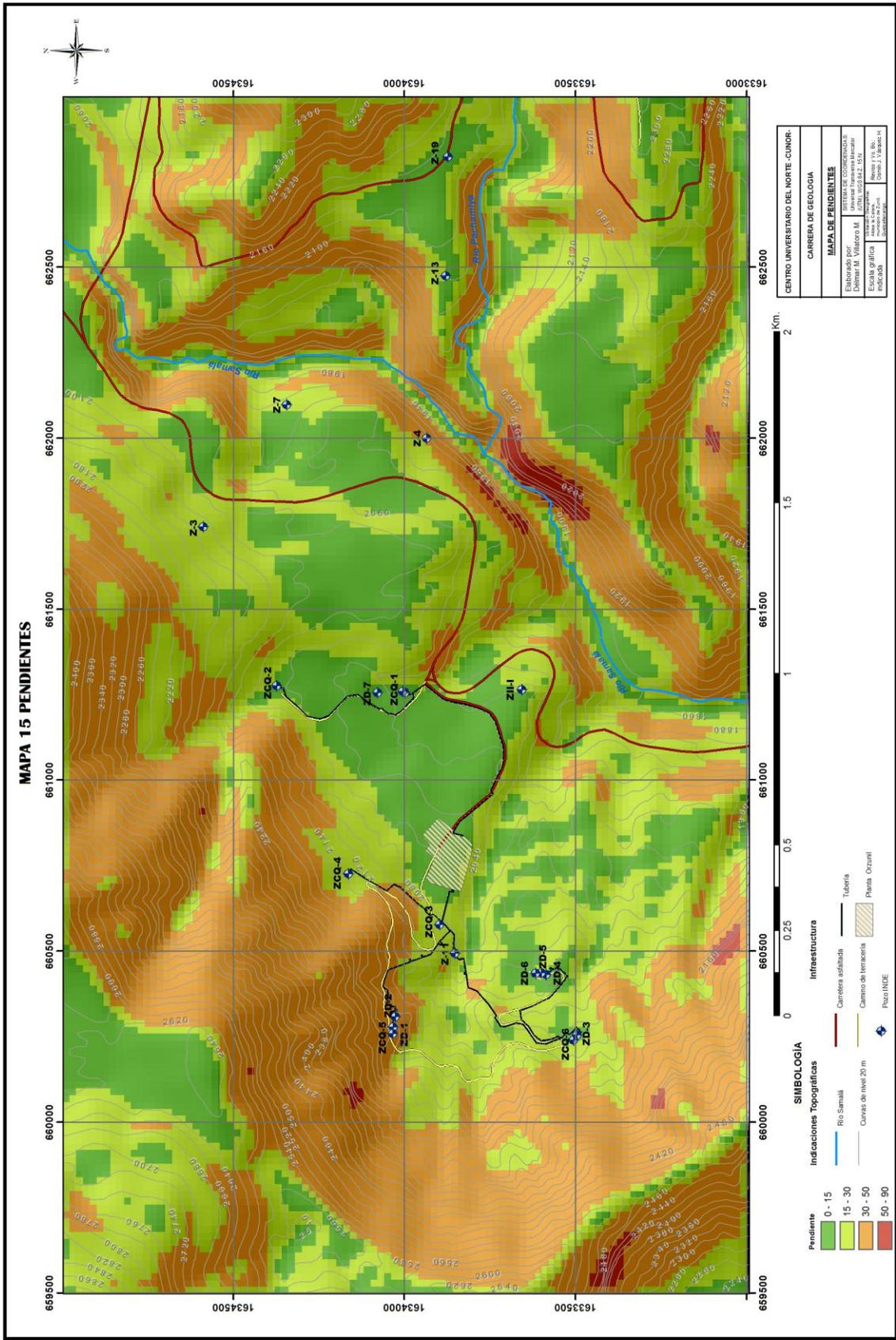
Fuente: Investigación de campo; obtenido en ArcGIS v. 9.3.

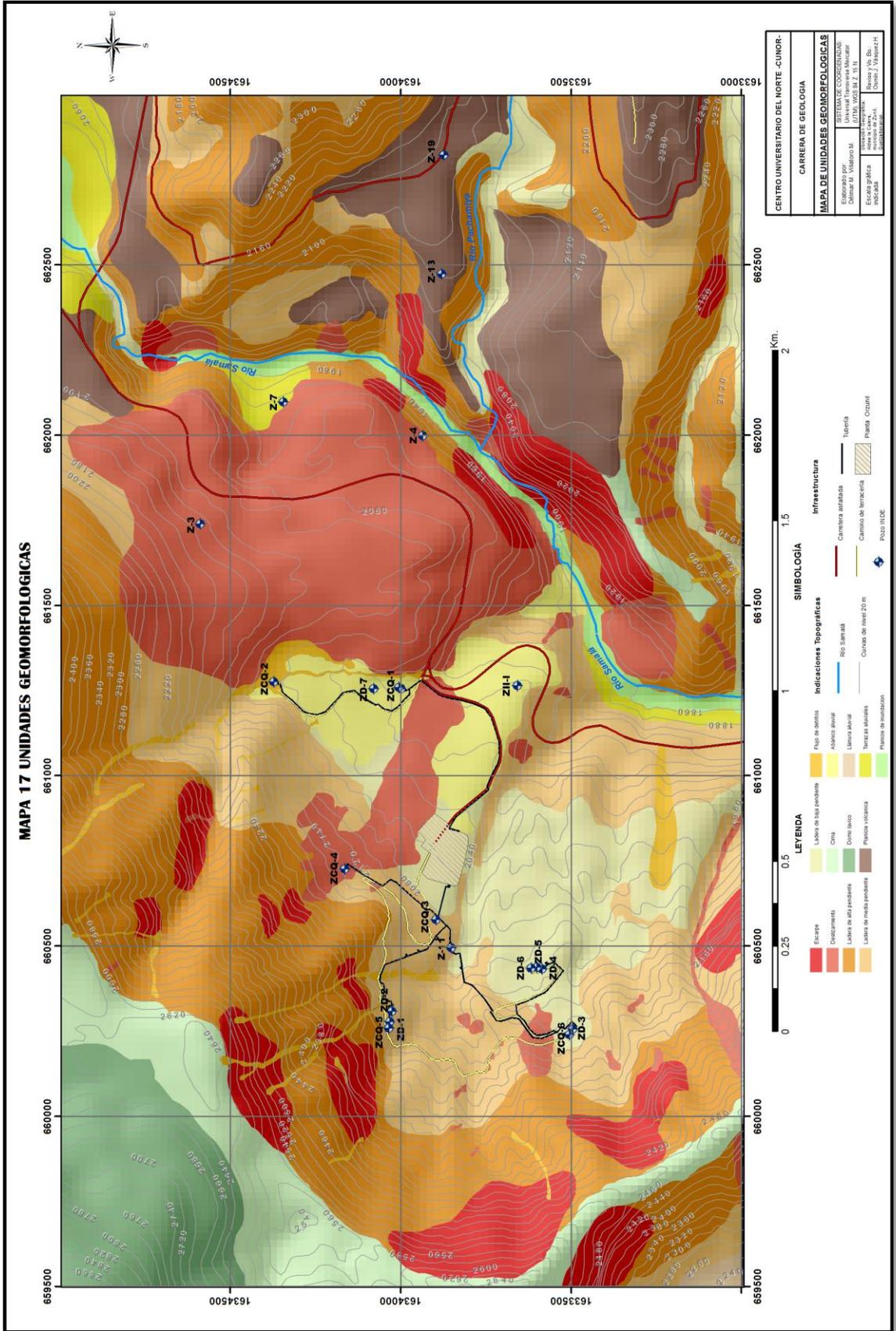
FIGURA 26
PROCESO EN LA DEFINICIÓN DE LA LEYENDA

