



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

**DESARROLLO DE MAPAS DE AMENAZA A DESLIZAMIENTOS UTILIZANDO LA
METODOLOGÍA DE MORA VAHRSON APLICADA A LA ZONA DEL VALLE DE LA CIUDAD
DE GUATEMALA Y ZONAS ALEDAÑAS**

Ing. Renato Gerardo de León Ruiz

Asesorado por el PhD. Edwin Guillermo Santos Mansilla

Guatemala, octubre de 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DESARROLLO DE MAPAS DE AMENAZA A DESLIZAMIENTOS UTILIZANDO LA
METODOLOGÍA DE MORA VAHRSON APLICADA A LA ZONA DEL VALLE DE LA CIUDAD
DE GUATEMALA Y ZONAS ALEDAÑAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. RENATO GERARDO DE LEÓN RUIZ
ASESORADO POR PHD. EDWIN GUILLERMO SANTOS MANSILLA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA GEOTÉCNICA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Ing. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE
DEFENSA DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Alvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Nick Kenner Estrada Orozco
SECRETARIO	Mtro. Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**DESARROLLO DE MAPAS DE AMENAZA A DESLIZAMIENTOS UTILIZANDO LA
METODOLOGÍA DE MORA VAHRSON APLICADA A LA ZONA DEL VALLE DE LA CIUDAD
DE GUATEMALA Y ZONAS ALEDAÑAS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de estudios de postgrado, con fecha 12 de noviembre del 2021.

Ing. Renato Gerardo de León Ruiz

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

LNG.DECANATO.OI.207.2024

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Directora de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **DESARROLLO DE MAPAS DE AMENAZA A DESLIZAMIENTOS UTILIZANDO LA METODOLOGÍA DE MORA VAHRSON APLICADA A LA ZONA DEL VALLE DE LA CIUDAD DE GUATEMALA Y ZONAS ALEDAÑAS**, presentado por: **Ing. Renato Gerardo de León Ruiz**, que pertenece al programa de Maestría en ciencia en Ingeniería Geotécnica después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. José Francisco Gómez Rivera
Decano a.i.



Guatemala, noviembre de 2024

JFGR/gaoc



Guatemala, noviembre de 2024

LNG.EEP.OI.207.2024

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

**“DESARROLLO DE MAPAS DE AMENAZA A DESLIZAMIENTOS
UTILIZANDO LA METODOLOGÍA DE MORA VAHRSON APLICADA A
LA ZONA DEL VALLE DE LA CIUDAD DE GUATEMALA Y ZONAS
ALEDAÑAS”**

presentado por **Ing. Renato Gerardo de León Ruiz** correspondiente al programa de **Maestría en ciencias en Ingeniería Geotécnica**; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Guatemala, 12 de noviembre de 2021

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

Por este medio informo a usted, que se ha revisado y APROBADO la siguiente TESIS DE GRADUACIÓN titulada: "DESARROLLO DE MAPAS DE AMENAZA A DESLIZAMIENTOS UTILIZANDO LA METODOLOGÍA DE MORA VAHRSON APLICADA A LA ZONA DEL VALLE DE LA CIUDAD DE GUATEMALA Y ZONAS ALEDAÑAS" del estudiante Renato Gerardo de León Ruiz, quien se identifica con numero de carné 199811630, del programa de Maestría en Geotécnica.

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

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

Sin otro particular

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

Guatemala, 12 de noviembre de 2021

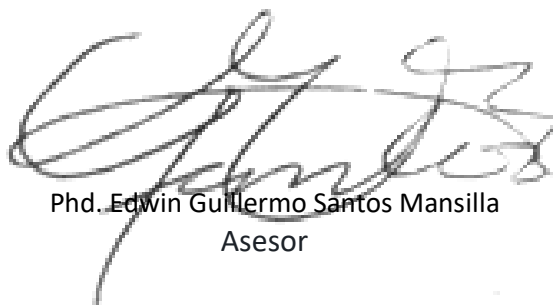
MSc. Ing Edgar Álvarez Cotí
Director, Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

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

Carné:	199811630
Alumno:	Renato Gerardo de León Ruiz
Maestría:	Ingeniería Geotécnica
Título de la Investigación:	"DESARROLLO DE MAPAS DE AMENAZA A DESLIZAMIENTOS UTILIZANDO LA METODOLOGÍA DE MORA VAHRSON APLICADA A LA ZONA DEL VALLE DE LA CIUDAD DE GUATEMALA Y ZONAS ALEDAÑAS"

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

Sin otro particular



Phd. Edwin Guillermo Santos Mansilla
Asesor

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Mis padres

Gerardo de León Rodríguez (q. e. p. d.) y Judith
Josefina de León Ruiz (q. e. p. d.).

Mis hermanas

Linelly Cifuentes Ruiz y Mónica Judith de León
Ruiz.

Mi hermano

Erwin Cifuentes Ruiz.

Mi sobrino

Erwin Renato de León Ruiz.

Mis amigos

Jorge Robles y Carlos López Bucaro.

Ingeniero

Guillermo Santos Mansilla.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mí casa de estudios y darme la oportunidad de cumplir mis sueños.
Facultad de Ingeniería	Por albergarme en sus aulas y ser parte de mi conocimiento.
Asesor	Ph.D Guillermo Santos por brindarme su ayuda y conocimientos para el desarrollo de la investigación.
Mis amigos	Por darme su amistad y ayuda.
Ingenieros	Ph.D Nick Estrada por su ayuda y conocimiento.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. FACTORES INTRÍNSECOS DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS	1
1.1. Parámetros de la pendiente (Sp)	1
1.2. Parámetros del factor litológico (Si)	6
1.3. Parámetro de humedad del terreno (Sh)	19
1.3.1. Análisis de consistencia de registros meteorológicos	20
1.3.2. Determinación de la precipitación media mensual..	20
1.3.3. Evapotranspiración potencial mensual	21
1.3.4. Dinámica y valorización del parámetro de humedad del suelo	22
2. FACTORES EXTERNOS DE DISPARO (SISMOS Y LLUVIAS INTENSAS).	28
2.1. Factor de disparo por actividad sísmica.	29
2.2. Factor de disparo por lluvias o intensidad (Dp = mm/24hrs). ..	32

3.	MAPA DE LA DISTRIBUCIÓN DE ÁREAS CON CATEGORÍA DE AMENAZA A DESLIZAMIENTOS	36
3.1.	Mapa final de amenaza a deslizamiento en la zona del valle de la ciudad de Guatemala 1:50000	41
	CONCLUSIONES.....	42
	RECOMENDACIONES	47
	REFERENCIAS	51
	ANEXOS.....	53

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Proceso para descargar el modelo de elevación a partir del satélite Alos Palsar.	1
Figura 2.	Áreas determinadas de acuerdo al porcentaje de pendiente.....	4
Figura 3.	Áreas determinadas de acuerdo al factor de pendientes Sd	5
Figura 4.	Mapa del estudio de aguas subterráneas del Valle de Guatemala de 1978.	7
Figura 5.	Capa digital de geología del estudio de aguas subterráneas	9
Figura 6.	Capa raster de geología del estudio de aguas subterráneas.....	15
Figura 7.	Categorías de geología de acuerdo al nivel para deslizamientos	18
Figura 8.	Registros medios mensuales de humedad en el suelo, del valle de Guatemala.	24
Figura 9.	Factor de humedad del suelo (Sh) con categorías de deslizamientos	27
Figura 10.	Factor de sismicidad (Ds) con categorías de acuerdo al nivel para deslizamientos.	31
Figura 11.	Factor de disparo por lluvias o intensidad ($D_p = \text{mm}/24\text{hrs}$).	35
Figura 12.	Categorías de amenaza a deslizamientos en el valle de la ciudad de Guatemala.....	39
Figura 13.	Mapa de amenaza a deslizamientos en el valle de la ciudad de Guatemala final.....	41

TABLAS

Tabla 1.	Clasificación de la pendiente de acuerdo a Van Zuidam.....	3
Tabla 2.	Categorización de las principales unidades litológicas.....	17
Tabla 3.	Registros de precipitación mensual para el departamento de Guatemala.....	21
Tabla 4.	Registros de evapotranspiración potencial, departamento de Guatemala.....	22
Tabla 5.	Valores mensuales de humedad del suelo.....	24
Tabla 6.	Valores de retención de humedad en el suelo para cada mes.	25
Tabla 7.	Valoración del parámetro humedad del terreno (Sh).....	26
Tabla 8.	Registros de sismicidad valores PGA en cm/s para el área de estudio, Tr 50 años.....	29
Tabla 9.	Información de valores PGA (m/s^2) para Guatemala.....	30
Tabla 10.	Valoración del parámetro de disparo por sismicidad Ds.....	31
Tabla 11.	Valores de intensidad de lluvia en milímetros por día.	33
Tabla 12.	Registros de intensidad de lluvia mm/día para un Tr 50 años.....	34
Tabla 13.	Valoración del parámetro de disparo por lluvias Dp.	34
Tabla 14.	Áreas con amenaza a deslizamientos para el valle de Guatemala.....	39
Tabla 15.	Porcentaje con respecto a la superficie total de los municipios....	40

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H	Grado de susceptibilidad al deslizamiento
HII	Susceptibilidad al deslizamiento por lluvias
Hs	Susceptibilidad al deslizamiento por sismicidad
Kcd	Unidad de calizas y dolomitas del cretácico
Qal	Unidad de depósitos aluviales del cuaternario
Ql	Unidad de lavas cuaternarias
Tl	Unidad de lavas del terciario
Ks	Unidad de rocas cretácicas de bajo metamorfismo
Ki	Unidad de rocas intrusivas del cretácico
Tp	Unidad de tobas soldadas del terciario
Qpf, Qp, Qpl	Unidades de depósitos piroclásticos cuaternarios
D	Valor del factor de disparo
Dp	Valor del parámetro de disparo por lluvia
Ds	Valor del parámetro de disparo por sismicidad
Sh	Valor del parámetro de humedad del terreno
Sp	Valor del parámetro de la pendiente
Sl	Valor del parámetro de susceptibilidad litológica
EP	Valor producto de la combinación de los elementos pasivos

GLOSARIO

Ángulo de fricción interna	Ángulo entre el eje de esfuerzos normales y la tangente a la envolvente de Mohr en un punto que representa una condición dada de esfuerzo de ruptura de un material sólido. El ángulo de fricción interna de un suelo corresponde al ángulo cuya tangente es el coeficiente promedio de fricción entre las partículas de un suelo.
Antrópico	Producido o alterado por acción humana.
Asentamiento	Hundimiento gradual de una estructura.
Cohesión	Resistencia al corte del terreno cuando la presión normal efectiva es nula.
Capacidad admisible de soporte	Valor máximo del esfuerzo de contacto aplicable al diseño y construcción de una cimentación. La capacidad admisible de soporte es sólo una fracción de la capacidad última de soporte, y se calcula aplicando a esta última un factor de seguridad apropiado. Los valores de factor de seguridad más corrientes se encuentran en el intervalo de 3 a 5.

Deslizamiento	Desplazamiento de material de una ladera o talud, provocado por diferentes factores.
Falla	En geología, es la ruptura del terreno provocada por diferentes tipos de esfuerzos que actúan en la corteza terrestre.
Inclusión	La inclusión busca lograr que todos los individuos, sobre todo aquellos que se encuentran en condiciones de segregación o marginación, puedan integrarse y funcionar como uno solo.
Licuefacción	Anulación de la capacidad para resistir esfuerzos de corte en un suelo granular fino, saturado y con densidad relativa baja, como consecuencia del aumento de presión intersticial originado por vibraciones.
Permeabilidad	Capacidad de una roca o de un suelo de permitir el paso de un fluido a través suyo. Medida de la relativa facilidad en que un fluido pasa a través de un material bajo una diferencia de presión dada. La permeabilidad es una característica del material, independientemente de las propiedades físicas del fluido que pasa a través suyo, y es diferente del coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica.

Porosidad	Relación entre el volumen ocupado por los poros y el volumen total de la muestra (partículas sólidas + poros).
Presión intersticial	Presión (en exceso sobre la presión atmosférica) del agua en los vacíos de un suelo o roca saturados.
Sondeo	Perforación profunda de pequeño diámetro, con extracción de testigo.
Suelo cohesivo	Cuando la proporción en el peso del contenido de finos que tenga plasticidad es igual o superior al 35 %.
Suelo granular	Cuando la proporción en peso del contenido de arenas y gravas es mayor del 65 %.

RESUMEN

Este trabajo tiene como propósito realizar una serie de mapas para localizar y cuantificar las áreas vulnerables a deslizamientos en la zona del valle de la ciudad de Guatemala, que sirva como herramienta de planificación, así como, determinar los factores de susceptibilidad y disparo que contribuyen a la generación de los deslizamientos basados en la metodología Mora-Vahrson (Vahrson y Mora, 1992).

En el primer capítulo se presentan los factores de susceptibilidad, en donde se considera el factor de pendiente elaborado a partir de un modelo de elevación digital con un tamaño de celda de 12.5 x 12.5 m obtenido del satélite ALOS PALSAR, el factor litológico elaborado a partir del mapa de geología a escala 1:50000 del estudio de aguas subterráneas del valle de Guatemala y el factor de humedad del suelo que se generó considerando la precipitación media, la evapotranspiración y la textura del suelo tomando como referencia el estudio de suelos del Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (MAGA) escala 1/50,000 (MAGA, 2013)

En el segundo capítulo se describen los factores externos o de disparo que considera la sismicidad y las lluvias intensas (elementos activos). En el parámetro de intensidad de lluvias se consideran las intensidades de lluvias potencialmente generadoras de deslizamientos, se utiliza la lluvia máxima en 24 horas con un período de retorno de 50 años, aplicando la distribución de valores extremos Gumbel tipo I a series temporales con más de 10 años de registro (Vahrson y Mora, 1992).

El tercer capítulo presenta la interacción entre los factores de susceptibilidad y de disparo para delimitar las áreas con amenaza a deslizamientos en el valle de la ciudad de Guatemala, generando el mapa final con la clasificación de áreas con categorías de baja a muy alta amenaza.

OBJETIVOS

General

Desarrollar mapas de amenaza a deslizamientos, utilizando la metodología de mora Vahrson, aplicada a la zona del valle de la ciudad de Guatemala.

Específicos

1. Realizar revisión de fuentes primarias y secundarias, así como la recopilación de la información biofísica y climática necesaria para la estimación de los parámetros de susceptibilidad y los factores externos de disparo de la metodología Mora-Vahrson.
2. Analizar y categorizar el factor de pendiente del terreno utilizando un modelo de elevación digital.
3. Generar el mapa del factor litológico categorizando la información a partir de la geología del área.
4. Elaborar el mapa de humedad del suelo considerando las categorías de clasificación que considera la metodología Mora-Vahrson.
5. Generar los factores de disparo de sismología e intensidad de lluvias.

6. Combinar los factores de susceptibilidad y disparo para obtener el mapa de deslizamientos final.

.

INTRODUCCIÓN

Los fenómenos climáticos como huracanes, tormentas y depresiones tropicales, que ocurren en Guatemala, están asociados a cambios climáticos globales presentes en la región Centroamericana, así como los sismos y condiciones geodinámicas como consecuencia de los movimientos de las placas tectónicas Cocos y Caribe.

El presente trabajo de investigación se realizó para evaluar la amenaza a deslizamiento en la zona del valle de la ciudad de Guatemala, estableciendo los sectores con potencial a presentar deslizamientos en caso de lluvias de intensidad alta, sismos de magnitud importante o una combinación de ambos.

El proyecto de Cartografía Metropolitana, desarrollado en el año 2015 elaboró un mapa sobre la mancha urbana para el Valle de la Ciudad de Guatemala, que ocupa 399.9 km², dentro de ella se localizaron las quebradas que conforman los drenajes (barrancos) de cabecera, de cuencas que poseen vegetación con árboles y arbustos altos ocupando un 19 % de la mancha urbana, los pastos y matorrales ocupan un 30.76 % y la zona urbanizada posee el 50.24 %, bajo este contexto la amenaza por los desastres naturales en la urbe, suele resultar alta por ocupar zonas no aptas para urbanizaciones (SEGEPLAN, 2015).

