Universidad de San Carlos de Guatemala
Dirección General de Investigación
Programa Universitario de Investigación en Educación

Informe final

Simulación numérica de la dispersión y caída de ceniza en el Municipio de Quetzaltenango debida al Volcán Santiaguito

Equipo de investigación

Mario Luis Cifuentes Jacobs

Eddie Omar Flores Aceituno
Melissa Liseth Villatoro Celada
Juan Adolfo Orózco Coloma
Cristian Alejandro Navarro Guitz

Quetzaltenango, 30 de octubre de 2020

Dirección General de Sistema de Investigación, Centro Universitario de Occidente

Dr. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera
Director General de Investigación

Ing. Agr. MARN Julio Rufino Salazar
Coordinador General de Programas

Lic. León Roberto Barrios Castillo
Coordinador Programa de Investigación en Educación

Ing. Mario Luis Cifuentes Jacobs

PhD. Ing. Eddie Omar Flores Aceituno

Melissa Liseth Villatoro Celada

Juan Adolfo Orózco Coloma

Cristian Alejandro Navarro Guitz

Universidad de San Carlos de Guatemala, Dirección General de Investigación, 2020. El contenido de este informe de investigación es responsabilidad exclusiva de sus autores.

Esta investigación fue cofinanciada por la Dirección General de Investigación de la Universidad de San Carlos de Guatemala a través de la Partida Presupuestaria 4.8.12.1.0., código B)CU, durante el año 2020 en el Programa Universitario de Investigación de Educación.

Índice de contenido

1. Resumen 7
2. Abstract 8
3. Introducción 9
4. Planteamiento del Problema 10
5. Preguntas de Investigación 11
6. Delimitación en Tiempo y Espacio 12
6.1. Delimitación en Tiempo 12
6.2. Delimitación Espacial 12
7. Marco Teórico 13
7.1. Actividad Volcánica de Guatemala 13
7.2. Volcán Santiaguito 13
7.2.1. Características generales del volcán Santiaguito. 14
7.2.2. Erupciones críticas del volcán Santiaguito. 14
7.3. Ceniza Volcánica y Fenómeno de Dispersión 18
7.3.1. Dispersión de ceniza. 18
7.4. Métodos de Simulación 19
7.4.1. Modelo euleriano tridimensional para transporte atmosférico de tefra y deposición 19
8. Estado del arte 22
8.1. Domos Activos en Volcán Santiaguito. 22
8.2. Representación de la Dispersión de Ceniza del Volcán Santiaguito. 22
8.3. Riegos Principales debidos al Volcán Santiaguito 22
8.4. Análisis de Flujos Piroclasticos en el Volcán Santiaguito. 23
8.5. Corrientes de Densidad Piro clástica. 23
8.6. Lahares. 23
8.7. Desprendimiento de Rocas. 23
8.8. Flujos de lava del Volcán Santiaguito 24

9. Objetivos 25
9.1. Objetivo General. 25
9.2. Objetivos Específicos 25
10. Materiales y métodos 25
10.1. Enfoque y tipo de Investigación 25
10.2. Técnicas e Instrumentos 25
10.3. Recolección de la Información 26
10.3.1. Tamaño de la muestra. 26
10.3.2. Método de muestreo 26
10.4. Operacionalización de las Variables 26
10.4.1. Variables de entrada al modelo de simulación (Inputs). 26
10.5. Calculo Probabilístico 27
11. Vinculación, difusión y divulgación 28
12. Resultados 29
12.1. Características físicas y químicas de la ceniza 29
12.1.1. Análisis Mineralógico y geoquímico de la ceniza 29
12.2. Simulaciones de dispersión y caída de ceniza del volcán Santiaguito 32
12.3. Correlación entre Altura de Columna y Deposición 33
12.4. Análisis de Viento 33
12.5. Periodo de Retorno de Erupción Extrema 36
12.5.1. Probabilidad eruptiva. 36
12.5.2. Probabilidad de vientos críticos 37
12.5.3. Periodo de retorno y probabilidad de excedencia 37
12.6. Dispersión y Deposición por Zonas 39
13. Análisis y discusión de resultados 46
13.1. Intensidad del Riesgo 46
13.2. Estimación de vulnerabilidad 47
13.3. Uso del suelo en Quetzaltenango 50
13.3.1. Suelo Urbano 51
13.3.2. Suelo Rural 51

13.3.3. Suelo Forestal 51
13.3.4. Suelo de protección especial 51
14. Conclusiones 58
15. Impacto esperado 59
16. Agradecimientos 59
17. Referencias 59
18. Apéndice 62