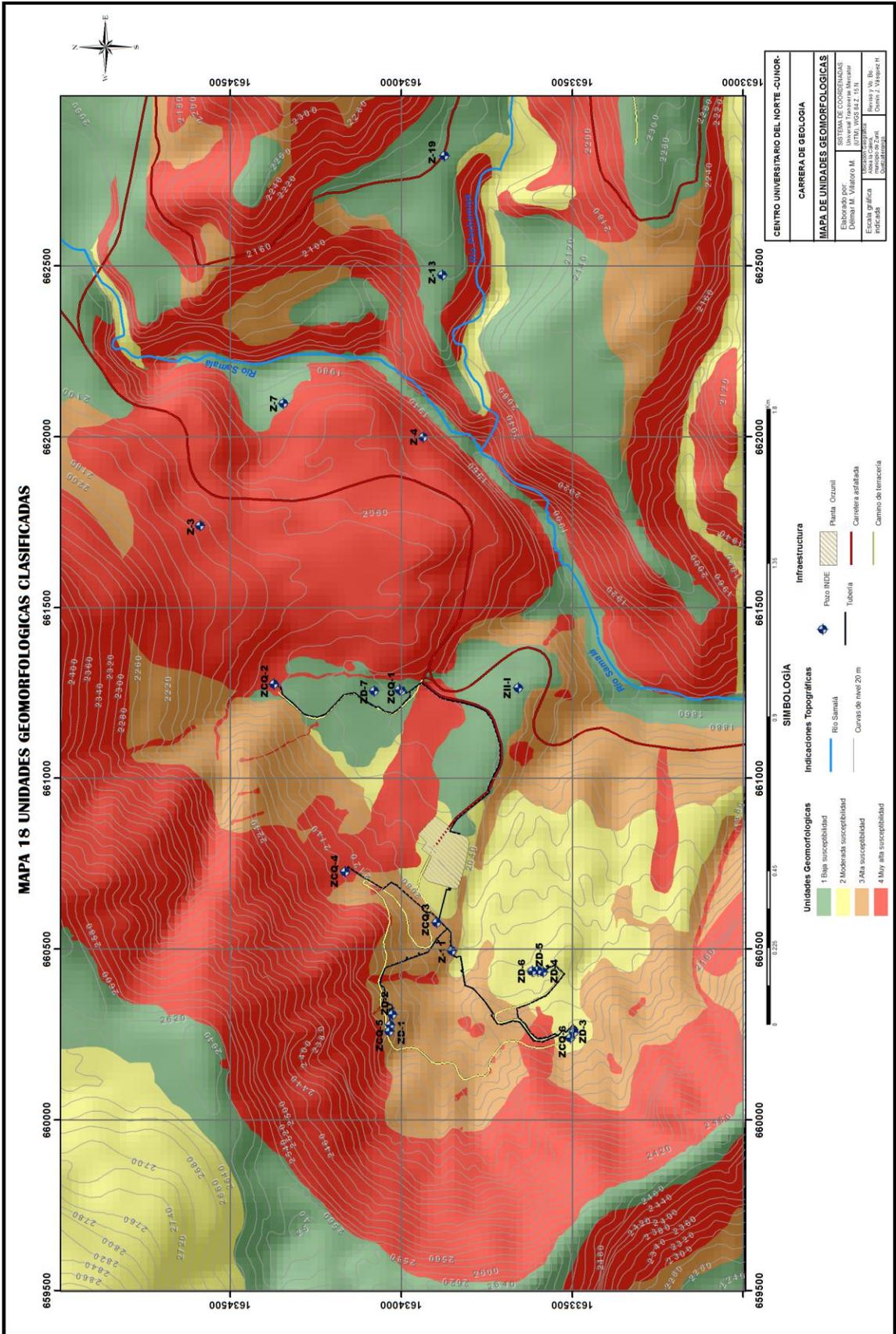


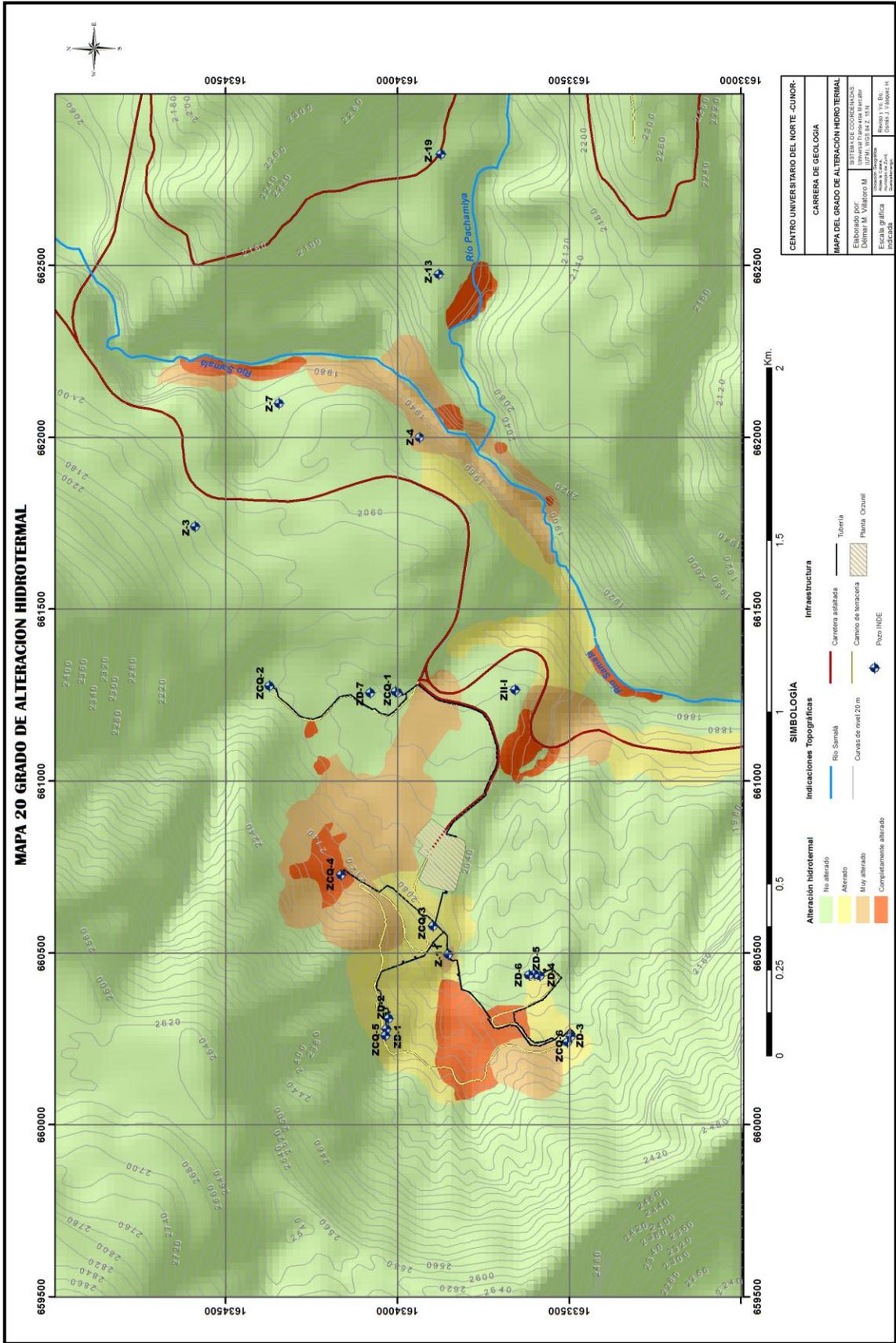
Fuente: Investigación de campo; obtenido en *ArcGis v. 9.3*.