La metodología Mora Vahrson utilizada para clasificar la amenaza por deslizamientos, en áreas tropicales con alta sismicidad, fue elaborada en Costa Rica por Sergio Mora y Wilhelm-Gunter Vahrson en el año 1991 y es ampliamente utilizada en ese país, así como también en México, Nicaragua y Haití. Guatemala ha aplicado la metodología a través de CONRED, pero es información que se

localiza a una escala muy general, en el contexto de la planificación, sin embargo, para el ordenamiento territorial en el valle de la ciudad de Guatemala, es necesario reducir la escala espacial de análisis de información por lo que se consideró homogeneizar la escala de cada uno de los factores de la investigación a partir del factor pendientes a una escala 1:50000.

Esta metodología permite obtener una zonificación de la susceptibilidad del terreno a deslizarse, mediante la combinación de la valoración y peso relativo de diversos indicadores morfo dinámicos, la cual se puede implementar en un sistema de información geográfica (SIG). La Mora Vahrson toma en consideración cinco factores para el análisis espacial de los deslizamientos, tres factores intrínsecos o de susceptibilidad y dos factores externos o de disparo, para obtener el mapa de amenaza a deslizamientos.

Los mapas generados con esta metodología se utilizarán como instrumentos en la toma de decisiones para los procesos de planificación del valle de la ciudad de Guatemala, para mitigar el crecimiento horizontal sin aumentos en la densidad, fenómeno que ha generado una dispersión y crecimiento de las áreas periurbanas.

El resultado de su aplicación será una mejor comprensión de los fenómenos naturales en el área de estudio del Valle de la Ciudad de Guatemala, lo cual incide en el ordenamiento territorial con implicaciones importantes en materia de amenazas naturales y valorización de los servicios ecosistémicos.

El presente estudio brindará un instrumento para mejorar la seguridad humana y la sostenibilidad del desarrollo como parte del OT. La investigación tomó en cuenta los parámetros de susceptibilidad y factores de disparo.

El capítulo 1 presenta los factores de susceptibilidad que corresponden al factor de la pendiente del terreno, humedad del suelo y la geología del área. La clasificación del parámetro de pendiente en donde se utilizará un modelo de elevación digital –DEM- con un tamaño de celdas de 12.5 x 12.5 metros del satélite ALOS PALSAR para generar las pendientes en grados, las cuales se clasificarán acorde a la metodología del estudio.

El parámetro litológico se analizará a partir del mapa de geología del Valle de la Ciudad Capital del estudio Hidrogeológico del año 1978 elaborado por el INSIVUMEH, clasificando las unidades geológicas acorde a la metodología del estudio generando una nueva ponderación para la combinación de las variables. El parámetro de humedad toma en cuenta las condiciones hidrometeorológicas y características del suelo considerando la evapotranspiración, la precipitación, el balance hídrico y los parámetros físicos del suelo.

En el capítulo 2 se consideran los factores de disparo como la sismicidad y la intensidad de lluvias en un periodo descrito en la metodología. El factor de disparo de sismicidad se analizará a partir de información obtenida en base a los Mapas de Amenazas Sísmicas para la Ciudad de Guatemala, la información del United States Geological Survey (USGS) y Evaluación Regional de la Amenaza Sísmica en Centro América (UPM, 2008).

El factor de intensidad de lluvias se analizará tomando en cuenta los eventos meteorológicos significativos, los cuales han generado pérdidas humanas y materiales, para la zonificación de áreas que presentan amenaza a deslizamientos.

El capítulo 3 establece la combinación de los factores de susceptibilidad y de disparo para generar la zonificación de áreas con amenaza a deslizamientos

categorizando en muy baja, baja, media, alta y muy alta. La aplicación de los resultados del estudio de amenazas a deslizamientos en la gestión territorial busca incidir en la regularización y promoción del uso y ocupación del territorio con tres objetivos fundamentales: localización segura, construcción segura y actividades seguras.

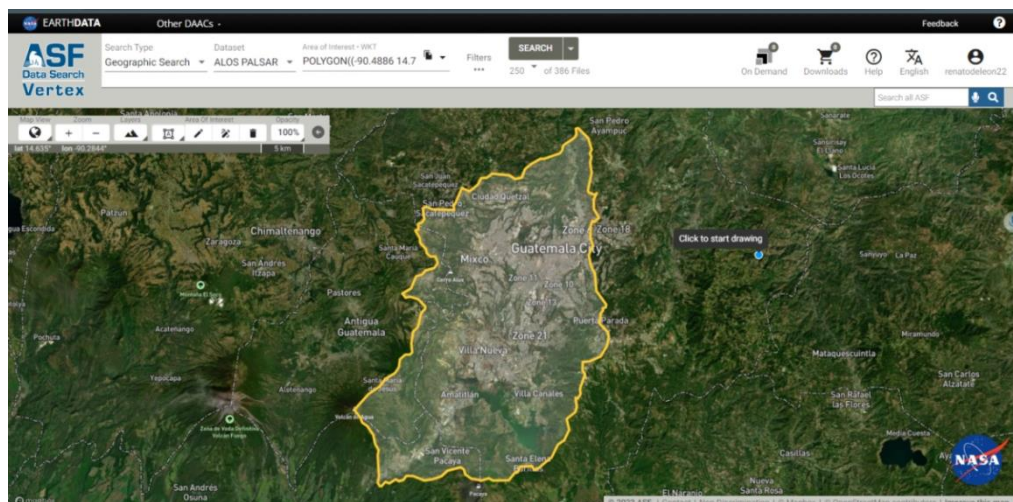
1. FACTORES INTRÍNSECOS DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS

1.1. Parámetros de la pendiente (Sp)

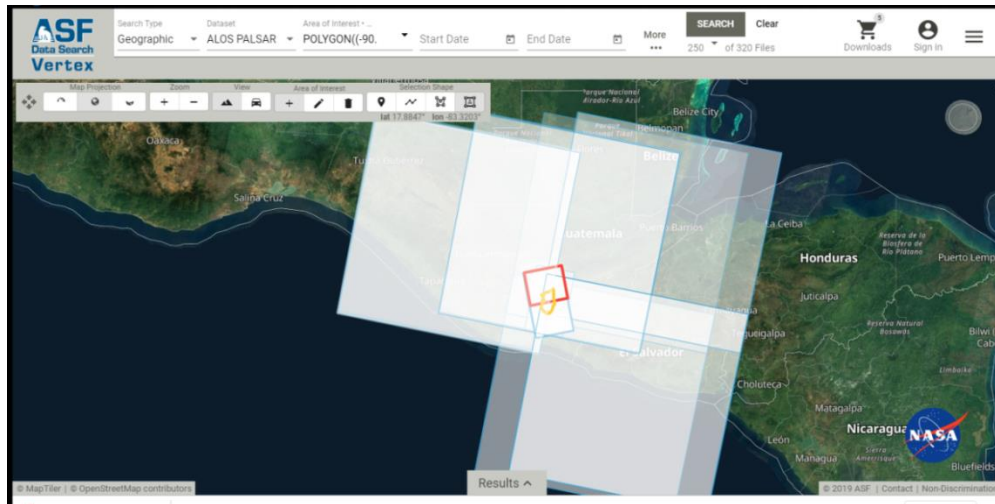
Para la elaboración del parámetro de la pendiente se utilizó un modelo de elevación en coordenadas GTM el cual llamaremos DEM de aquí en adelante, obtenido del Alaska Satellite Facility –ASF- con un tamaño de píxel de 12.5 X 12.5 m. El link de descarga se adjunta a continuación y posteriormente se hará mención como una cita bibliográfica. En la Figura 1 se puede observar el área de la investigación en el geoportal de –ASF- <https://search.asf.alaska.edu/#/?flightDirs=>.

Figura 1.

Proceso para descargar el modelo de elevación a partir del satélite Alos Palsar



Continuación de la Figura 1.



Nota. Límite del área de investigación delimitada en el geoportal de –ASF- y descarga de modelos de elevación de 12.5 X12.5 m. Elaboración propia, realizado con ASF.

Obtenido el DEM se realizó una corrección o llenado de información mediante análisis espacial el cual estableció que la elevación menor del área de la investigación es de 1117 msnm y la elevación mayor es de 2555 msnm (Van, 1986).

Fue necesario realizar un proceso de relleno de información para corregir los valores numéricos o pequeños vacíos en el DEM obtenido. A partir de esta corrección se realizaron los análisis espaciales para la elaboración de cada una de las variables que considera la metodología de Mora Varhson.

Las pendientes se distribuyeron de acuerdo a la clasificación de Van Zuidam, que considera 7 clases, considerando las características del terreno, el porcentaje y los grados de pendiente al cual se reasignó un nuevo valor que va

de la ponderación 0 al número 7. A continuación, en la Tabla 1 y Figura 2 describe y presentan los rangos y valores (Van, 1986).

Tabla 1.

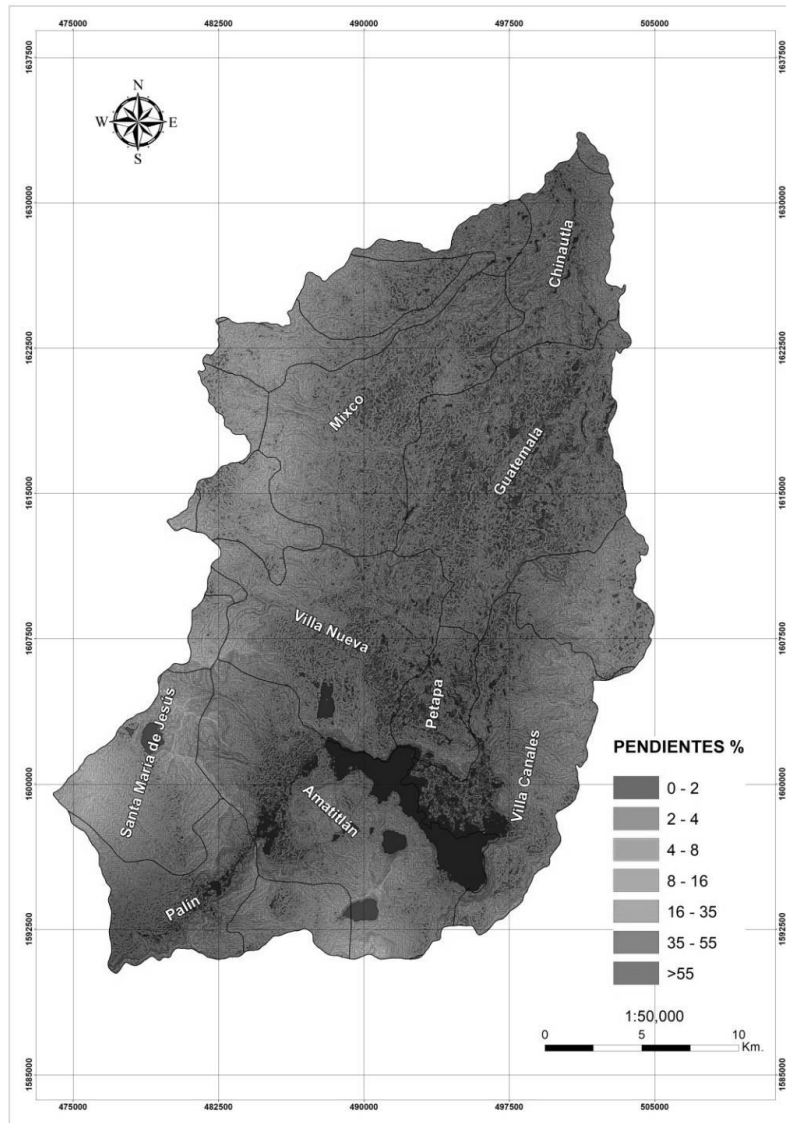
Clasificación de la pendiente de acuerdo a Van Zuidam

Color sugerido	Grados	Porcentaje	Condiciones del terreno	Valor del parámetro Sp
Verde oscuro	0-2	0-2	Planicie, sin denudación apreciable	0
Verde claro	2-4	2-7	Pendiente muy baja, peligro de erosión	1
Amarillo	4-8	7-15	Pendiente baja, peligro severo de erosión	2
Naranja	8-16	15-30	Pendiente moderada, deslizamientos ocasionales, peligro severo de erosión.	3
Rojo Claro	16-35	30-70	Pendiente fuerte, procesos denudacionales intensos (deslizamientos), peligro extremo de erosión de suelos	4
Rojo oscuro	35-55	70-140	Pendiente muy fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, reforestación posible	5
Morado	>55	>140	Extremadamente fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales severos (caída de rocas), cobertura vegetal limitada	6

Nota. Clasificación de la pendiente de acuerdo a Van Zuidam. Obtenido de R. Van (1986). *Aerial Photointerpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping* [Fotointerpretación aérea en análisis del terreno y cartografía geomorfológica] (p. 42). Smits Publishers.

Figura 2.

Áreas determinadas de acuerdo al porcentaje de pendiente



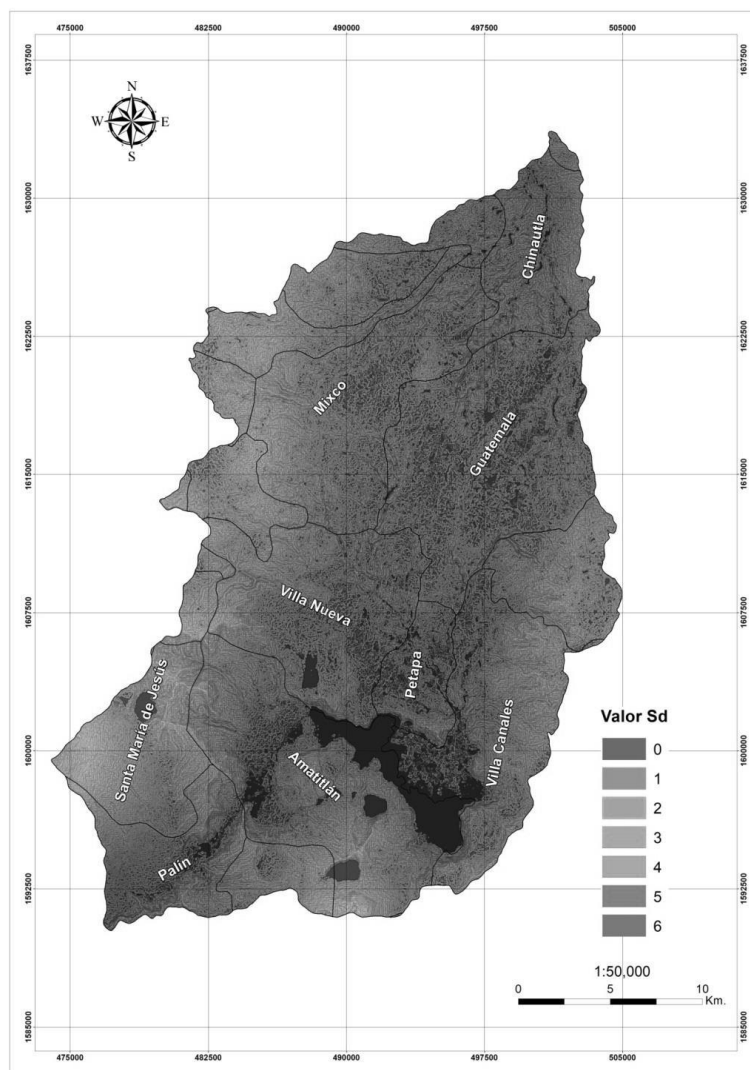
Nota. Delimitación de áreas de acuerdo al porcentaje de pendientes Elaboración propia, realizado con Qgis.

De acuerdo a la Tabla 2, se realizó el cálculo de las pendientes en grados y en porcentajes procediendo a ponderar de acuerdo al factor que determina la

metodología Mora Varhson para el factor de pendiente Sd obteniendo un nuevo archivo raster con valores categorizados que a continuación se presentan en la Figura 3.

Figura 3.

Áreas determinadas de acuerdo al factor de pendientes Sd



Nota. Áreas que delimitan el factor de pendientes Sd. Elaboración propia, realizado con Qgis.