Índice de tablas

Tabla 1 *Características generales del volcán Santiaguito* 14
Tabla 2 *Eventos eruptivos importantes del volcán Santiaguito* 14
Tabla 3 *Intensidad de erupción del 2014* 18
Tabla 4 *Variables de entrada en simulaciones* 27
Tabla 5 *Composición química de roca a granel de elementos principales y trazas para cenizas y bombas recolectadas entre 2015 y 2016. Las ubicaciones de muestra incluyen El Caliente (El), campamento VIP ((VC), El Brujo (EB), La Mitad (LM), El Palmar (EP), Monte Bello Farm (MBF), Llano de Pinal (LdP) y OVSAN* 30
Tabla 6 *Resultados de simulación y caída de la ceniza del volcán Santiaguito* 32
Tabla 7 *Presión atmosférica en alturas de columna críticas para el municipio de Quetzaltenango* 34
Tabla 8 *Erupciones registradas con VEI mayor a 3 del volcán Santiaguito* 37
Tabla 9 *Probabilidad de vientos critico en la ciudad de Quetzaltenango a una altura de 4500 msnm* 37
Tabla 10 *Probabilidad total de excedencia de un evento extremo* 38
Tabla 11 *Deposición en mm (milímetros) de columna eruptiva a 4500 y 6500 msnm* 39
Tabla 12 *Concentración en mg/m^3 de columna eruptiva a 4500 y 6500 msnm* 42
Tabla 13 *Carga de nube en T/km^2 de columna eruptiva a 4500 y 6500 msnm* 44
Tabla 14 *Zonas de riesgo* 46

Tabla 15 *Media aproximada de intensidades de amenaza que se relacionan con infraestructura* 48
Tabla 16 *Media aproximada de intensidades de amenaza que se relacionan con tipos genéricos de techo* 49
Tabla 17 *Media aproximada de intensidades de amenaza que se relacionan con niveles de pérdidas de producción para un rango de tipos de agricultura* 50
Tabla 18 *Clasificación de vulnerabilidad en estructuras/viviendas* 53
Tabla 19 *Clasificación de vulnerabilidad en silvicultura y agricultura* 55

Índice de figuras

Figura 1: Mapa de amenaza de caída de ceniza, en el caso de una erupción del Volcán Santa María. 11
Figura 2: Imagen Satelital del Volcán Santiaguito 12
Figura 3: Volcán Santiaguito 14
Figura 4 Comparación de deposición en función de la altura de columna 33
Figura 5 Rosa de viento de superficie isobárica de 400 mb 35
Figura 6 Rosa de viento de superficie isobárica de 500 mb 35
Figura 7 Rosa de viento de superficie isobárica de 600 mb 36
Figura 8 Probabilidad de excedencia de evento de evento eruptivo y meteorológico extremo 38
Figura 9 Esquema de impactos de caída de ceniza relacionando la distancia de un volcán 47
Figura 10 Clasificación de suelo en Quetzaltenango 52

Simulación numérica de la dispersión y caída de ceniza en el Municipio de Quetzaltenango debida al Volcán Santiaguito

1. Resumen

En el occidente de Guatemala, en el departamento de Quetzaltenango se encuentra el complejo Volcánico Santa María-Santiaguito. El Santiaguito se compone de un sistema de cuatro domos que se caracterizan por explosiones verticales que arrojan material en el aire, aunque la mayoría de este material cae directamente en los domos de nuevo, hay un porcentaje que se mueve según los patrones del viento. Actualmente se encuentra activo el domo que se ha llamado “El Caliente” el cual representa una amenaza para los cultivos, la silvicultura y las estructuras de la región occidental, siendo la ciudad de Quetzaltenango la metrópoli más cercana a los efectos del volcán es objeto importante de análisis.

En esta investigación se utiliza el programa ASH3D del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), un modelo euleriano que permite estimar la dispersión y deposición de ceniza volcánica para realizar una valoración de posibles riesgos a cultivos y estructuras en las diferentes zonas del municipio de Quetzaltenango. Donde la vulnerabilidad para la estructura y vivienda resultó, en su mayoría, representado por un riesgo D2, (reparación moderada necesaria), la agricultura D3 (perdida mayor, más del 50% de la producción) y la silvicultura D2 (perdida menor, menos del 50% de la producción), en una escala de D0 a D5 según metodología. Adicionalmente, en esta investigación se presenta la deposición de la ceniza volcánica a una columna eruptiva de 4500 msnm y 6500 msnm.