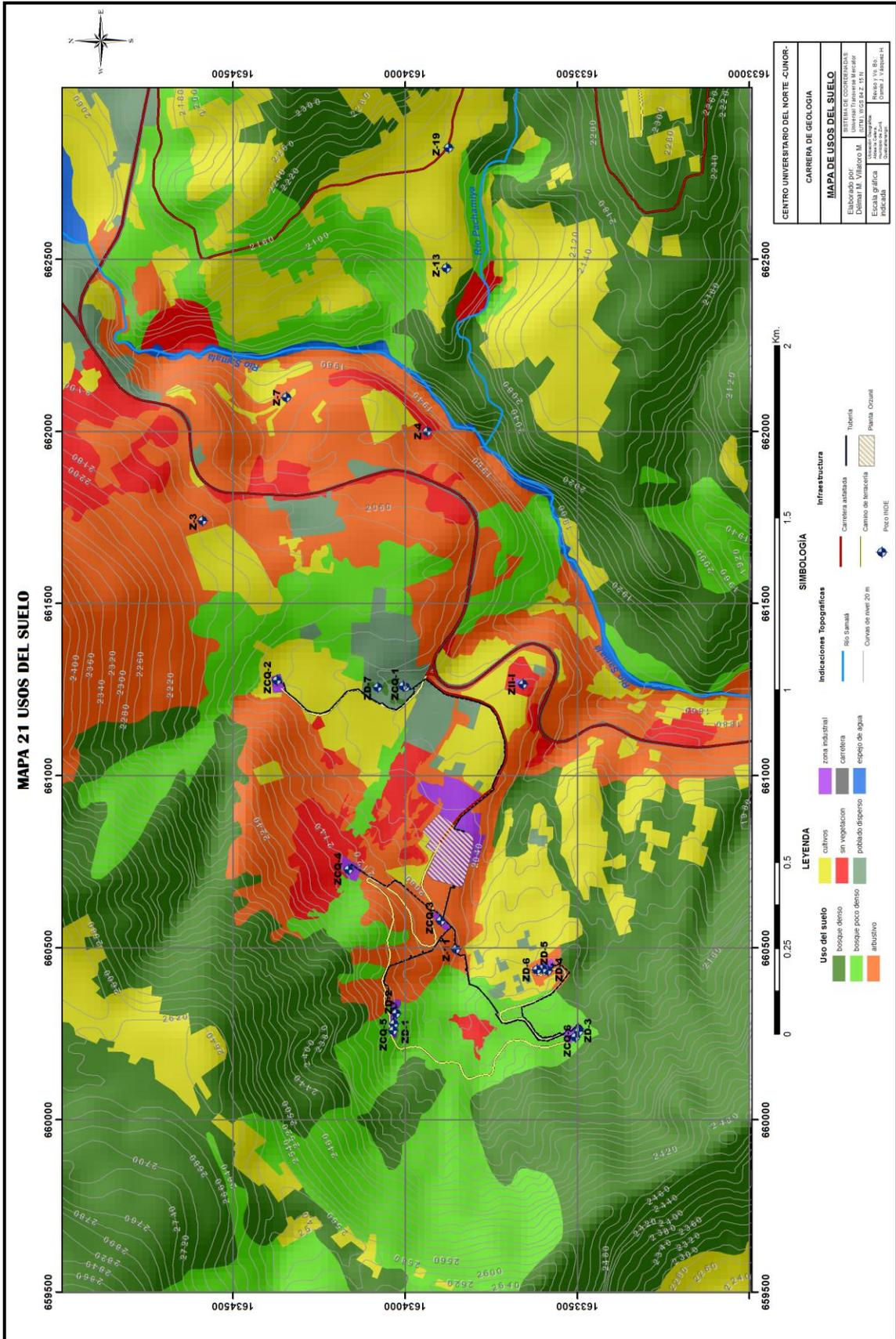
ANEXO 4
MAPAS DE LOS FACTORES CONDICIONANTES