1.2. Parámetros del factor litológico (Si)

El parámetro del factor litológico se refiere a la composición de las unidades geomorfológicas y a los depósitos superficiales. Es un factor determinante para la identificación de la amenaza por movimientos en masa, por lo que fue necesario describir lo más específico posible (Vahrson y Mora, 1992).

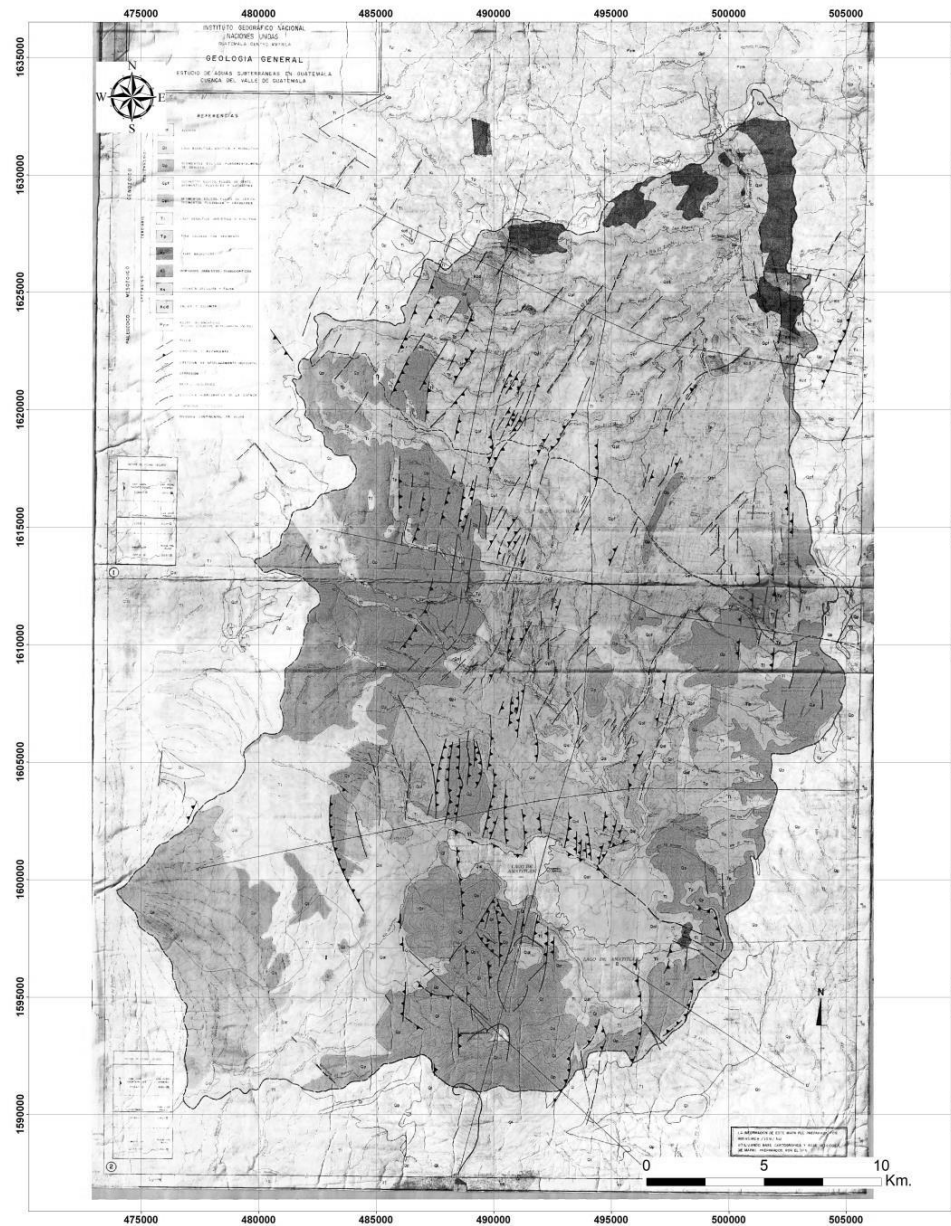
El análisis del factor litológico se realizó utilizando las unidades geológicas del estudio de aguas subterráneas del Valle de la Ciudad de Guatemala del año 1978 considerando que la escala de detalle del mismo fué elaborado a 1:50000 (INSIVUMEH y IGN, 1978).

En el centro de la república de Guatemala, como resultado de la interacción de triple unión de las placas tectónicas norteamericana, Cocos y Caribe, se han formado algunas depresiones que son el resultado de esfuerzos tensionales, formando valles (valles tectónicos) en el Centro y Altiplano Occidental del país como en el departamento de Guatemala, es así que entre ellos está lo que se conoce actualmente como Valle de Guatemala. El valle de Guatemala se formó en el Mioceno, tiene una orientación casi Norte-Sur, y sus límites Este y Oeste corresponden a los bordes tectónicos del valle (INSIVUMEH, 1978).

De la información generada en el estudio de aguas subterráneas del valle de la ciudad capital se digitalizó el mapa geológico a escala 1:50000, la elaboración de digitalización del mapa geológico se llevó a cabo mediante una copia realizada por un escáner que permitiera visualizar todos los detalles, figuras, nombres, nomenclaturas y colores como se puede observar en la Figura 4.

Figura 4.

Mapa del estudio de aguas subterráneas del Valle de Guatemala de 1978



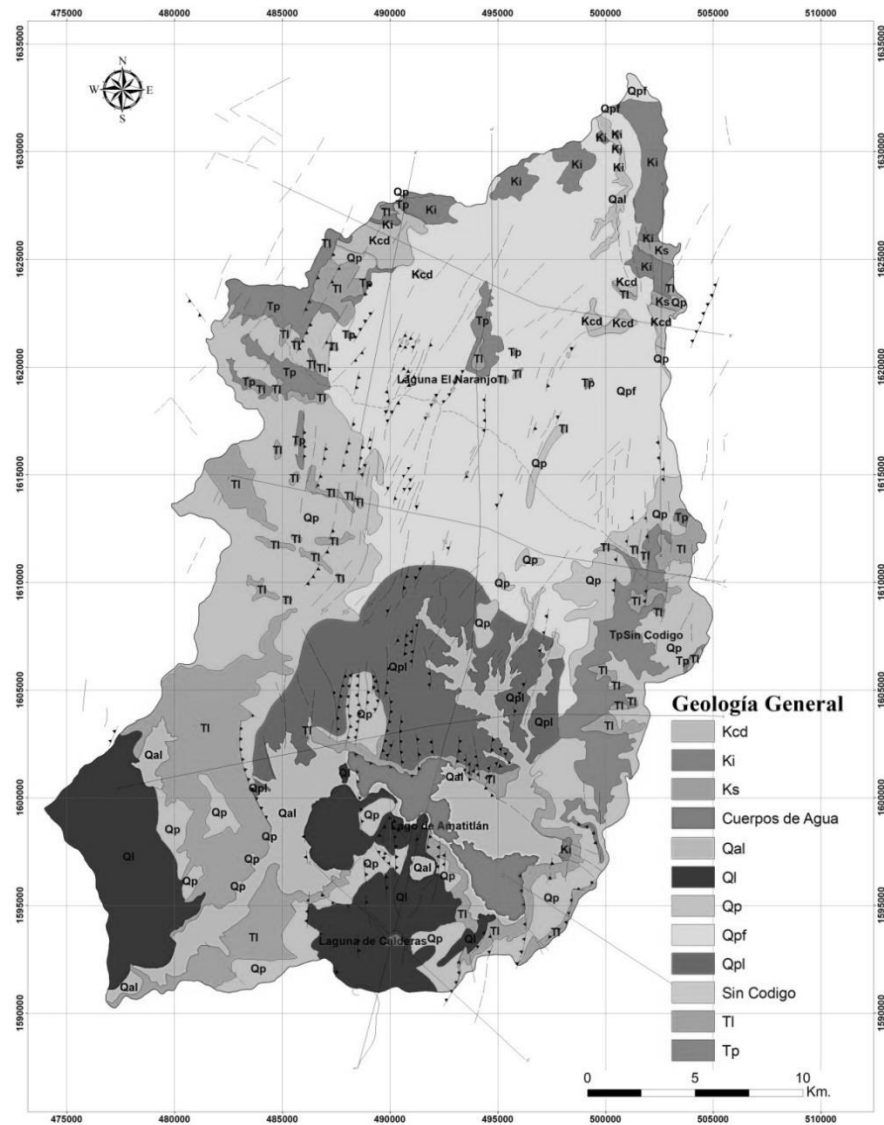
Nota. Digitalización del mapa del estudio de aguas subterráneas del Valle de Guatemala 1978.
Elaboración propia, realizado con Qgis.

Posteriormente se realizó la geo referenciación de la imagen tomando en cuenta el sistema de coordenadas indicado en el mapa original (NAD27/ Zona 15 norte) el cual fue convertido a coordenadas GTM.

Para el proceso de geo referenciación y digitalización del mapa se utilizó el programa QGIS 3.16.5 en cual se generó un archivo tipo vector con geometría de polígonos para poder crear las áreas de cada categoría geológica y a su vez se crearon archivos con geometría de líneas para digitalizar las fallas y la nomenclatura de cada falla descrita en el mapa, ver Figura 5.

Figura 5.

Capa digital de Geología del estudio de aguas subterráneas



Nota. Digitalización del mapa de geología del estudio de aguas subterráneas del Valle de Guatemala de 1978. Elaboración propia, realizado con Qgis.

La estratigrafía del Valle de Guatemala, se divide en grupos de acuerdo a las características y edades. Como resultado de la investigación, se describen las mismas, de acuerdo al documento consultado (INSIVUMEH, 1978).

- Unidad de calizas y dolomitas del cretácico (Kcd): afloran principalmente en los altos estructurales al Noreste y Noroeste del Valle de Guatemala, así como en algunos cerros bajos dentro del departamento de Guatemala. En el norte afloran secuencias de rocas calizas y dolomitas de diversa granulometría con presencia de fósiles, con estratificación variada, las cuáles están intercaladas con unidades de rocas detríticas preferentemente de la misma composición mineralógica. Estas rocas presentan un fracturamiento y tienen presencia de vetas de calcita que las cortan. Se estima que el espesor de estas rocas puede llegar a tener más de 200 metros de espesor.
- Unidad de rocas intrusivas del cretácico (Ki): afloran preferentemente en sectores del norte y al noreste del área de estudio y en menor cantidad al sureste. Esta unidad corresponde a granitos de granulometría muy gruesa y granodioritas de biotita. Estas unidades están muy fracturadas y meteorizadas. Localmente se han encontrado vetas de cuarzo atravesando estas rocas plutónicas. En el borde oriental del Lago de Amatitlán, hay un pequeño afloramiento de granito de biotita de granulometría gruesa y textura equigranular. El granito está muy fisurado y meteorizado y se estima que puede corresponder al afloramiento del norte del Valle de Guatemala.
- Unidad de rocas cretácicas de bajo metamorfismo (Ks): corresponden a rocas sedimentarias clásticas y filitas que afloran en pequeñas extensiones del norte del Valle de Guatemala en las proximidades del Río

Las Vacas, las cuáles han sufrido un bajo grado de metamorfismo y que están fuertemente fracturadas.

- Unidad de tobas soldadas del terciario (Tp): esta unidad aflora principalmente al noroccidente y suroriente del Valle de Guatemala, así como en elevaciones dentro del departamento de Guatemala y Sacatepéquez. Esta unidad está compuesta principalmente de tobas (algunas soldadas) y algunos sedimentos intercalados.

Las tobas son de composición diversa, presentando ocasionalmente texturas ignimbríticas, mostrando estructuras de flujo y en algunos afloramientos, algunas veces son cítricas, tienen coloraciones preferentemente claras (variando de blanco a verde, rosado-café, grisáceo-blancuzco) y no se le han observado estratificación o clasificación definida.

- Unidad de lavas del terciario (TI): esta unidad se compone de flujos de lavas, producto del vulcanismo del Terciario en la zona, que varían de composición, desde riolíticas (depósitos antiguos), hasta básicas (depósitos más recientes). Los flujos de lavas riolíticas son de color rosado, afloran al este del Valle de Guatemala, entre el departamento de Guatemala y Sacatepéquez, muestran estructuras de flujo, textura esferulítica y estarían relacionados con efusiones de fallas y fisuras con las estructuras tectónicas que originaron el Valle. Por su lado, los flujos de lavas básicas forman una serie de flujos andesíticos – basálticos de color gris oscuro. Se considera que estos flujos de lava cubrieron parte de la topografía pre - existente, siguiendo las depresiones del terreno, formando localmente una cubierta irregular sobre rocas más antiguas y en los afloramientos actuales se observa que poseen una fisura paralela.

Estos depósitos constituyen los materiales sobre los cuáles se formaron los volcanes de Pacaya y Agua al Sur del departamento de Guatemala. Intercalados entre los flujos de lava, se localizan lentes y estratos de vidrio volcánico, lahares y sedimentos tobáceos derivados de los materiales más antiguos del lugar.

Dentro del Valle, las elevaciones del Cerro El Naranjo, Cerrito del Carmen y la elevación sobre la cual se construyó el Teatro Nacional de Guatemala, son parte de los afloramientos que sobresalen en el valle de los flujos de lava terciarios.

- Unidades de depósitos piroclásticos cuaternarios (Qpf, Qp, Qpl): en sus niveles superiores, el Valle de Guatemala, departamento de Guatemala y Sacatepéquez presentan una gruesa capa de depósitos generados en el Cuaternario como producto principalmente de actividad volcánica de diversos centros efusivos ubicados en el área central de Guatemala y que cubren extensamente las rocas más antiguas. El perfil estratigráfico de estos depósitos muestra una alternancia de deposición muy diversa en todo el valle, de acuerdo a la dinámica durante los períodos eruptivos que originaron estos materiales y debido a sus características de formación, estos depósitos son clasificados en dos tipos: depósitos de caída y depósitos de flujos.

Los grupos (Qpf, Qp, Qpl) la diferencia, únicamente está basada en la predominancia de los tipos de depósitos piroclásticos que se localizan en superficie y que corresponderían principalmente a sus características de formación y composición granulométrica. De manera complementaria, en la parte superior de algunos de estos depósitos (principalmente en los depósitos de flujo),

es posible localizar algunas unidades de depósitos lacustres y fluviales que evidencian el retrabajo que tuvieron estos sedimentos luego de su deposición.

- Depósitos de caída: comprenden capas de materiales volcánicos clásticos que luego de su efusión explosiva, han sido transportados por el viento y que pueden ser depositados a grandes distancias dependiendo de varios factores.

Estos depósitos están constituidos por fragmentos de granulometrías que se extiende desde cenizas finas hasta bloques que pueden superar varios centímetros de longitud, su composición es preferentemente pumítica con presencia de fragmentos líticos de diversa composición de lavas y excepcionalmente de rocas intrusivas. Forman mantos continuos de espesor muy constante que no varía con la elevación topográfica y en el área de estudio sus espesores no exceden los 10 metros. Las características de estos depósitos (tamaño del grano y su distribución real, principalmente), son el resultado de la distancia del punto de efusión, la duración de la erupción, de la cantidad y tamaño granulométrico expulsado en la erupción y de la dirección e intensidad del viento.

Para el Valle de Guatemala, los depósitos de caída disminuyen gradualmente hacia el norte y el este, los depósitos se vuelven más finos granulométricamente en esas mismas direcciones. En la parte superior de casi todos los depósitos de caída, existen unidades de paleosuelos, los cuales constituyen evidencia de períodos prolongados sin actividad eruptiva. Los espesores de estas unidades alcanzan un máximo de 2.00 metros.

- Depósitos de flujo: corresponden a depósitos de materiales volcánicos no clasificados, no estratificados, de espesor variable, compuesto de bloques,

bombas y lapillis de pómez en una matriz fina de ceniza y fragmentos líticos.

Su distribución está controlada por el relieve topográfico al momento de la efusión, provocando que, en valles y depresiones, estos materiales puedan acumular grandes espesores de hasta 100 metros en una sola unidad, mientras que, en terrenos elevados, su espesor puede ser muy bajo o inexistente.