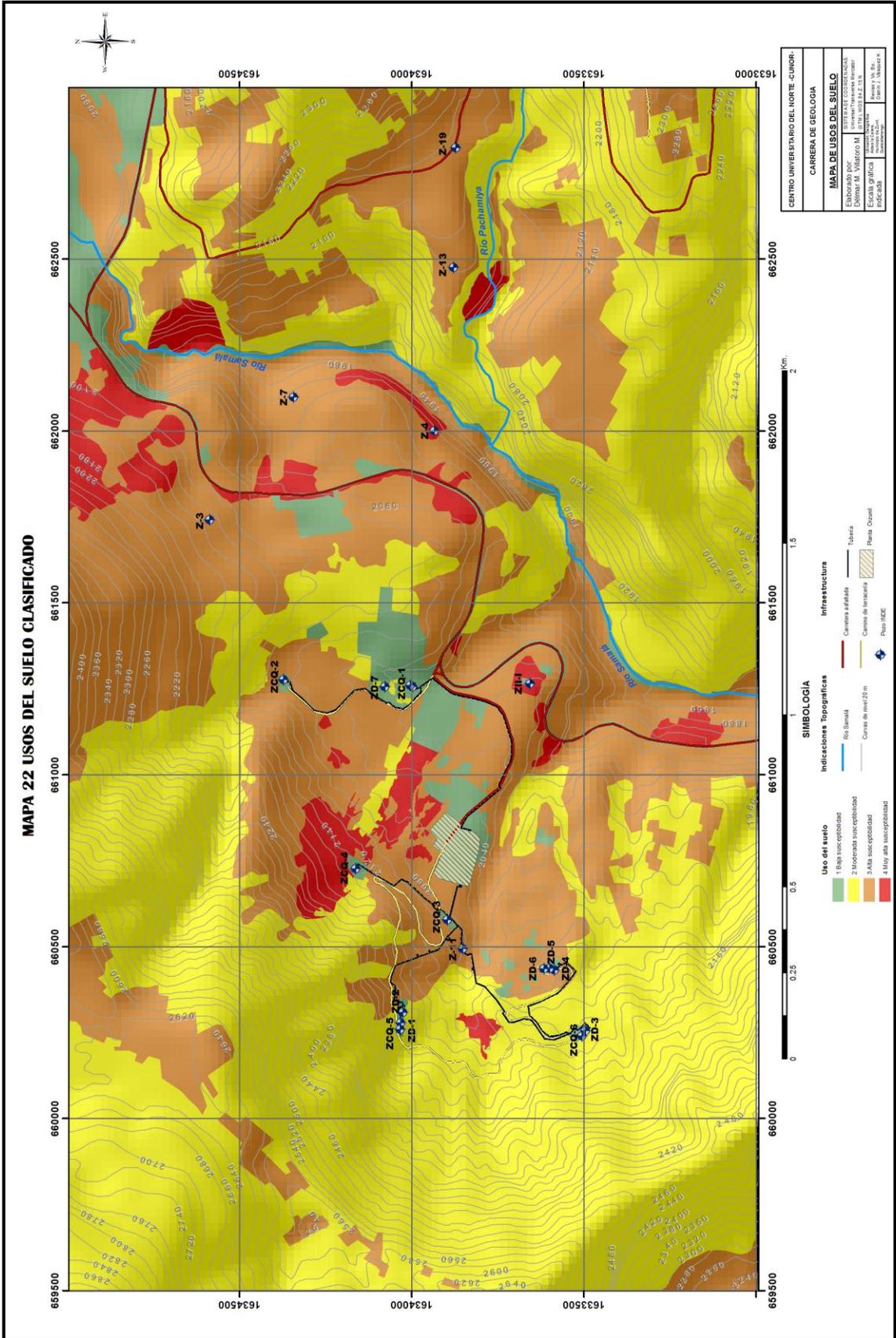








CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE - CUNOR-	
CARRERA DE GEOLOGIA	
MAPA DE USOS DEL SUELO	
Elaborado por:	INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COLOMBIA
Diseñado por:	LITINA LUJAN ZAVALA
Escala gráfica:	1:50,000
Revisó y aprobó:	ABRAHAM GONZALEZ
Indicador:	DOMINGO J. FIGUEROA



ANEXO 5

CARACTERIZACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS DE LADERA QUE HAN CAUSADO DAÑOS A LA INFRAESTRUCTURA DEL CAMPO GEOTÉRMICO ZUNIL I

El campo geotérmico Zunil I ha sido afectado de manera recurrente en las últimas dos décadas principalmente por cuatro movimientos de ladera, los cuales han causado daños importantes a la infraestructura del campo afectando su normal funcionamiento; para contribuir en la toma de medidas de mitigación de los daños ocasionados por los movimientos de ladera antes mencionados, a continuación se presenta una caracterización de cada uno de estos, basada en la ficha de campo que se presentó en el anexo 1.

Se inicia por el deslizamiento ocurrido en enero de 1991, el cual causo daños en el cabezal y sepulto el pozo ZCQ-4, después el deslizamiento que tuvo lugar en septiembre del 2010 en la zona cercana a la plataforma de los pozos ZCQ6 y ZD3 dañando la tubería de conducción de estos pozos hacia la planta; posteriormente el flujo de derrubios que daño el cabezal de válvulas y enterró la plataforma del pozo ZCQ-2, finalmente el flujo de detritos al Norte de la plataforma de los pozos ZCQ-5, ZD-1 y ZD-2; estos últimos activados durante la depresión 12E en octubre de 2011.

1. CARACTERIZACION DEL MOVIMIENTO DE LADERA QUE AFECTO LA INFRESTRUCTURA DEL POZO ZCQ-4

a) TIPO DE MOVIMIENTO: Deslizamiento Complejo

b) FECHA DE OCURRENCIA Y UBICACIÓN:

Fecha en que ocurrió el movimiento: enero de 1991.

Coordenadas de la cabecera (X, Y): 660590, 1634324 UTM WGS84
Z15N

Departamento: Quetzaltenango. Municipio: Zunil. Aldea: La Calera Calle/Número de las viviendas/Otros: Dentro de las instalaciones del campo geotérmico Zunil I.

c) CONDICIONES TOPOGRÁFICAS Y GEOMETRICAS

Altura de la corona: 2280 (msnm)

Altura del talud (T): 140 (m)

Pendiente promedio del talud originado: 44(°)

Pendiente del talud original 35(°)

Grietas en la parte superior de la corona: (no)

Abertura: x (cm) Longitud: x (cm) Profundidad: x (cm)

Escalones (4) Altura 20 (m)

Medidas de la superficie de ruptura (ver figura No. 8.1):

Ancho (A): 130 (m)

Largo (L): 60 (m)

Espesor (E): 50 (m)

Volumen estimado (A x L x E): 390,000 (m³)

d) MATERIAL DESLIZADO: Suelos, Rocas, Árboles

e) SUPERFICIE DE AFECTACIÓN

Ancho(a): 150 (m) Largo (l): 480 (m) Área (a x l): 72,000 (m²); para referencia de las dimensiones ver figura 8.1.

Ocupando cauce de río o quebrada (No) Permanece: (NO).

Viabilidad de movilizar el material: por medio de maquinaria.

f) FACTORES GENERADORES

Factores Naturales: Escorrentía Superficial y Lluvias.

Factores Antrópicos: Cortes de caminos y/o construcción.

Comentarios: En la zona se da la combinación de varios factores naturales que la hacen propensa a movimientos en masa y la

lluvia especialmente las lluvias muy intensas, son el principal agente disparados de estos fenómenos.

g) EVALUACIÓN DE DAÑOS

Este deslizamiento causó daños importantes en la infraestructura del pozo ZCQ-4, arrastrando el cabezal y enterrando el pozo. Este deslizamiento causó la muerte de 23 personas. Además también causó daños en Cultivos.

h) ELEMENTOS EXPUESTOS: La plataforma y tuberías del pozo ZCQ-4.

i) PROPUESTAS DE SOLUCION

La ladera de este deslizamiento parece haber alcanzado un cierto estado de equilibrio, sin que se haya dado otro deslizamiento en más de 20 años, sin embargo la acumulación de depósitos de talud al pie de este deslizamiento, representan un peligro potencial para el flujo de derrubios; por lo que se propone evitar el colocar obras de infraestructura en la probable zona de afectación, la cual se muestra en la imagen 3.