A pesar que la composición litológica es similar a la existente en los depósitos de caída, la composición homogénea de pómez (que tiende a ser más porosa que en los otros depósitos) y de fragmentos líticos es muy superior a los otros tipos de depósitos. En este caso, los fragmentos líticos son más angulares y en ocasiones pueden localizarse fragmentos de madera carbonizada. La parte superior de estos depósitos se observa que ha sido re TRABAJADA por acción fluvial o lacustre (este último principalmente hacia las márgenes del Lago de Amatitlán y Chinautla).

En el caso de los depósitos fluviales, estos consisten en gravas, arenas estratificadas y clasificadas como pedazos redondeados de pómez, andesita y basalto, formando lentes elongados de espesores que alcanzan hasta 25 metros. Los depósitos de actividad lacustre, estos comprenden secuencias de láminas y estratos planares muy finos de arcilla, limo calcáreo y diatomitas de gran extensión, con espesores que llegan a los 20 metros.

- Unidad de lavas cuaternarias (QI): durante el cuaternario, al mismo tiempo que se van acumulando los depósitos piroclásticos, se producen efusiones de lava de los volcanes Pacaya, Fuego y Agua en el Sur del Departamento de Guatemala y Sacatepéquez, que fueron depositados en las inmediaciones de estos conos volcánicos de manera intercalada con los

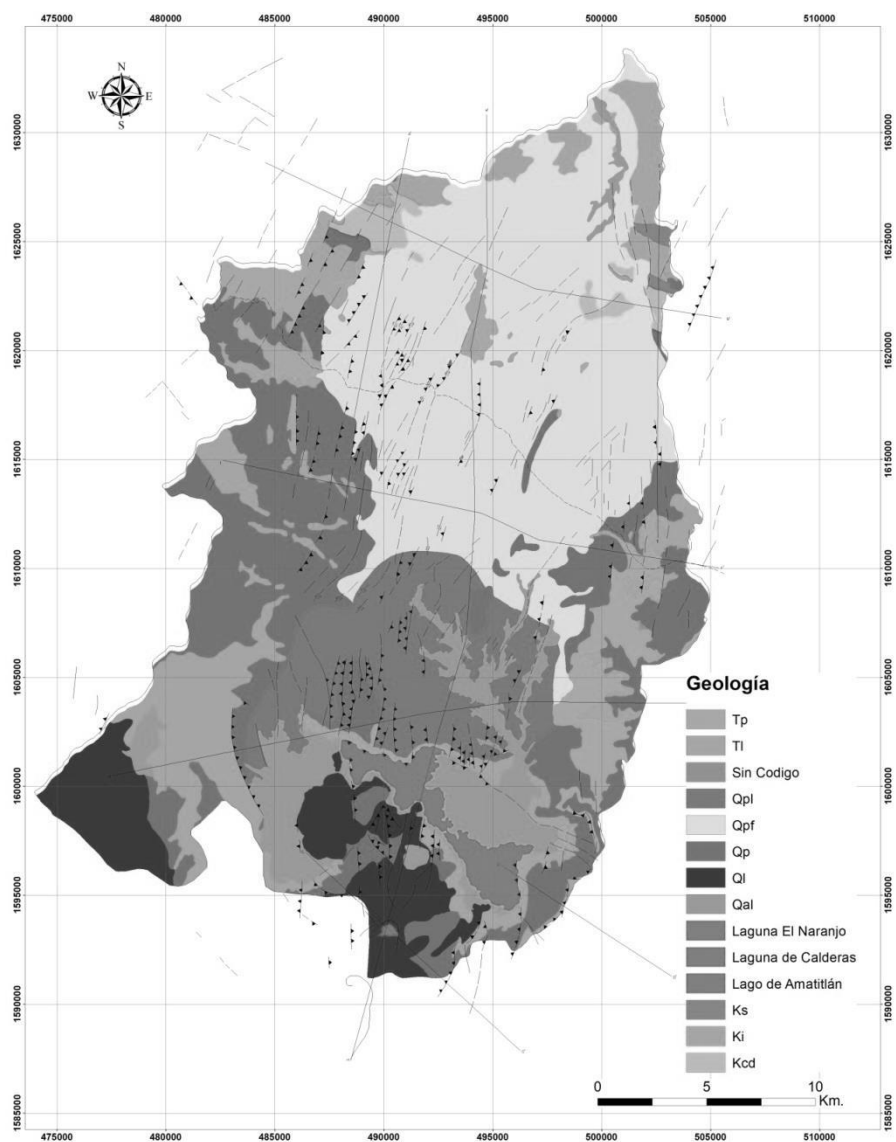
depósitos de origen piroclástico. Estas enormes acumulaciones de lavas incluyen basaltos, andesitas y escorias de los conos volcánicos, sus conos parásitos y cenizas intercaladas entre los flujos de lava.

- Unidad de depósitos aluviales del cuaternario (Qal): estas unidades corresponden a todos los depósitos recientes no consolidados, incluyendo depósitos fluviales, deltáicos, lacustres y depósitos recientes de movimientos de laderas. En los valles mayores al sur del Valle de Guatemala, se localizan las mayores concentraciones de aluviones dentro del área de trabajo, existiendo estratos bien clasificados de arenas, gravas y limos, los cuáles son derivados de las rocas piroclásticas y de las lavas que afloran en el área y que pueden llegar a alcanzar espesores de al menos 80 metros. Las mayores acumulaciones de sedimentos aluviales se localizan en el delta del Río Villalobos, comprendiendo arenas limosas y limos arenosos con intercalaciones en forma de bandas de arenas clasificadas que representan antiguos lechos del río.

Como resultado de la conversión de archivo vectorial a archivo tipo raster, se reclasificaron áreas para la ponderación. Como se puede observar en la Figura 6.

Figura 6.

Capa raster de geología del estudio de aguas subterráneas



Nota. Mapa rasterizado del estudio de aguas subterráneas del Valle de Guatemala de 1978. Elaboración propia, realizado con Qgis.

La ponderación se realizó de acuerdo a la Tabla 2 asignando un valor numérico respecto al material geológico el resultado se puede observar en la Figura 7.

Tabla 2.

Categorización de las principales unidades litológicas

Código	Descripción geológica	Nivel para deslizamientos
Ki	Rocas intrusivas con diques	1
Ks	Rocas sedimentarias algo metamorizadas y fuertemente fracturadas.	
Kcd	Calizas y dolomitas, estando compuestas de rocas fosilíferas finas y densas de color gris oscuro con una estratificación muy gruesa y muy irregular. Las rocas están intensamente fracturadas y cortadas por vetas de calcita. En los niveles superiores, las calizas se presentan en estratos finos, intercaladas con estratos de calizas detríticas, intensamente plegadas y fracturadas con vetas de calcita.	2
Tl	Flujos de lavas riolíticas y flujos de lavas andesíticas-basálticas	3
Tp	Tobas soldadas de composición riolítica, riodacítica o dacítica con dispersos fragmentos líticos. Intercalaciones locales de depósitos fluviales.	
Ql	Rocas volcánicas de composición basáltica, andesítica, intercaladas con capas de escorias.	
Qpl	Depósitos piroclásticos principalmente producto de caída de cenizas, los cuales presentan intercalaciones fluviales y lacustres.	

Continuación de la Tabla 2.

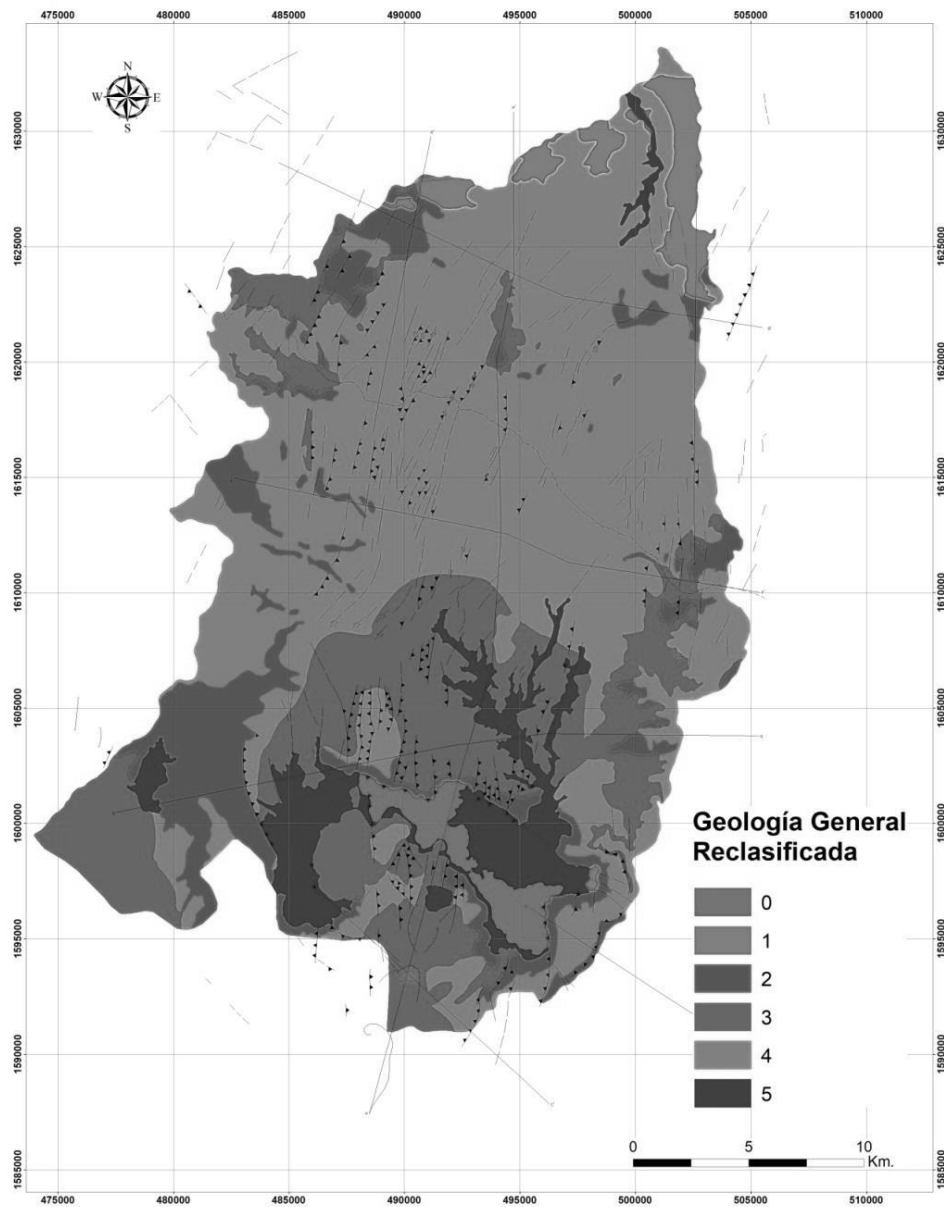
Código	Descripción geológica	Nivel para deslizamientos
---------------	------------------------------	----------------------------------

Qp	Depósitos piroclásticos producto de caída de cenizas y de flujos piroclásticos, los cuales presentan intercalaciones fluviales y lacustres.	4
Qpf	Depósitos piroclásticos principalmente producto de flujos piroclásticos, los cuales presentan intercalaciones fluviales y lacustres.	
Qal	Sedimentos aluviales no consolidados, de depositación recientes, incluyendo depósitos fluviales, deltáicos, lacustres y depósitos recientes de movimientos de laderas.	5

Nota. Categorías de las principales unidades litológicas descritas en el estudio de aguas subterráneas del Valle de la Ciudad de Guatemala. Elaborado propia, realizado con Word.

Figura 7.

Categorías de geología de acuerdo al nivel para deslizamientos



Nota. Categorización de la geología de acuerdo a los nivel de deslizamiento. Elaboración propia, realizado con Qgis.

1.3. Parámetro de humedad del terreno (Sh)

A continuación, se presentan los parámetros de humedad del terreno.

1.3.1. Análisis de consistencia de registros meteorológicos

Para el estudio del parámetro de humedad del suelo, se utilizó el estudio de suelos del Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (MAGA) escala 1/50,000 con las diferentes clases texturales del suelo haciendo referencia al contenido de arena, limo y arcilla, que se asocian para formar agregados y unidades de mayor tamaño nombrados *peds* (MAGA, 2013).

La estructura y textura del suelo afecta directamente la aireación, el movimiento del agua en el suelo, la conducción térmica, el crecimiento radicular, la resistencia a la erosión y deslizamientos. Para el análisis del presente estudio se enfatizó como un factor intrínseco la humedad del suelo que provoca los deslizamientos.

Este factor intrínseco se analizó porque el agua es el componente elemental que afecta la estructura del suelo con mayor importancia, debido a la solución y precipitación de minerales con sus efectos en la erosión, así como en los deslizamientos. El agua almacenada o fluyente en el suelo afecta la formación del suelo, su estructura y textura, estabilidad y erosión. La estabilidad del suelo es susceptible al material parietal provocando deslizamientos, principalmente cuando el suelo está totalmente saturado y las pérdidas por evapotranspiración potencial no son suficientes para la cantidad de precipitación existente.

1.3.2. Determinación de la precipitación media mensual

Con base a los registros de INSIVUMEH, TRMM y World Climate se determinó la precipitación media mensual por el método de interpolación. La

interpolación de los registros reflejó las precipitaciones mensuales promedio para el área de estudio, los meses de mayor precipitación son junio y septiembre con 258.6 y 254.6 milímetros por mes respectivamente. Los meses que poseen precipitaciones bajas son: diciembre del 2020, enero, febrero y marzo del año en curso, presentados en la Tabla 3 (TRMM, 2019; World Climate, 2019).

Tabla 3.

Registros de precipitación mensual para el departamento de Guatemala

Mes	Mínimo	Máximo	Promedio
Enero	4.00	27.90	12.90
Febrero	5.10	28.90	13.72
Marzo	8.10	27.90	17.52
Abril	21.13	57.90	38.78
Mayo	75.60	235.90	149.30
Junio	135.90	379.90	258.60
Julio	94.70	286.90	191.10
Agosto	89.75	277.99	187.30
Septiembre	132.90	390.90	254.60
Octubre	76.50	261.90	151.30
Noviembre	18.13	48.90	36.20
Diciembre	5.00	24.00	13.43

Nota. Registros de precipitación mensual para el departamento de Guatemala. Elaboración propia, realizado con Word.

1.3.3. Evapotranspiración potencial mensual

Con los registros de evapotranspiración potencial mensual, se calculó el balance hídrico del suelo y posteriormente la retención de humedad en el suelo, el valor promedio para los meses que poseen mayor evapotranspiración potencial

son septiembre y octubre con 108.2 y 104.3 milímetros por mes respectivamente. Los meses de menor evapotranspiración potencial son enero y febrero con 54.57 y 55.8 milímetros por mes, presentados en la Tabla 4.

Tabla 4.

Registros de evapotranspiración potencial, departamento de Guatemala

Mes	Mínimo	Máximo	Promedio
Enero	42.45	70.80	54.57
Febrero	44.70	71.80	55.80
Marzo	61.40	93.80	72.80
Abril	67.10	102.40	79.13
Mayo	72.50	109.20	84.80
Junio	67.60	99.00	77.80
Julio	67.70	100.10	79.04
Agosto	66.22	98.51	77.50
Septiembre	65.71	152.95	108.20
Octubre	62.56	152.12	104.26
Noviembre	54.54	143.80	93.00
Diciembre	52.10	138.60	90.62

Nota. Registros de evapotranspiración potencial del departamento de Guatemala. Elaboración propia, realizado con Word.

1.3.4. Dinámica y valorización del parámetro de humedad del suelo

La dinámica de humedad del suelo en un año hidrológico para la zona del valle de Guatemala varía de acuerdo a los registros de precipitación,

evapotranspiración y capacidad de retención de humedad del suelo según textura. En el área de estudio para el mes de enero al mes de abril, la humedad del suelo posee valores cero, debido a que las escasas precipitaciones no se almacenan en el suelo y se pierden por la evapotranspiración real provocada por la radiación solar y las temperaturas medias mensuales presentadas en Figura 8 y Tabla 5.