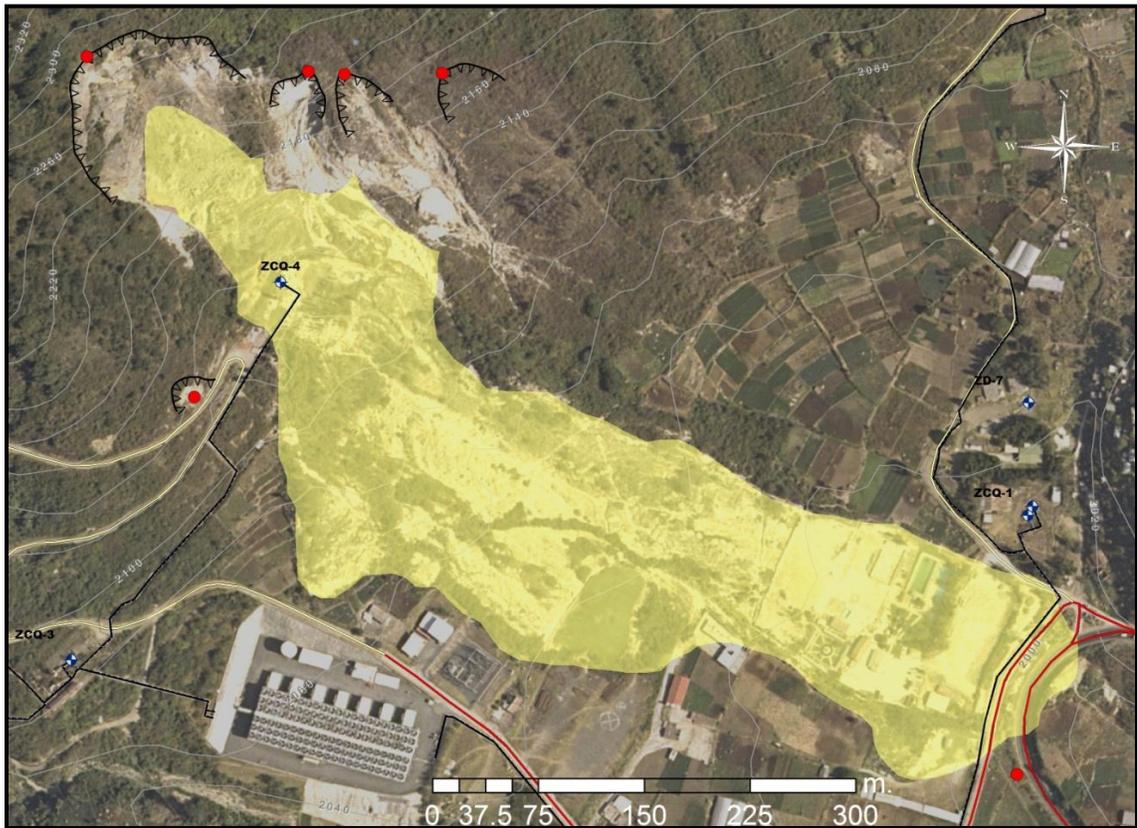
j) FOTOGRAFIAS E IMÁGENES

FOTOGRAFÍA 39
VISTA PANORÁMICA DEL DESLIZAMIENTO QUE CAUSO
DAÑOS EN EL POZO ZCQ-4



Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2011 .

IMAGEN 3
ZONA AFECTADA POR EL DESLIZAMIENTO OCURRIDO
EN ENERO DE 1991 QUE CAUSO DAÑOS EN EL POZO
ZCQ-4



FUENTE: Investigación de campo, en ArcGis v. 9.3.

2 CARACTERIZACION DEL MOVIMIENTO DE LADERA EN LAS CERCANIAS DE LA PLATAFORMA DE LOS POZOS ZCQ-6 Y ZD3

a) TIPO DE MOVIMIENTO: Deslizamiento rotacional

a) FECHA DE OCURRENCIA Y UBICACIÓN

Fecha en que ocurrió el movimiento: septiembre de 2010.

Coordenadas de la cabecera (X, Y): 660108, 1633590 UTM WGS84 Z15N

Departamento: Quetzaltenango. Municipio: Zunil. Aldea: La Calera

Calle/Número de las viviendas/Otros: Dentro de las instalaciones del campo geotérmico Zunil I.

b) CONDICIONES TOPOGRÁFICAS Y GEOMETRICAS

Altura de la corona: 2240 (msnm)

Altura del talud (T): 60 (m)

Pendiente promedio del talud originado: 65(°)

Pendiente del talud original 48(°)

Grietas en la parte superior de la corona: (no)

Abertura: x (cm) Longitud: x (cm) Profundidad: x (cm)

Escalones (1) Altura 18 (m)

Medidas de la superficie de ruptura (ver figura No. 8.1):

Ancho (A): 84 (m)

Largo (L): 30 (m)

Espesor (E): 20 (m)

Volumen estimado (A x L x E): 50,400 (m³)

c) MATERIAL DESLIZADO: Suelos, Rocas, Árboles

d) SUPERFICIE DE AFECTACIÓN (ver figura No.28)

Ancho(a): 108 (m) Largo (l): 215 (m) Área (a x l): 23,220 (m²)

Ocupando cauce de río o quebrada (No) Permanece: (NO)

Viabilidad de movilizar el material: por medio de maquinaria.

e) FACTORES GENERADORES

Factores Naturales: Escorrentía Superficial y Lluvias.

Factores Antrópicos: Cortes de caminos y/o construcción.

Comentarios: En la zona se da la combinación de varios factores naturales que la hacen propensa a movimientos en masa y la lluvia especialmente las lluvias muy intensas, son el principal agente disparados de estos fenómenos.

f) EVALUACIÓN DE DAÑOS

Este deslizamiento acarreo y destruyó la tubería de conducción de los pozos ZCQ-06, ZD3, ZD4, ZD5 y ZD6.

Además también causó daños en el camino de terracería que comunica los pozos.

g) ELEMENTOS EXPUESTOS:

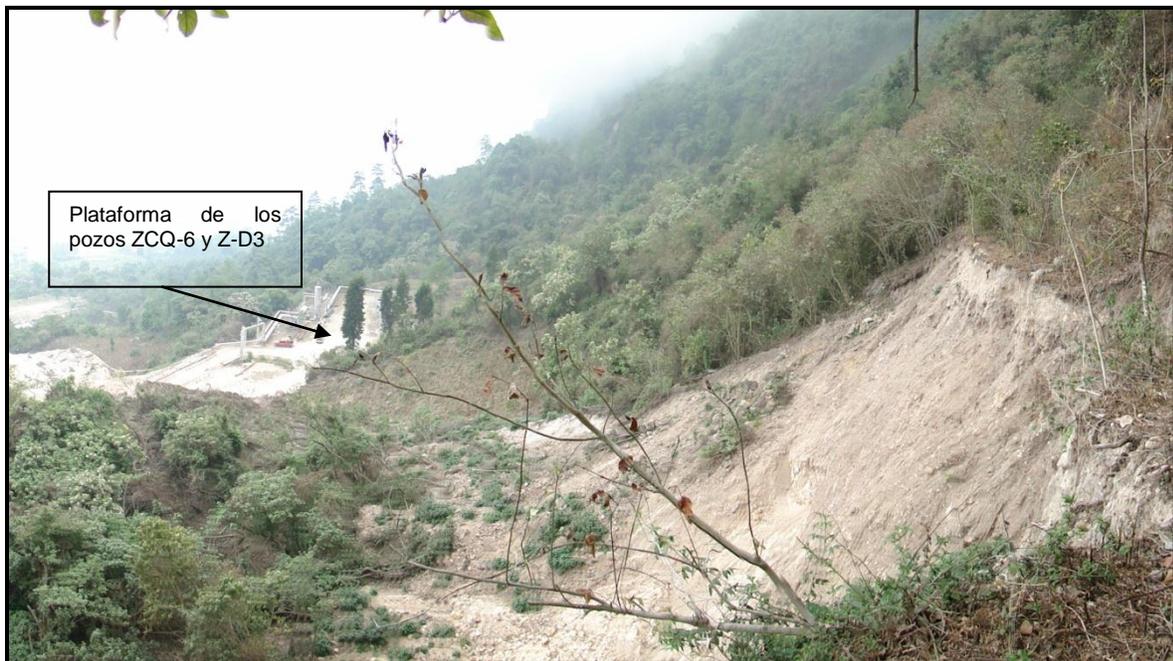
Las tuberías de los pozos antes mencionados y el camino de terracería.

h) PROPUESTAS DE SOLUCION:

Para estabilizar este movimiento de ladera se propone la realización de terraza, al menos tres para estabilizar la ladera; se sugiere también la colocación de cunetas y canales que drenen el agua de escorrentía que baja por el escarpe principal, que podría saturar el terreno ocasionando sobresaturación del depósito de talud y como consecuencia el flujo de derrubios; además se recomienda la colocación de un muro anclado de contención al pie del deslizamiento.

i) FOTOGRAFIAS E IMÁGENES

FOTOGRAFÍA 40: ZONA DEL DERRUMBE DEL 10 DE SEPTIEMBRE EN LA ZONA NOROESTE DE LA PLATAFORMA DE LOS POZOS ZCQ6 Y ZD3



Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2011.

FOTOGRAFÍA 41
ESCALÓN PRINCIPAL Y TIPO DE MATERIAL EN EL
DESLIZAMIENTO



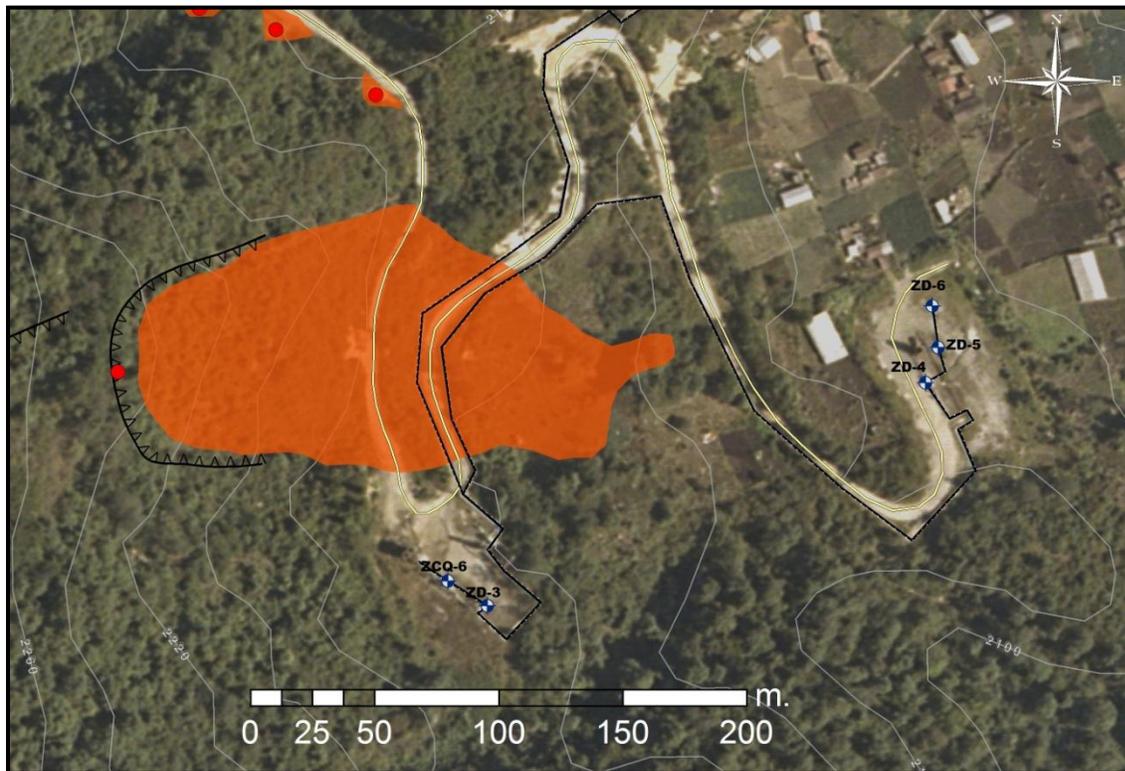
Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2011.

FOTOGRAFÍA 42
MATERIAL DESPLAZADO POR EL DESLIZAMIENTO OCURRIDO
EN SEPTIEMBRE DE 2010 QUE CAUSO DAÑOS EN LA TUBERÍA
DE CONDUCCIÓN DE LOS POZOS ZCQ-6 Y ZD3



Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2011.

IMAGEN 4
ZONA AFECTADA POR EL DESLIZAMIENTO EN LAS
CERCANÍAS DE LA PLATAFORMA DE LOS POZOS ZCQ-6 Y ZD3



FUENTE: Investigación de campo , en ArcGis v. 9.3.

3 CARACTERIZACION DEL MOVIMIENTO DE LADERA EN LAS CERCANIAS DE LA PLATAFORMA DEL POZO ZCQ-2

a) TIPO DE MOVIMIENTO:

Flujo de derrubios.

b) FECHA DE OCURRENCIA Y UBICACIÓN

Fecha en que ocurrió el movimiento: octubre de 2011.

Coordenadas de la cabecera (X, Y): 660952, 1634890. UTM WGS84

Z15N.

Departamento: Quetzaltenango. Municipio: Zunil. Aldea: La Calera.

Calle/Número de las viviendas/Otros: Dentro de las instalaciones del campo geotérmico Zunil I.

c) CONDICIONES TOPOGRÁFICAS Y GEOMETRICAS

Altura de la corona: 2380 (msnm)

Pendiente promedio del talud originado: 65(°)

Pendiente del talud original 50(°)

Grietas en la parte superior de la corona: (no)

Abertura: x (cm) Longitud: x (cm) Profundidad: x (cm)

Escalones (0)

Medidas de la superficie de ruptura (ver figura No. 8.1):

Ancho (A): 30 (m)

Largo (L): 675 (m)

Espesor (E): 3 (m)

Volumen estimado (A x L x E): 60,750 (m³)

d) MATERIAL DESPLAZADO:

Suelos, arenas, gravas, bloques de rocas, materia orgánica

e) SUPERFICIE DE AFECTACIÓN:

Ancho(a): 160 (m) Largo (l): 120 (m) Área (a x l): 19,200 (m²)

Ocupando cauce de río o quebrada (SI) Permanece: (SI)

Viabilidad de movilizar el material: por medio de maquinaria.

f) FACTORES GENERADORES

Factores Naturales: Escorrentía Superficial y Lluvias.