Al inicio del invierno en el mes de mayo los registros de humedad del suelo se representan con valores mínimos de 21.8 milímetros por mes y los valores máximos de 130.3 milímetros por mes, el valor promedio es de 59.4 milímetros por mes. Esto significa que ninguna unidad o clase textural del suelo ha perdido su capacidad de retención de humedad, es decir, no ha llegado a saturarse. Los valores máximos de saturación según su textura varían entre 150 a 250 milímetros por mes.

Para el mes de junio los valores mínimos registrados de retención de humedad son de 135.8 milímetros por mes, significa que hay suelos que por su textura no han llegado a su saturación. Los valores máximos son de 250 milímetros por mes, suelos que por su textura están saturados, el valor medio es de 192.22 milímetros por mes.

Del mes de julio a octubre los suelos se localizan saturados, sin embargo, en el mes de julio por efectos de la canícula disminuye sustancialmente la humedad del suelo, sin embargo, no es significativo aproximadamente se pierde un 15 % de la humedad que contienen el suelo almacenado, pero se saturan inmediatamente con la reanudación de las precipitaciones. En los meses de agosto, septiembre y octubre los deslizamientos del suelo son más frecuentes, ya que uno de los factores intrínsecos primordiales es la saturación de agua en el suelo.

En el mes de noviembre la humedad del suelo disminuye directamente proporcional a la disminución de la precipitación, con valores mínimos de 38.12 milímetros por mes y valores máximos de 221.2 milímetros por mes con un promedio de 126.44 milímetros por mes.

Tabla 5.

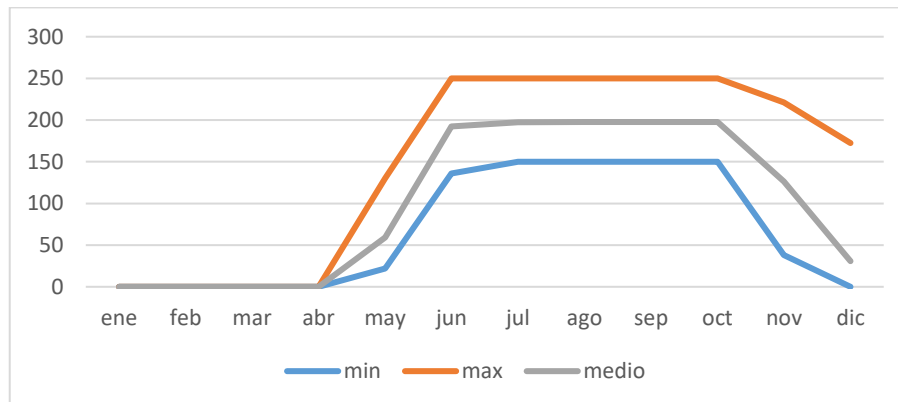
Valores mensuales de humedad del suelo

Mes	Mínimo	Máximo	Promedio
Enero	0.0	0.0	0.0
Febrero	0.0	0.0	0.0
Marzo	0.0	0.0	0.0
Abril	0.0	0.0	0.0
Mayo	21.8	130.3	59.1
Junio	135.8	250.0	192.2
Julio	150.0	250.0	197.5
Agosto	150.0	250.0	197.7
Septiembre	150.0	250.0	197.7
Octubre	150.0	250.0	197.7
Noviembre	38.1	221.2	126.4
Diciembre	0.0	172.3	30.7

Nota. Valores mensuales de humedad del suelo en la zona del Valle de la Ciudad de Guatemala. Elaboración propia, realizado con Word.

Figura 8.

Registros medios mensuales de humedad en el suelo, del valle de Guatemala



Nota. Registros medios mensuales de humedad en el suelo del valle de Guatemala. Elaboración propia, realizado con Word.

El factor de humedad anual clasificado posee registros medios y altos, con saturación del suelo, el 85 % de la superficie es un nivel alto, como se presenta en la Figura 9.

La Figura 9 presenta el factor de humedad anual el cual fue generado por el Modelo del Balance Hídrico (BHS) de Thornthwaite y Matter, algoritmo elaborado en Python para simular escenarios bidimensionales en un sistema de información geográfica el cual fue elaborado por el PhD Edwin Guillermo Santos Mansilla asesor del trabajo de investigación.

La clasificación se generó utilizando la metodología Mora Vahrson que indica valores de ponderación de acuerdo al valor de humedad mensual (mm) los cuales se presentan en la Tabla 6 (Vahrson y Mora, 1992).

Tabla 6.

Valores de retención de humedad en el suelo para cada mes

Retención de humedad		Valor asignado
mensual [mm]		
Valor mínimo	Valor máximo	
0	100	0
100	150	1
150	250	2

Nota. Valores de retención de humedad en el suelo para cada mes. Elaboración propia, realizado con Word.

Posteriormente los valores del Cuadro 8 se asignan a la suma de los valores asignados a la retención de humedad mensual para los doce meses del año, con lo que se obtiene un valor que puede oscilar entre 0 y 24 unidades. Los valores asignados presentan los aspectos relacionados con la saturación de la distribución de humedad en el suelo. Los parámetros de valor asignados se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7.

Valoración del parámetro humedad del terreno (Sh)

Suma de valores asignados por mes	Descripción	Valor del parámetro Sh
0 - 4	Muy bajo	1
5 – 9	Bajo	2
10 – 14	Medio	3
15 – 19	Alto	4

Continuación de la Tabla 7.

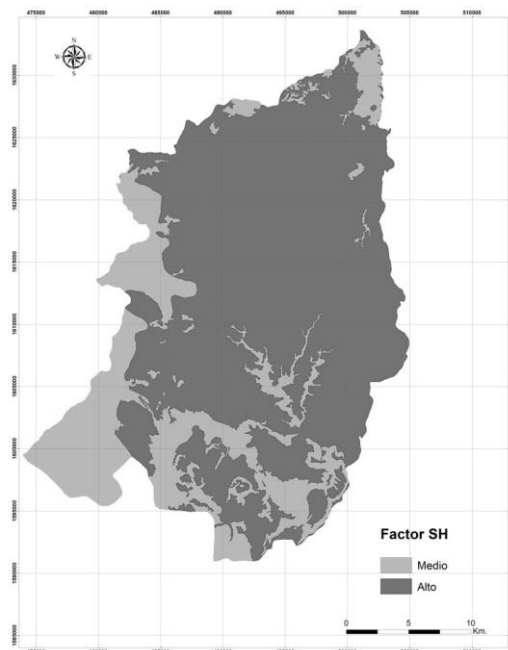
Suma de valores asignados por mes	Descripción	Valor del parámetro Sh
20—24	Muy alto	5

Nota. Valoración del parámetro humedad del terreno (Sh). Elaboración propia, realizado con Word.

Resultado de la valoración se generó el mapa del factor de humedad del suelo (Sh) que se presenta en la Figura 9.

Figura 9.

Factor de humedad del suelo (Sh) con categorías de deslizamientos



Nota. Factor de humedad del suelo (Sh) con categorías de deslizamiento. Elaboración propia, realizado con Qgis.

2. FACTORES EXTERNOS DE DISPARO (SISMOS Y LLUVIAS INTENSAS)

2.1. Factor de disparo por actividad sísmica

De acuerdo al estudio *Evaluación Regional de la Amenaza Sísmica en Centro América* elaborado por UOM (2008) en Guatemala, se conoce que los niveles de amenaza disminuyen de sur a norte, definiéndose que a lo largo de la costa Sur y en el altiplano del país, se alcanzan los valores más altos de PGA (Aceleración pico del suelo, en sus siglas en inglés), con isolíneas casi paralelas a la costa. Para el caso del valle de Guatemala, por localizarse dentro del altiplano central, los valores de PGA son altos para diferentes períodos de retorno como se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8.

Registros de sismicidad valores PGA en cm/s para el área de estudio, Tr 50 años

Sitio	Mínimo	Máximo	Promedio
Departamento Guatemala	349.76	479.47	419.77

Nota. Registros de sismicidad valores PGA en cm/s para el área de estudio, Tr 50 años. Elaboración propia, realizado con Word.

En la Figura 10 se observa los niveles de sismicidad (Ds) para el valle de Guatemala, en la Tabla 8 se presentan los valores mínimos, máximos y promedio, la categoría asignada fue medio al norte y elevado al sur. Existen diferentes razones en el caso del departamento de Guatemala se localiza cercano a la cadena volcánica del país y Costa Sur, en el departamento de Guatemala en zona Norte han sido menos intensos los sismos excepto el terremoto de 1976 (UPM, 2008).

La información sobre los valores de PGA encontradas se presentan en la Tabla 9. Para generar el factor de sismicidad (S_d) se utilizó el catálogo sísmico para Guatemala tomando como base los datos del Centro Sismológico para América Central (CASC).

Tabla 9.

Información de valores PGA (m/s^2) para Guatemala

No	Información
1	Mapas de Amenazas Sísmicas para la Ciudad de Guatemala, Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH y Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), escala 1/50,000, año 2002, son los siguientes escenarios. ▪ Mapa de amenazas Sísmicas Mixco ▪ Mapa de amenazas Sísmicas Jalpatagua ▪ Mapa de amenazas Sísmicas Motagua ▪ Mapa de amenazas Sísmicas Pinula
2	Normas de Seguridad Estructural para la República de Guatemala, 2017. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica. NS E2 Demandas Estructurales, Condiciones de Sitio y Niveles de Protección Capítulo IV Aspectos Sísmicos.
3	Evaluación Regional de la Amenaza Sísmica en Centro América AL08-PID-038, Escuela Técnica Superior de Ingeniería en Topografía, Geodesia y Cartografía. 2008. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
4	Global Sismic Hazard Map Data Details (GSHAP).
5	United States Geological Survey (USGS).

Nota. Información de valores PGA (m/s^2) para Guatemala. Elaboración propia, realizado con Word.

Para generar el mapa del parámetro D_s , se llevó a cabo la valoración presenta la clasificación con los valores del parámetro D_s , en categoría medio y alto para la zona del valle de Guatemala.

Tabla 10.

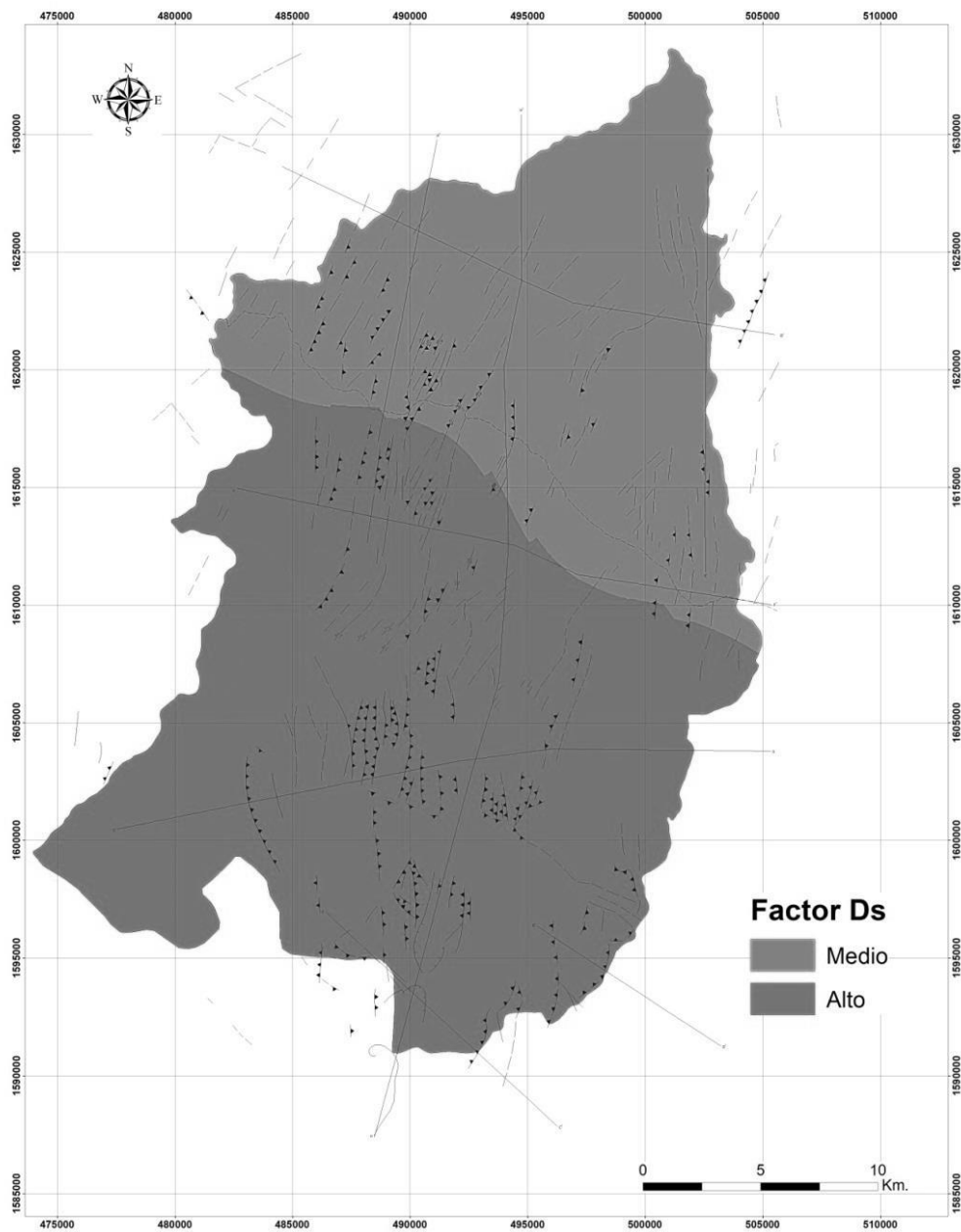
Valoración del parámetro de disparo por sismicidad Ds

Intensidad Mercalli- Modificada	Aceleración pico (%g)	Aceleración PGA	Valoración del parámetro
		(m/s ²)	Ds
III	1.0 -12	0.098-1.226	1
IV	13-20	1.227-2.011	2
V	21-29	2.012-2.894	3
VI	30-37	2.895-3.679	4
VII	38-44	3.680-4.365	5
VIII	45-55	4.366-5.445	6
IX	56-65	5.446-6.426	7
X	66-73	6.427-7.210	8
XI	74-85	7.211-8.388	9
XII	> 85	> 8.389	10

Nota. Valores del parámetro de disparo por sismicidad Ds. Elaboración propia, realizado con Word.

Figura 10.

Factor de sismicidad (Ds) con categorías de acuerdo al nivel para deslizamientos



Nota. Factor de sismicidad (Ds) con categorías de acuerdo al nivel de deslizamientos.
Elaboración propia, realizado con Qgis.

2.2. Factor de disparo por lluvias o intensidad ($D_p = \text{mm}/24\text{hrs}$)

Los registros de intensidad de lluvias para las diferentes tormentas en las estaciones meteorológicas cercanas al valle de Guatemala y el departamento de Guatemala se representan en la Tabla 11. Los valores medios máximos de intensidades de lluvia para las estaciones meteorológicas son de 135.34 milímetros por día y los valores mínimos de intensidades de lluvia son de 66.98 milímetros por día.

Tabla 11.

Valores de intensidad de lluvia en milímetros por día

Estación	Mitch	Gordon	Iris	Adrián	Stan	Bárbara	Agatha	Bárbara	Media	Tr50
Agua Tibia	343.57	68.16	0	53.01	105.52	77.32	88.83	16.77	94.15	453.06
Concuá	245.53	49.05	0	19.65	78.88	53.78	104.85	2.1	69.23	338.17
El Pilar	364.97	56.04	3.12	35.04	100.48	43.38	111.48	9.18	90.46	485.18
Florencia	466.05	56.04	3.12	35.04	100.48	43.38	111.48	9.18	103.1	612.73
Florinda	341.53	56.04	3.12	35.04	100.48	43.38	111.48	9.18	87.53	456.07
INSIVUMEH	395.12	56.04	3.12	35.04	100.48	43.38	111.48	9.18	94.23	522.93
Jardín Botánico	364.64	56.04	3.12	35.04	100.48	43.38	111.48	9.18	90.42	484.78
Jardín Mil Flores	550.7	40.41	14.73	59.61	86.11	54.9	108	25.29	117.47	714.5
La Soledad	390.54	49.62	0	76.14	96.51	70.8	65.67	28.17	97.18	508.03
Las Viñas	675.59	49.62	0	76.14	96.51	70.8	65.67	28.17	132.81	876.58
Potrero Largo	693.66	40.41	14.73	59.61	86.11	54.9	108	25.29	135.34	900.24
San Agustín Mina	422.48	40.41	14.73	59.61	86.11	54.9	108	25.29	101.44	549.19
San Antonio Miraflores	281.97	56.04	3.12	35.04	100.48	43.38	111.48	9.18	80.09	383.46
San Pedro Ayanpuc	236.61	68.16	0	53.01	105.52	77.32	88.83	16.77	80.78	323.49
Sanarate	180.99	72.81	0	54.93	83.83	74.21	56.61	12.42	66.98	251.38
Suiza Contenta	436.19	56.04	3.12	35.04	100.48	43.38	111.48	9.18	99.36	574.78

Nota. Valores de intensidad de lluvia en milímetros por día para las estaciones meteorológicas en estudio. Elaboración propia, realizado con Word.

En la Tabla 12, se representa los valores máximos, mínimos y medios para los registros de intensidad de lluvia, en el departamento de Guatemala para un

periodo de retorno de 50 años se presentan 507.96 mm/día y para Zona metropolitana se presenta 553.57 mm/día.

Según el análisis del periodo de retorno para 50 años y la interpolación espacial de los registros, el valor promedio de intensidad de lluvia para el valle de Guatemala es de 553.57 milímetros por día y para el departamento de Guatemala es de 507.9 milímetros por día.

Tabla 12.

Registros de intensidad de lluvia mm/día para un Tr 50 años

Departamento	Mínimo	Máximo	Promedio
Guatemala	323.49	900.24	507.96
Valle de Guatemala	487.95	684.73	583.53

Nota. Registros de intensidad de lluvia mm/día para un Tr 50 años. Elaboración propia, realizado con Word.

Para la elaboración del mapa del parámetro de lluvias (D_p) se consideró la intensidad de lluvias potencialmente generadoras de deslizamientos, se utilizó la lluvia máxima en 24 horas con un período de retorno de 50 años, aplicando la distribución de valores extremos Gumbel tipo I a series temporales con más de 10 años de registro (Vahrson y Mora, 1992).

En la Tabla 13 se presenta la valoración del parámetro D_p .

Tabla 13.

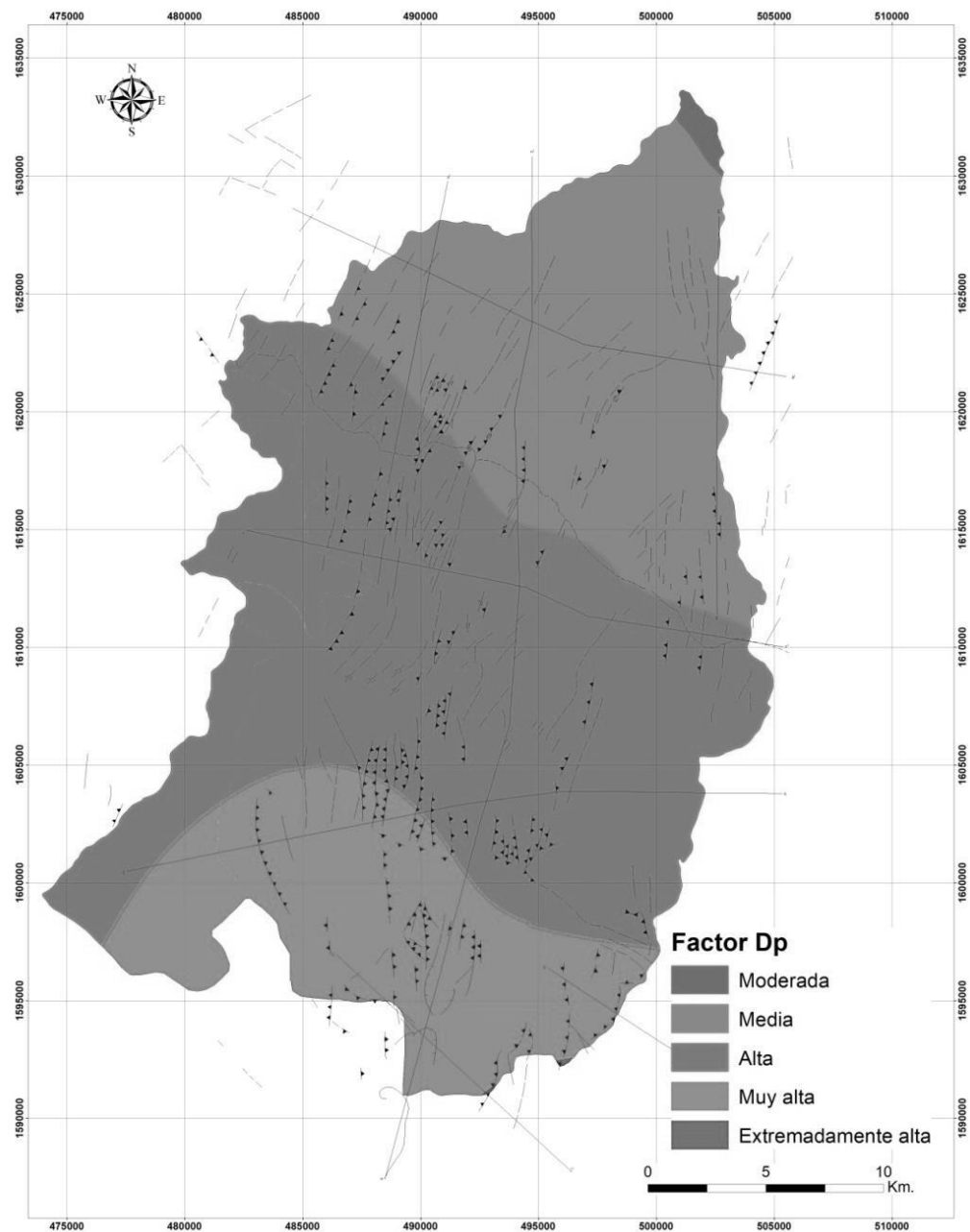
Valoración del parámetro de disparo por lluvias D_p

Lluvia máxima en 24 horas, período de retorno Tr 50 años [mm]	Descripción	Valor del parámetro Dp
Menor 100	Muy bajo	1
100-200	Bajo	2
200-300	Medio	3
300-400	Alto	4
400 Mayor	Muy alto	5

Nota. Valoración del parámetro de disparo por lluvias Dp. Elaboración propia, realizado con Word.

Figura 11.

Factor de disparo por lluvias o intensidad ($Dp = mm/24hrs$)



Nota. Factor de disparo por intensidad de lluvias. Elaboración propia, realizado con Qgis.

3. MAPA DE LA DISTRIBUCIÓN DE ÁREAS CON CATEGORÍA DE AMENAZA A DESLIZAMIENTOS

Se realizó el mapa de deslizamientos considerando los factores de susceptibilidad y factores de disparo. El factor de susceptibilidad se generó a partir de las variables de pendientes del terreno, humedad de suelo y litología, para los factores de disparo se consideró la precipitación anual y la sismicidad. Las áreas vulnerables a deslizamientos se generaron para el departamento de Guatemala y el área que considera el estudio de aguas subterráneas del valle de Guatemala del año 1978 (INSIVUMEH, 1978).

El estudio comprende un área de 646.07Km², el límite abarca los municipios de San Raymundo, Chinautla, Guatemala, Mixco, Santa Catarina Pinula, Villa Nueva, Villa Canales, Fraijanes, Petapa, Amatitlán, San Pedro Sacatepéquez y San Juan Sacatepéquez.

Como resultado del análisis realizado se obtuvo que el 29 % del territorio se localiza en categoría de muy baja amenaza a deslizamientos. Hay que tener en cuenta que son áreas donde existen centros poblados en áreas estables o con pendientes bajas que no presentan amenazas a deslizamientos, pero a su alrededor se localizan laderas de montañas, pendientes altas, fallas geológicas que provocan deslizamientos.

Se consideran sectores estables que no se requieren medidas correctivas, se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta. En su mayoría se pudo observar que contiene a las áreas urbanas de alta densidad y edificios con diversos usos como hospitales, centros educativos, edificios de gobierno y privados.

El 13.7 % del área de estudio se localiza en la categoría de baja amenaza a deslizamientos donde se observa sectores estables que requieren medidas correctivas menores, solamente en caso de obras de infraestructura de gran envergadura. Considerando la influencia de los sectores aledaños con riesgo a amenaza moderada a muy alta a deslizamientos por las condiciones que presentan son sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios.

Las zonas con categoría moderada poseen un 24.42 % de la superficie total, se localiza en su mayoría en pendientes medias por tal razón es necesario considerar las partes altas donde se localizan zonas con amenazas a deslizamientos alta, muy alta y extremadamente altas. Es necesario considerar medidas de protección como estabilización de taludes, movimientos de tierra, estructuras de retención, mejoras en el manejo de aguas superficiales y subterráneas, aplicación de técnicas de conservación de suelos. Estas zonas no se deben permitir la construcción de infraestructura si no se realizan estudios geotécnicos y se mejora la condición del sitio.

Considerando las medidas necesarias se puede realizar usos urbanos de baja densidad, considerando dar especial cuidado a las zonas urbanas ya establecidas y a las áreas que han sido rellenadas dando especial cuidado.

Los sectores con muy alta amenaza a deslizamientos representan el 12.8 % del territorio son zonas que no deben utilizarse para construcción de infraestructura y es necesario utilizarlas como zonas de protección forestal.

Las mejoras pueden incluir: movimientos de tierra, estructuras de retención, manejo de aguas superficiales y subterráneas, bioestabilización de terrenos, manejo y conservación de suelo y agua. Los sectores con rellenos mal

compactados son de especial cuidado. Recomendable para usos urbanos de alta densidad.

Tabla 14.

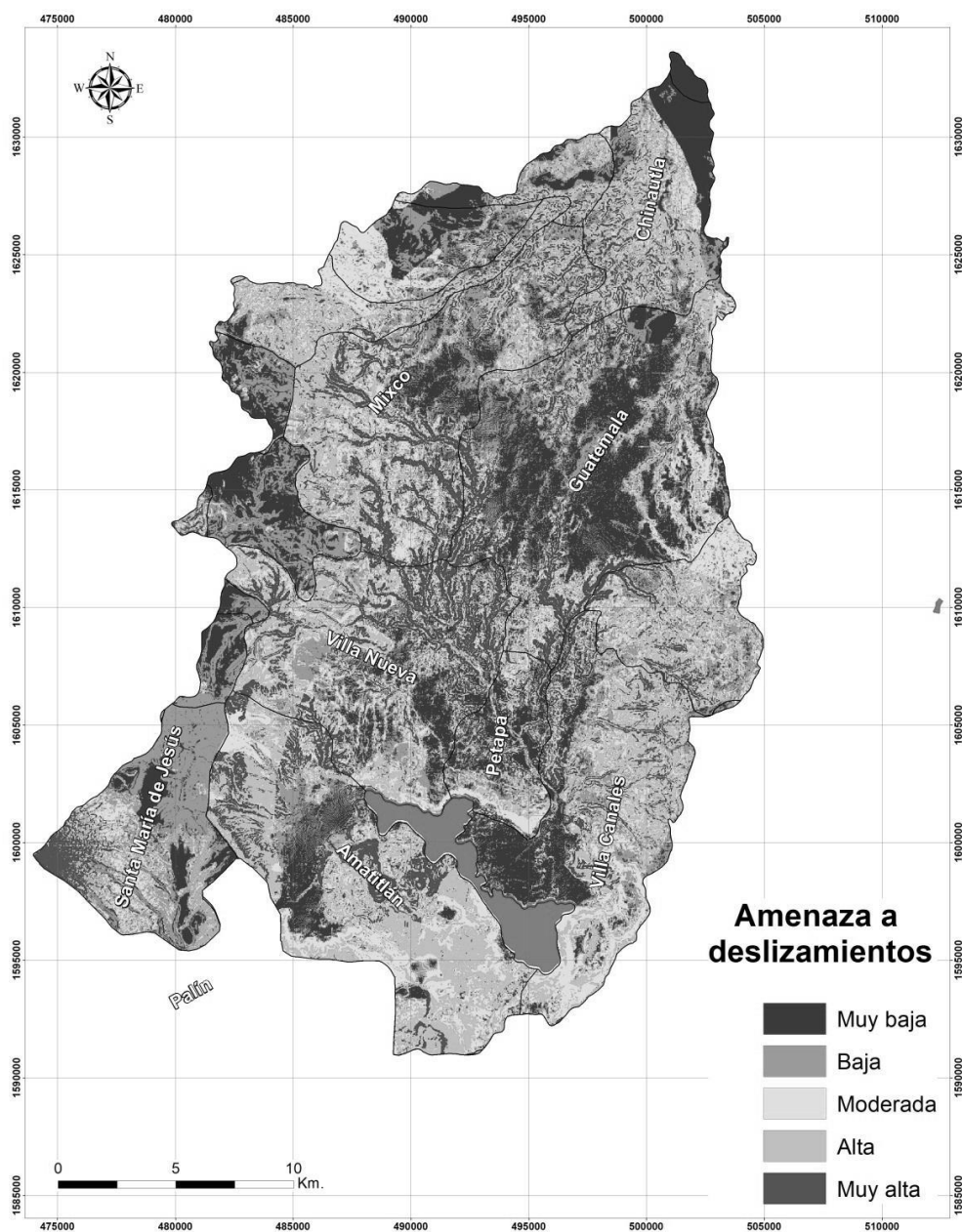
Áreas con amenaza a deslizamientos para el valle de Guatemala

Categoría	%
Muy Baja	29.04
Baja	13.66
Moderada	24.42
Alta	20.07
Muy Alta	12.8
Total	100

Nota. Áreas con amenaza a deslizamientos para el valle de la Ciudad de Guatemala. Elaboración propia, realizado con Word.

Figura 12.

Categorías de amenaza a deslizamientos en el valle de la ciudad de Guatemala



Nota. Categorías de amenaza a deslizamientos en el Valle de la Ciudad de Guatemala.
Elaboración propia, realizado con Qgis.

Tabla 15.