Factores Antrópicos: Deforestación de la ladera.

Comentarios: El principal factor condicionante es la pendiente de la ladera y la lluvia, especialmente las lluvias muy intensas, son el principal agente desencadenante de este fenómeno.

g) EVALUACIÓN DE DAÑOS

Este flujo de derrubios sepulto la plataforma del pozo ZCQ-2, bajo dos metros de lodos y bloques de roca, dañando el cabezal de válvulas y la tubería de conducción de este pozo.

h) ELEMENTOS EXPUESTOS:

La plataforma del pozo ZCQ-2.

i) PROPUESTAS DE SOLUCION:

Aunque el tamaño de los bloques de roca arrastrados cuando las lluvias son intensas y su duración de varias horas, es de hasta 3 o 4 metros de

diámetro, se recomienda la construcción de un muro de contención y encarrilamiento de flujos de derrubios, el cual proteja la plataforma del pozo ZCQ-2, encarrilando el flujo hacia el curso natural de la quebrada.

j) FOTOGRAFIAS

FOTOGRAFÍA 43 BLOQUES DE ROCAS ARRASTRADOS POR EL FLUJO DE DERRUBIOS



Tomada por: Axel Gutierrez, Año 2011.

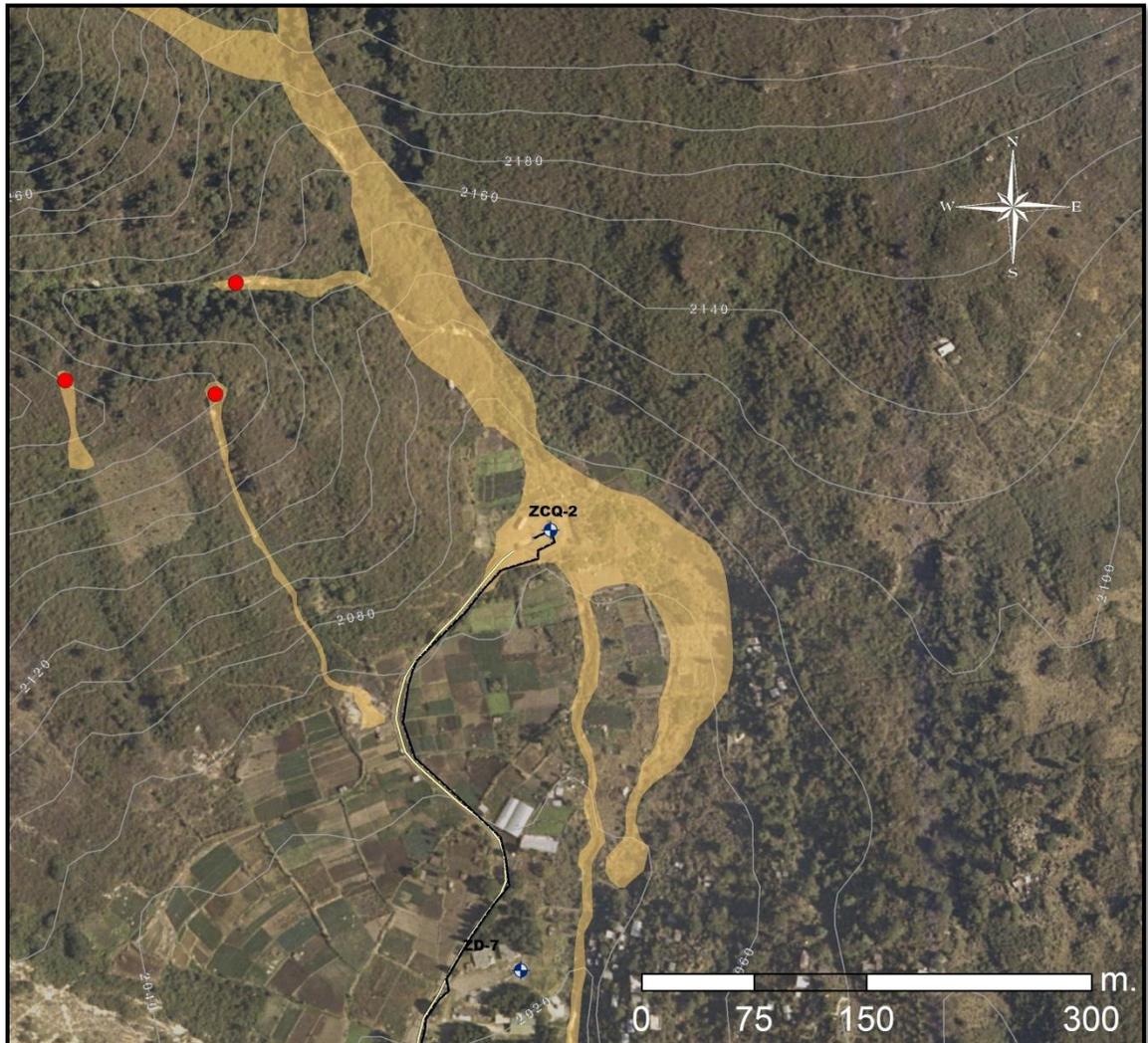
FOTOGRAFÍA 44
PLATAFORMA DEL POZO ZCQ-2 COMPLETAMENTE CUBIERTA
POR LODO Y ROCAS DEBIDO AL FLUJO DE DETRITOS



Octubre 2011

Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2011.

IMAGEN 5
ZONA AFECTADA POR EL FLUJO DE DERRUBIOS AL
NOROESTE DE LA PLATAFORMA DEL POZO ZCQ-2



FUENTE: Investigación de campo, en *ArcGis v. 9.3*.

4 CARACTERIZACION DEL MOVIMIENTO DE LADERA EN LAS CERCANIAS
DE LA PLATAFORMA DE LOS POZOS ZCQ-5, ZD-1 Y ZD-2

a) TIPO DE MOVIMIENTO:

Flujo de derrubios.

b) FECHA DE OCURRENCIA Y UBICACIÓN:

Fecha en que ocurrió el movimiento: octubre de 2011.

Coordenadas de la cabecera (X, Y): 660113, 1634458 UTM WGS84
Z15N.

Departamento: Quetzaltenango. Municipio: Zunil. Aldea: La Calera.