Porcentaje con respecto a la superficie total de los municipios

Municipio	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto
	%	%	%	%	%
San Raymundo	36	21	15	22	5
San Juan Sacatepéquez	12	26	46	14	3
San Pedro Ayampuc	59	15	26	1	0
Chinautla	31	15	15	26	13
San Pedro Sacatepéquez	11	11	28	45	6
Guatemala	38	19	20	12	10
Mixco	16	16	25	24	19
Santa Catarina Pínula	5	14	31	34	17
Villa Nueva	21	15	28	16	20
Villa Canales	36	9	20	20	15
Fraijanes	11	28	46	14	2
Petapa	45	12	25	10	8
Amatitlán	42	4	26	20	8
Promedio	28	16	27	20	10

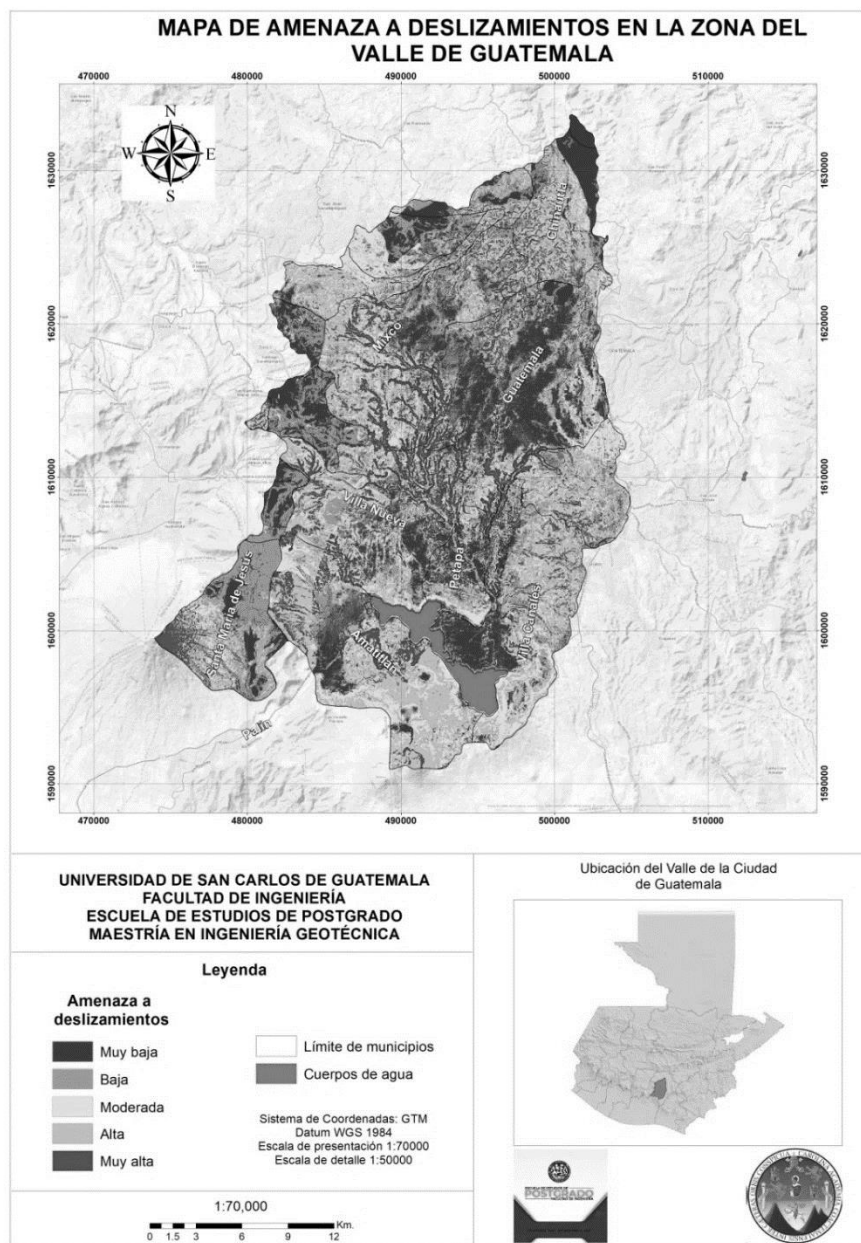
Nota. Porcentaje sobre amenaza a deslizamientos para el Valle de la Ciudad de Guatemala.
Elaboración propia, realizado con Word.

3.1. Mapa final de amenaza a deslizamiento en la zona del valle de la ciudad de Guatemala 1:50000

A continuación en la Figura 13 se presenta el mapa final de amenaza a deslizamiento en la zona del valle de la ciudad de Guatemala 1:50000.

Figura 13.

Mapa de amenaza a deslizamientos en el valle de la ciudad de Guatemala final



Nota. Mapa de amenaza a deslizamientos en el Valle de la Ciudad de Guatemala. Elaboración propia, realizada con Qgis.

CONCLUSIONES

1. El valle de la ciudad de Guatemala tiene una extensión de 646.07 km², y presenta pendientes con una predominancia de la categoría de 16-35 grados de 29.6 %. La valorización litológica para correr el modelo de Mora & Varhson fue mayor para las zonas compuestas por sedimentos aluviales no consolidados, de deposición recientes, incluyendo depósitos fluviales, deltáicos, lacustres y depósitos recientes de movimientos de laderas son los más vulnerables a deslizamientos.
2. El análisis doblemente acumulativo determinó la consistencia de los registros de precipitación para el análisis de humedad del suelo por mes, los registros se ajustaron para posteriormente interpolar la precipitación mensual, la interpolación de los registros reflejó las precipitaciones mensuales promedio para el área de estudio, los meses de mayor precipitación son junio y septiembre con 258.6 y 254.6 milímetros por mes respectivamente.
3. El valor promedio para los meses que poseen mayor evapotranspiración potencial son septiembre y octubre con 108.2 y 104.3 milímetros por mes respectivamente y los meses de menor evapotranspiración potencial son enero y febrero con 54.57 y 55.8 milímetros por mes.
4. En el mes de noviembre la humedad del suelo disminuye directamente proporcional a la disminución de la precipitación, con valores mínimo de 38.12 milímetros por mes y valores máximos de 221.2 milímetros por mes, con un promedio de 126.44 milímetros por mes. Al inicio del invierno en el mes de mayo los registros de humedad del suelo se representan con valores mínimos de 9.2 milímetros al mes y los valores máximos de 151.5 milímetros al mes, el valor medio es de 62.3 milímetros al mes. Esto

significa que ninguna unidad de suelo según su textura ha perdido la capacidad de retención de humedad.

5. Para el mes de junio los valores mínimos registrados de retención de humedad son de 117.4 milímetros por mes, significa que hay suelos que por su textura no han llegado a saturación. Los valores máximos son de 250 milímetros por mes, suelos que por la textura están saturados, el valor medio es de 188.6 milímetros por mes. Del mes de julio a octubre los suelos se localizan saturados, sin embargo, en el mes de julio por efectos de la Canícula disminuye sustancialmente la humedad del suelo, aunque no es significativo, aproximadamente es el 15 % de la humedad que contienen el suelo almacenado, pero se saturan inmediatamente con la reanudación de las precipitaciones.
6. El valor medio máximo de intensidades de lluvia para las estaciones meteorológicas es de 135.34 milímetros por día y los valores mínimos de intensidades de lluvia son de 66.98 milímetros por día.
7. Guatemala se localiza en una región de alta actividad sísmica, por localizarse en la interacción de la triple unión entre las placas tectónicas Norteamericana, Cocos y Caribe. Las principales fuentes sísmicas que afectan el territorio son: zona de subducción entre las Placas de Cocos y Caribe, los sistemas de fallas tectónicas Polochic-Motagua entre las placas Norteamericana y Caribe, y los sistemas de fallas en el interior de la Placa del Caribe (franja del Arco Volcánico y la región de grabens entre la Falla del Motagua y el Arco Volcánico).
8. Los niveles de sismicidad (Ds) según el PGA para un Tr de 50 años en el departamento de Guatemala es de 419.77 cm/s y 462.79 cm/s valores que se han identificado en el área. En el caso del departamento de Guatemala

se localiza cercano a la cadena volcánica del país zona Sur del departamento y en la zona Norte han sido menos intensos los sismos, excepto el terremoto de 1976.

9. Según el análisis del periodo de retorno para 50 años y la interpolación espacial de los registros el valor promedio de intensidad de lluvia para el valle de la ciudad de Guatemala es de 553.57 milímetros por día.
10. El 29 % y 13.7 % del territorio de área se localiza en categoría de muy baja a baja amenaza a deslizamientos respectivamente, hay que tener en cuenta que son áreas donde existen centros poblados en zonas estables o con pendientes bajas que no presentan amenazas a deslizamientos.
11. En el valle de la ciudad de Guatemala, las zonas con categoría moderada poseen un 24.42 % de la superficie total, se localiza en su mayoría en pendientes medias. Por tal razón, es necesario considerar las partes altas donde se localizan zonas con amenazas a deslizamientos alta, muy alta y extremadamente altas.
12. Las zonas con alta y muy alta amenaza a deslizamiento es necesario brindar atención especial al uso que pueda soportar ya que estas zonas presentan el 20.07 % y 17 % del territorio.

RECOMENDACIONES

1. El Cinturón Ecológico Metropolitano (CEM) está orientado a la protección de los remanentes de bosques en la zona metropolitana de la ciudad de Guatemala. Estos bosques se encuentran básicamente en los barrancos y cerros que poseen diferentes niveles de susceptibilidad a deslizamientos regularmente de alto a muy alto y diferentes niveles de manejo por lo cual el resultado obtenido en la investigación puede apoyar en el proceso de planificación.
2. Es necesario considerar medidas de protección en los diferentes niveles de manejo como: estabilización de taludes, evitar movimientos de tierra, estructuras de retención, mejoras en el manejo de aguas superficiales y subterráneas, aplicación de técnicas de conservación de suelo y agua, pozos de infiltración, barreras muertas, modificación de geometría de taludes principalmente en las vías de acceso, sistema de drenaje y protección de superficie.
3. Al construir infraestructura es necesario hacer estudios geotécnicos y medidas de protección de laderas en zonas donde se realicen cortes o rellenos y la susceptibilidad de deslizamientos es de moderada a muy alta. La categoría manejo alta y muy alta para el valle de la ciudad de Guatemala es del 35 % de la superficie total del territorio, zonas que deben ser intervenidas con técnicas de conservación de suelo y agua, reforestaciones y técnicas de protección de laderas.

4. En promedio para los municipios del valle de la ciudad de Guatemala se representa el mayor porcentaje de superficie para la categoría baja con 36.70 %, debido a que la mayor parte de las zonas no pobladas son quebradas con escasa vegetación y las superficies urbanizadas en su mayoría son zonas con relieves planos. Sin embargo, es necesario prácticas de estabilización en zonas no urbanizadas.
5. La categoría moderada es de 45.15 % del total del área del departamento, zonas que deben ser intervenidas con técnicas de conservación de suelo y agua, reforestaciones y técnicas de protección de laderas.
6. Para mejorar la escala de estudio es necesario densificar la red meteorológica y geodésica de la ciudad de Guatemala, así como implementar estudios litológicos a escalas con mayor detalle.
7. Elaborar un plan para implementar un Sistema de Alerta Temprana por deslizamientos en las zonas de media a muy alta susceptibilidad a deslizamientos, el plan debe ser acompañado de medidas de mitigación y contingencia. Implementar un estudio de valorización del riesgo a deslizamientos para analizar la aplicación de seguros y legislación en zonas de moderada a muy alta susceptibilidad a deslizamientos.
8. Texto Recomendaciones puntuales para las zonas de moderado a muy alta vulnerabilidad a deslizamientos: No eliminar la vegetación, no excavar las laderas de los cerros en forma de cortes y terrazas. Evitar hacer rellenos o cortes en terrenos de pendientes fuertes, principalmente en vías de acceso. Si hay drenajes, alcantarillas o cunetas cerca del área, tratar de mantenerlos en buen estado y limpios, canalizando al drenaje

más cercano. Revisar constantemente si hay grietas, cauce o hundimientos cercanos. Situar los proyectos de desarrollo en terreno estable: utilizar las áreas susceptibles a deslizamientos, como espacio abierto o, para actividades de poca intensidad, tales como parques o pastizales.

REFERENCIAS

Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. (1978). *Estudio de aguas subterráneas en el valle de la Ciudad de Guatemala*. <https://funcagua.org.gt/wp-content/uploads/2020/04/1978.-Aguas-subterr%C3%A1neas-en-el-Valle-de-la-Ciudad-de-Guatemala.-INSIVUMEH-IGN-ONU.pdf>

Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología y Instituto Geográfico Nacional. (1978). *Mapa de geología general estudio de aguas subterráneas en Guatemala, Cuenca del Valle de Guatemala*. <https://funcagua.org.gt/wp-content/uploads/2020/04/1978.-Aguas-subterr%C3%A1neas-en-el-Valle-de-la-Ciudad-de-Guatemala.-INSIVUMEH-IGN-ONU.pdf>

Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (2003). *Mapas registros de Sismología fallas Mixco, Motagua, Jalpatagua y Pinula*.

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. (2013). *Estudio semidetallado de los suelos del departamento de Guatemala*. <https://www.maga.gob.gt/download/suelos-sac.pdf>

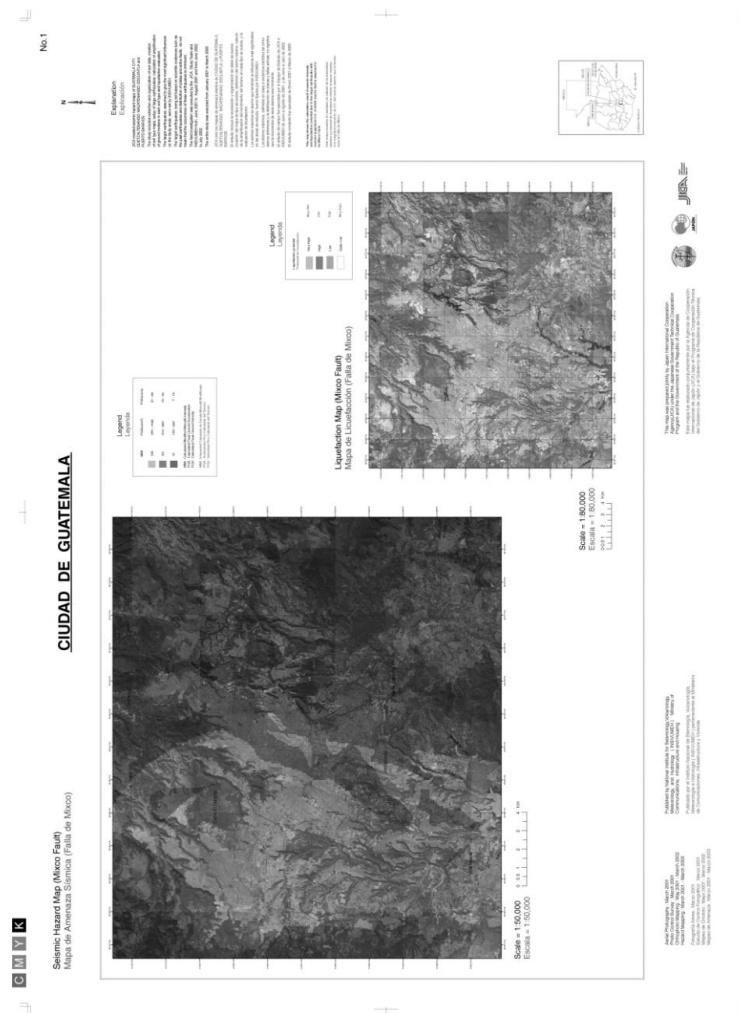
Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia. (2015). *Proyecto de Cartografía Metropolitana*. https://portal.segeplan.gob.gt/segeplan/wp-content/uploads/2022/07/106_PDM_OT_final_CHINAUTLA.pdf

- The Tropical Rainfall Measuring Mission. (2019). *The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), 2000-2019*.
https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=QuCI&starttime=&endtime=&month=&season=&data=TRMM_3B42_7_precipitation
- Universidad Politécnica de Madrid. (2008). *Evaluación Regional de la Amenaza Sísmica en Centro América*.
http://redgeomatica.rediris.es/andes/htmls/pdf/Informe_UPM_2008.pdf
- Vahrson, W y, Mora, S. (1992). *Mapa de amenaza de deslizamientos, Valle Central, Costa Rica*. CEPREDENAC.
<https://search.worldcat.org/title/Mapa-de-amenaza-de-deslizamientos-Valle-Central-Costa-Rica/oclc/61280324>
- Van, R. (1986). *Aerial Photointerpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping* [Fotointerpretación aérea en análisis del terreno y cartografía geomorfológica]. Smits Publishers.
- WorldClimate. (2019). *Registros de precipitación y temperatura mensual*.
<http://www.worldclim.org/>

ANEXOS

Anexo 1.

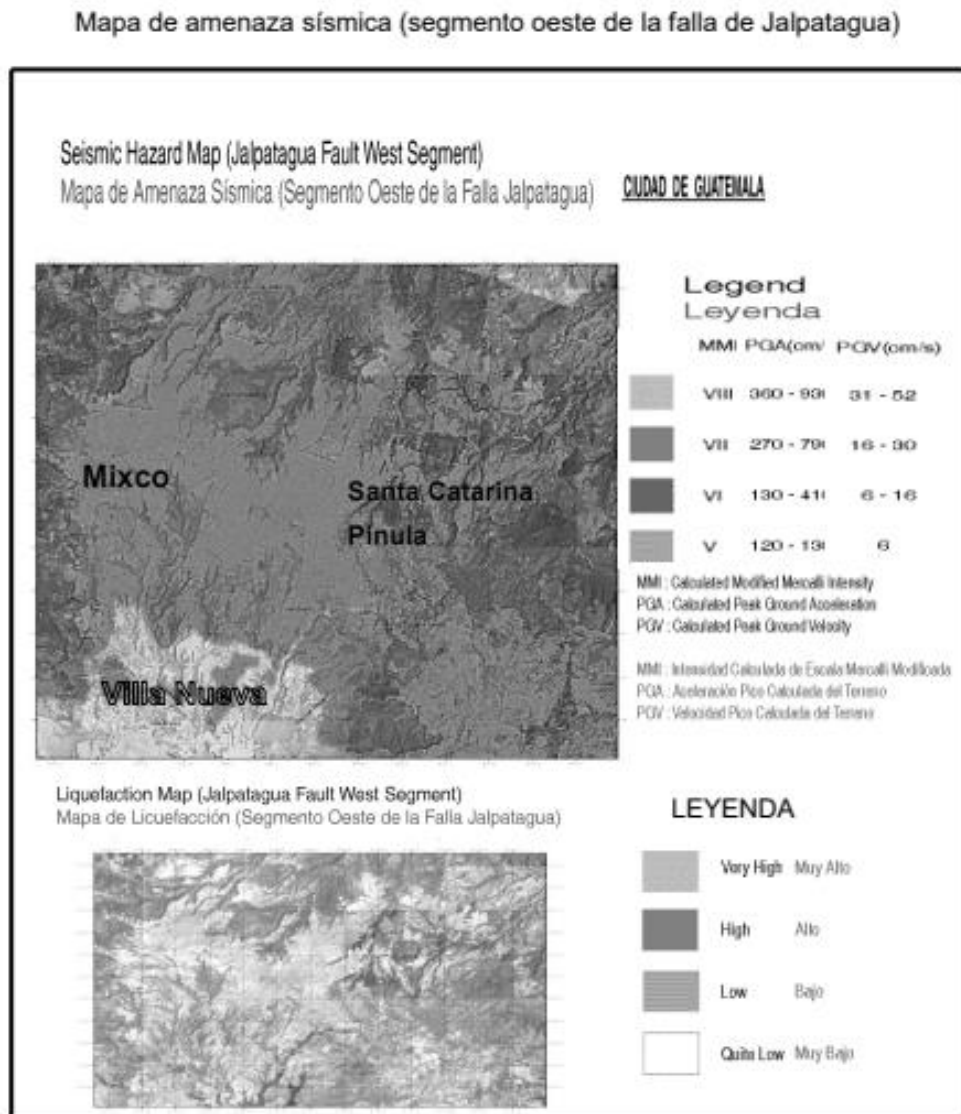
Mapa de amenaza sísmica de la falla de Mixco



Nota. Mapa de amenaza sísmica en la Falla de Mixco. Obtenido de Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (2003). *Mapas registros de Sismología fallas Mixco, Motagua, Jalpatagua y Pinula.* (p. 23).

Anexo 2.

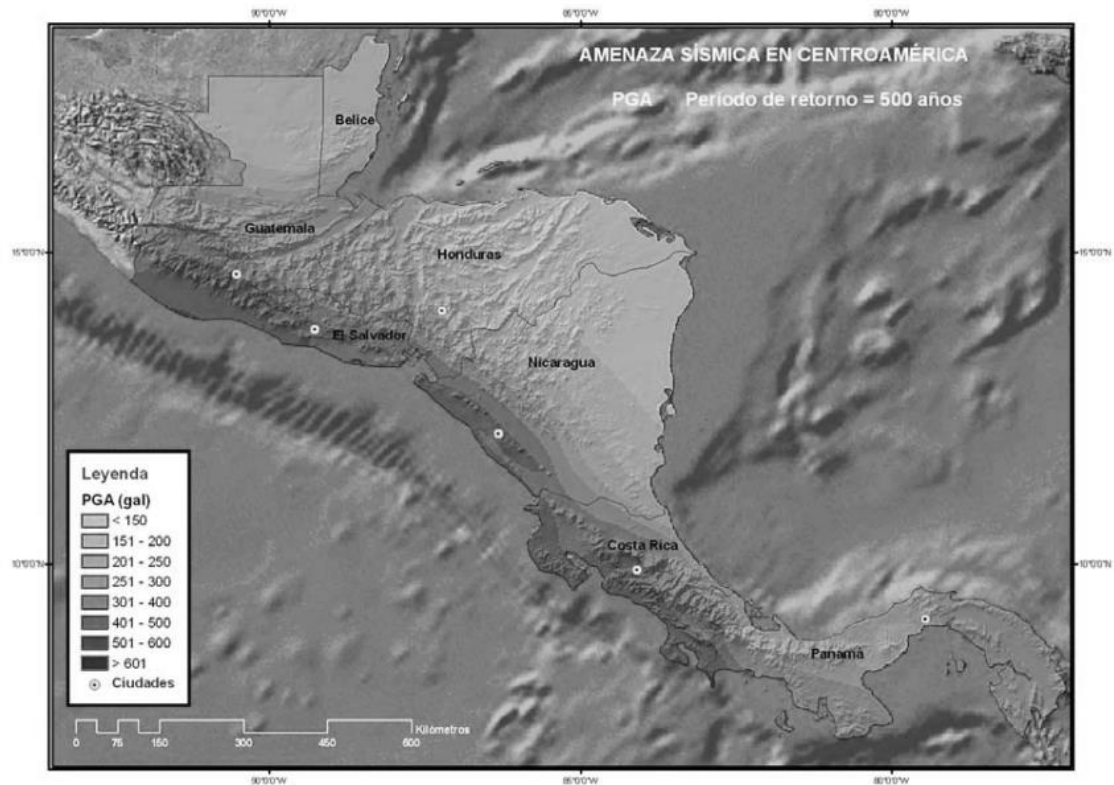
Mapa de amenaza sísmica segmento oeste de la falla de Jalpatagua



Nota. Mapa de amenaza sísmica segmento oeste de la falla de Jalpatagua. Obtenido de Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (2003). *Mapas registros de Sismología fallas Mixco, Motagua, Jalpatagua y Pinula.* (p. 25).

Anexo 3.

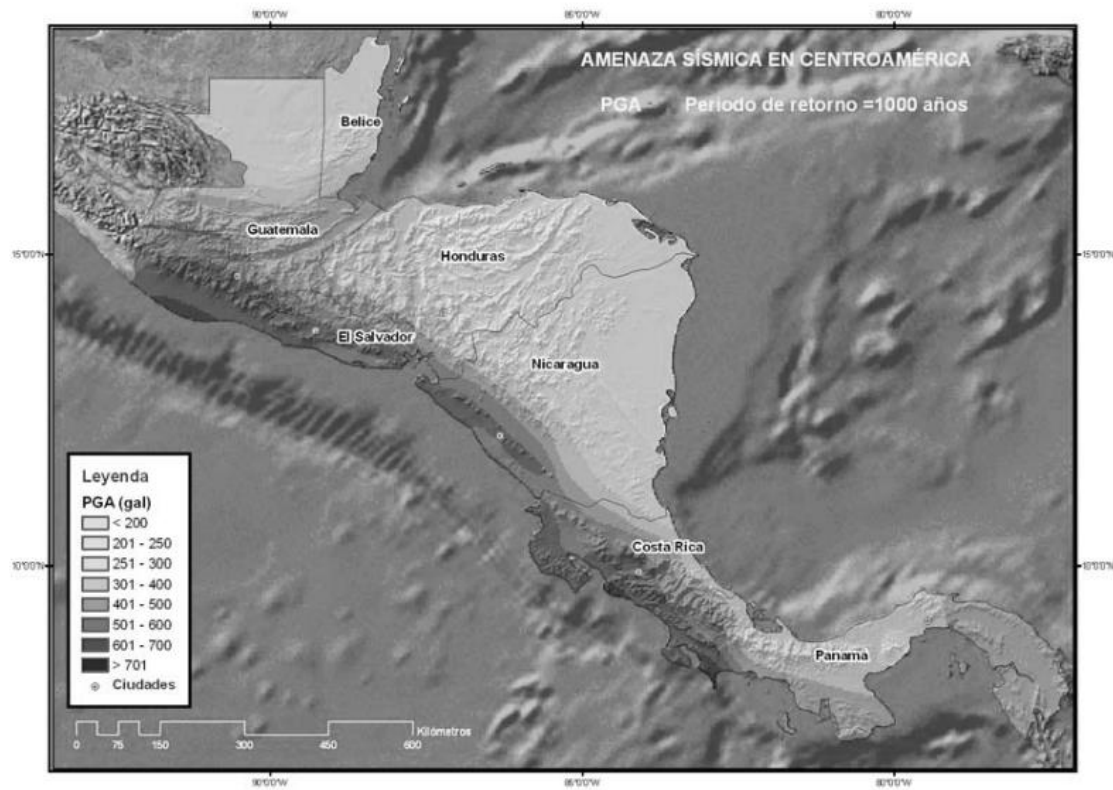
Mapa de amenaza en términos de PGA (gal) para PR = 500 años



Nota. Mapa de amenaza sísmica segmento oeste de la falla de Jalpatagua. Obtenido de Universidad Politécnica de Madrid. (2008). *Evaluación Regional de la Amenaza Sísmica en Centro América*. (p. 42). http://redgeomatica.rediris.es/andes/htmls/pdf/Informe_UPM_2008.pdf.

Anexo 4.

Mapa de amenaza en términos de PGA (gal) para PR = 500 años



Nota. Mapa de amenaza en términos de PGA (gal) para PR = 500 años. Obtenido de Universidad Politécnica de Madrid. (2008). *Evaluación Regional de la Amenaza Sísmica en Centro América*. (p. 43). http://redgeomatica.rediris.es/andes/htmls/pdf/Informe_UPM_2008.pdf.

Anexo 5.

Registros de precipitación media mensual en el área, 1980 – 2018

ID	Longitud	Latitud	Dato Tr50	ID	Longitud	Latitud	Dato Tr50
1	-90.8	14.2	468.1112	33	-90.4	14.6	418.0311
2	-90.7	14.2	470.9406	34	-90.3	14.6	400.397
3	-90.6	14.2	476.8189	35	-90.2	14.6	382.4173
4	-90.5	14.2	481.0352	36	-90.8	14.7	445.7958
5	-90.4	14.2	480.9858	37	-90.7	14.7	433.4702
6	-90.3	14.2	477.5075	38	-90.6	14.7	419.6077
7	-90.2	14.2	471.5698	39	-90.5	14.7	404.6937
8	-90.8	14.3	472.9719	40	-90.4	14.7	389.0715
9	-90.7	14.3	476.7986	41	-90.3	14.7	372.6734
10	-90.6	14.3	479.4775	42	-90.2	14.7	358.7119
11	-90.5	14.3	478.9272	43	-90.8	14.8	416.6082
12	-90.4	14.3	475.4574	44	-90.7	14.8	403.8114
13	-90.3	14.3	468.7903	45	-90.6	14.8	390.5991
14	-90.2	14.3	459.3239	46	-90.5	14.8	377.3623
15	-90.8	14.4	479.1672	47	-90.4	14.8	364.9517
16	-90.7	14.4	478.3125	48	-90.3	14.8	353.5439
17	-90.6	14.4	475.9239	49	-90.2	14.8	343.7421
18	-90.5	14.4	471.1271	50	-90.8	14.9	389.2144
19	-90.4	14.4	463.8944	51	-90.7	14.9	378.7936
20	-90.3	14.4	453.3897	52	-90.6	14.9	368.0019
21	-90.2	14.4	439.5459	53	-90.5	14.9	358.4455
22	-90.8	14.5	477.2667	54	-90.4	14.9	349.7057
23	-90.7	14.5	472.5137	55	-90.3	14.9	341.982
24	-90.6	14.5	465.915	56	-90.2	14.9	334.8947
25	-90.5	14.5	456.8233	57	-90.8	15	368.9402
26	-90.4	14.5	445.0014	58	-90.7	15	360.7837

Continuación del Anexo 5.

ID	Longitud	Latitud	Dato Tr50	ID	Longitud	Latitud	Dato Tr50
27	-90.3	14.5	429.9034	59	-90.6	15	353.44
28	-90.2	14.5	411.7586	60	-90.5	15	346.6196
29	-90.8	14.6	466.4635	61	-90.4	15	340.0247
30	-90.7	14.6	457.7297	62	-90.3	15	333.8594
31	-90.6	14.6	447.3858	63	-90.2	15	328.4129

Nota. Registros de precipitación media mensual en el área, 1980 – 2018. Obtenido de The Tropical Rainfall Measuring Mission. (2019). *The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), 2000-2019*.

(https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=QuCI&starttime=&endtime=&month=&season=&data=TRMM_3B42_7_precipitation), consultado el 15 de octubre de 2023. De dominio público.

Anexo 6.

Cobertura estudio geológico del valle de Guatemala

Cobertura estudio geológico en municipios					
Departamento	Municipio	km ²	%	Área km ²	% de estudio geológico en el municipio
Guatemala	Amatitlán	98.97	13.43	100.84	98.15
Guatemala	Chinautla	43.68	5.92	66.96	65.22
Guatemala	Chuarancho			117.8	
Guatemala	Fraijanes	0.39	0.05	115.01	0.34
Guatemala	Guatemala	117.49	15.94	214.73	54.72
Guatemala	Palencia			217.37	
Guatemala	San José del Golfo			76.37	
Guatemala	San José Pinula			197.69	
Guatemala	San Juan Sacatépéquez	24.12	3.27	272.56	8.85
Guatemala	San Pedro Ayampuc	1.78	0.24	106.67	1.67
Guatemala	San Pedro Sacatépéquez	23.88	3.24	28.85	82.78
Guatemala	San Raymundo	12.91	1.75	124.84	10.34
Guatemala	Santa Catarina Pinula	36.23	4.91	67.26	53.86
Guatemala	Villa Canales	84.36	11.44	279.64	30.17
Guatemala	Villa Nueva	88.29	11.98	88.95	99.25
Sacatepéquez	Alotenango			90.07	
Sacatepéquez	Antigua Guatemala	0.02	0	68.86	0.03
Sacatepéquez	Ciudad Vieja			35.71	
Sacatepéquez	Jocotenango			9.95	
Sacatepéquez	Magdalena Milpas Altas	6.67	0.9	14.55	45.84
Sacatepéquez	Pastores			39.16	
Sacatepéquez	San Antonio Aguas Calientes			5.15	

Nota. Registros de precipitación media mensual en el área Cobertura estudio geológico del valle de Guatemala. Obtenido de Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología y Instituto Geográfico Nacional. (1978). *Mapa de geología general estudio de aguas subterráneas en Guatemala, Cuenca del Valle de Guatemala.* (p. 8). <https://funcagua.org.gt/wp-content/uploads/2020/04/1978.-Aguas-subterr%C3%A1neas-en-el-Valle-de-la-Ciudad-de-Guatemala.-INSIVUMEH-IGN-ONU.pdf>.

Anexo 7.

Continuación de cobertura estudio geológico del valle de Guatemala

		Cobertura estudio geológico en municipios			
Departamento	Municipio	km ²	%	Área km ²	% de estudio geológico en el municipio
Sacatepéquez	San Bartolomé Milpas Altas	1.64	0.22	8.35	19.68
Sacatepéquez	San Lucas Sacatepéquez	21.1	2.86	23.26	90.7
Sacatepéquez	San Miguel Dueñas			44.74	
Sacatepéquez	Santa Catarina Barahona			10.54	
Sacatepéquez	Santa Lucía Milpas Altas	1.98	0.27	9.19	21.53
Sacatepéquez	Santa María de Jesús.	50.68	6.87	60.78	83.39
Sacatepéquez	Santiago Sacatepéquez	9.03	1.23	40.44	22.33
Sacatepéquez	Sto. Domingo Xenacoj			24.76	
Sacatepéquez	Sumpango			50.5	
Guatemala	Mixco	90.21	12.24	90.21	100
Guatemala	Petapa	23.76	3.22	23.76	100

Nota. Continuación de Cobertura estudio geológico del valle de Guatemala. Obtenido de Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología y Instituto Geográfico Nacional. (1978). *Mapa de geología general estudio de aguas subterráneas en Guatemala, Cuenca del Valle de Guatemala*. (p. 8). <https://funcagua.org.gt/wp-content/uploads/2020/04/1978.-Aguas-subterr%C3%A1neas-en-el-Valle-de-la-Ciudad-de-Guatemala.-INSIVUMEH-IGN-ONU.pdf>.