Calle/Número de las viviendas/Otros: Dentro de las instalaciones del
campo geotérmico Zunil I.

c) CONDICIONES TOPOGRÁFICAS Y GEOMETRICAS:

Altura de la corona: 2600 (msnm)

Pendiente promedio del talud originado: 58(°)

Pendiente del talud original 44(°)

Grietas en la parte superior de la corona: (no)

Abertura: x (cm) Longitud: x (cm) Profundidad: x (cm)

Escalones (0)

Medidas de la superficie de ruptura (ver figura No. 8.1):

Ancho (A): 15 (m)

Largo (L): 430 (m)

Espesor (E): 2.5 (m)

Volumen estimado (A x L x E): 16,125 (m³)

d) MATERIAL DESPLAZADO:

Suelos, arenas, gravas, bloques de rocas, materia orgánica

e) SUPERFICIE DE AFECTACIÓN:

Ancho(a): 238 (m) Largo (l): 260 (m) Área (a x l): 61,880 (m²)

Ocupando cauce de río o quebrada (SI) Permanece: (SI)

Viabilidad de movilizar el material: por medio de maquinaria.

f) FACTORES GENERADORES:

Factores Naturales: Escorrentía Superficial y Lluvias.

Factores Antrópicos: Deforestación de la ladera.

Comentarios: El principal factor condicionante es la pendiente de la ladera y la lluvia, especialmente las lluvias muy intensas, son el principal agente desencadenante de este fenómeno.

g) EVALUACIÓN DE DAÑOS:

Este flujo de derrubios sepulto la plataforma del pozo ZCQ-3, bajo 1.5 metros de lodos y bloques de roca, dañando el cabezal de válvulas y la tubería de conducción de este pozo, además cubrió con bloques de roca y lodo parte del camino de acceso a los pozos.

h) ELEMENTOS EXPUESTOS:

La plataforma del pozo ZCQ-3, la tubería de acarreo de fluidos geotérmicos de la plataforma de los pozos ZCQ-5, ZD-1 Y ZD-2 a la planta Orzunil y el camino de acceso a la plataforma de los pozos.

i) PROPUESTAS DE SOLUCION:

Levantar unos 4 metros la tubería de acarreo de los fluidos geotérmicos, proteger con un muro de contención y encarrilamiento de flujo de derrubios la plataforma del pozo ZCQ-3, desviando el flujo hacia el cauce natural de la quebrada.

j) FOTOGRAFIAS E IMÁGENES:

FOTOGRAFÍA 45
FLUJO DE DERRUBIOS QUE CAUSO DAÑOS EN LA
PLATAFORMA DEL POZO ZCQ-3 Y EN EL CAMINO DE ACCESO
A LOS POZOS



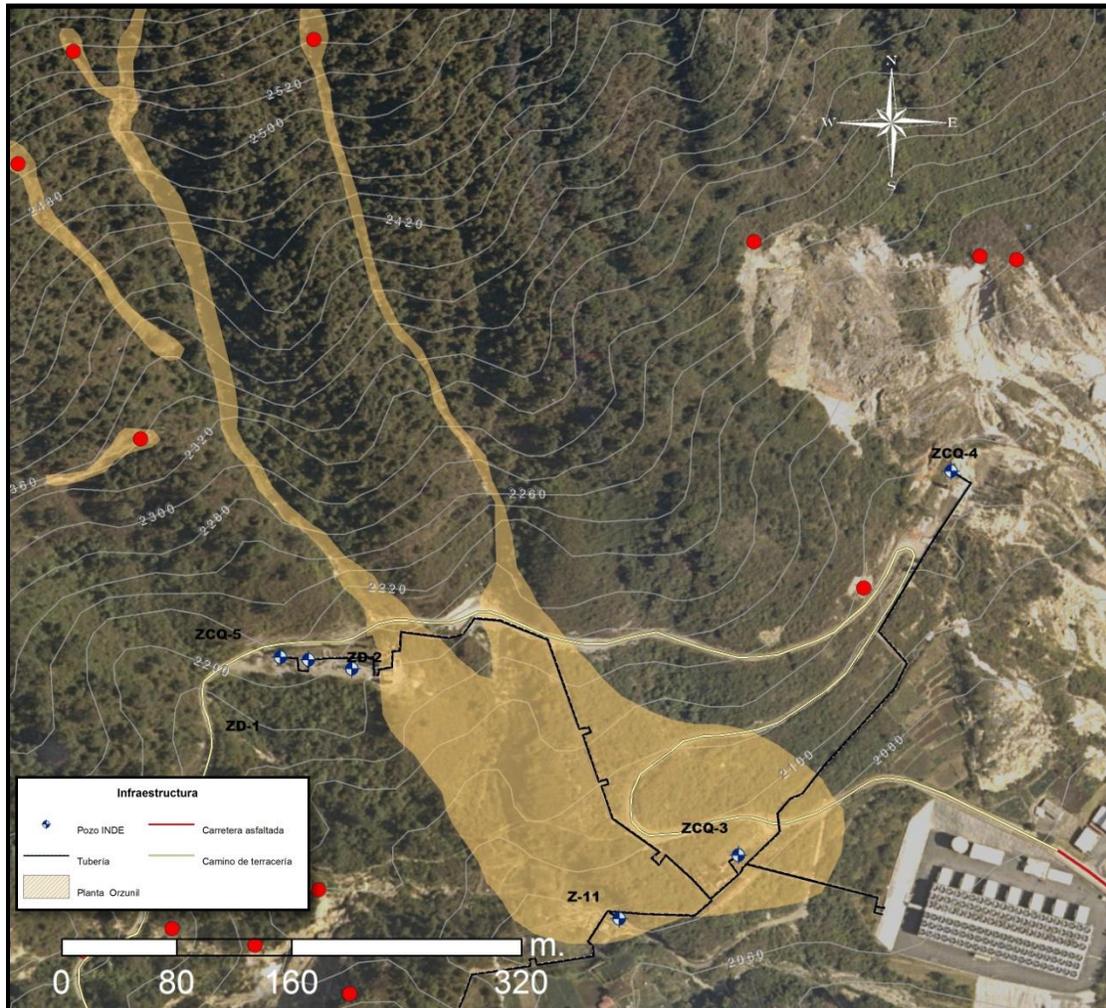
Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2011.

FOTOGRAFÍA 46
DAÑOS EN LA PLATAFORMA DEL POZO ZCQ-3,
COMPLETAMENTE CUBIERTA POR LODO Y ROCAS DEBIDO AL
FLUJO DE DETRITOS



Tomada por: Délmar Villatoro, Año 2011.

IMAGEN 6
ZONA AFECTADA POR EL FLUJO DE DERRUBIOS AL NORTE
DE LA PLATAFORMA DE LOS POZOS ZCQ-5, ZD-1 Y ZD-2



FUENTE: Investigación de campo, en *ArcGis v. 9.3*.



CUNOR

CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE
Universidad de San Carlos de Guatemala



15026

El Director del Centro Universitario del Norte de la Universidad de San Carlos, luego de conocer el dictamen de la Comisión de Trabajos de Graduación de la carrera de:

Geología

Al trabajo titulado:

"Análisis de susceptibilidad a movimientos de ladera en los alrededores del campo Geotérmico Zunil I, Zunil, Quetzaltenango Guatemala"

Presentado por el (la) estudiante:

Délmis Misael Villatoro Martínez

Autoriza el

IMPRIMASE

"Id y enseñad a todos"


Lic. Zoot. M.A. ~~Fredy Giovanni Macz Choc~~
DIRECTOR



Cobán, Alta Verapaz marzo del 2015