Palabras clave

Caída de ceniza, Amenaza volcánica, Quetzaltenango, Volcán Santiaguito, ASH3D

2. Abstract

In the western region of Guatemala, in the department of Quetzaltenango is located the Santa María-Santiaguito Volcanic complex. The Santiaguito is made up of a system of four domes that are characterized by vertical explosions that throw material into the air, although most of this material falls directly into the domes again, there is a percentage that moves according to the wind patterns. Currently, the dome that has been called "El Caliente" is active, which represents a threat to crops, forestry, and structures in the western region, being the city of Quetzaltenango the closest metropolis to the effects of the volcano is an important object of analysis.

In this research, the ASH3D program of the United States Geological Survey (USGS) is used, an Eulerian model that allows estimating the dispersion and deposition of volcanic ash to assess possible risks to crops and structures in different areas of the municipality of Quetzaltenango. Where the vulnerability for the structure and housing resulted, for the most part, represented by a risk D2, (moderate repair necessary), agriculture D3 (greater loss, more than 50% of production) and forestry D2 (minor loss, less than 50% of production), on a scale from D0 to D5 according to methodology. Additionally, this research presents the deposition of volcanic ash to an eruptive column of 4500 masl and 6500 masl.

Keywords

Ash fall, Volcanic hazards, Quetzaltenango, Santiaguito Volcano, ASH3D

3. Introducción

Las erupciones volcánicas pueden producir una serie de amenazas que varían ampliamente en espacio, distribución y en los impactos que pueden generar a las sociedades. Fenómenos localizados, como corrientes de densidad piroclásticas y lahares, son las más destructivas y peligrosas (Auker et al., 2013); sin embargo, el peligro volcánico más frecuente, y a menudo extendido, es la caída de ceniza o tephra, que ocurre en más del 90% de todas las erupciones (Newhall & Hoblitt, 2002). La tephra de menor diámetro, que comprende cenizas menores a 2 mm se lanza en columnas eruptivas y se dispersan del volcán por los efectos de los vientos, las partículas de ceniza pueden transportarse cientos o incluso miles de kilómetros de distancia de la fuente cayendo en grandes áreas.

La caída de ceniza es el peligro volcánico con el mayor potencial de afectar directa o indirectamente al mayor número de personas en todo el mundo (Simkin et al., 2001, Witham, 2005), estas pueden alterar los servicios de infraestructura, dañar edificios y dañar o interrumpir la producción agrícola y otras actividades económicas (Wilson et al., 2012). Los impactos pueden ser de larga duración, ya sea porque las erupciones pueden ser de larga duración o porque las cenizas pueden ser transportadas por el viento, el agua o las actividades humanas. Dados estos efectos el tener un sistema para prevenir los efectos se hace necesario.

El análisis de riesgo hace posible disminuir las pérdidas en infraestructura y cultivos que pueda tener una ciudad debido a los efectos de la ceniza. Los sistemas de modelación hacen posible contar con las herramientas necesarias para la toma de decisiones y prevenir las pérdidas por el riesgo. El complejo volcánico Santiaguito- Santa María representan un riesgo para la ciudad de Quetzaltenango, por tal motivo, esta investigación se centra en simular la dispersión y caída de la ceniza volcánica a través del software ASH3D, un modelo euleriano que provee un alto nivel de confiabilidad utilizando la metodología de Suzuki (1983) para modelar la difusión vertical. La simulación se centró en la dispersión y caída de ceniza proveniente del volcán Santiaguito en el municipio de Quetzaltenango con el fin de generar mapas de vulnerabilidad en el área de agricultura, silvicultura e infraestructura por zonas en el municipio, ya que estos tres parámetros representan un impacto directo en la economía del sector. La modelación toma como base una columna eruptiva de 4500 msnm con el fin de determinar las zonas expuestas a pérdidas económicas y por ende al desarrollo a resistir los efectos de un peligro natural como el riesgo volcánico.

4. Planteamiento del Problema

Problema

Los diferentes focos eruptivos que forman el volcán Santiaguito cuando presentan actividad volcánica expulsan ceniza que cubre al municipio de Quetzaltenango y aledaños, generando daños a la vegetación, contaminación de fuentes de agua, problemas respiratorios, colapso de techos y obstaculización de la locomoción (en tierra y aire), sin embargo no se cuenta con un modelo de amenaza de la dispersión de ceniza en el municipio con el fin de analizar y mitigar los impactos de salud y generación de efectos meteorológicos adversos de forma compuesta.

Descripción del problema

Se le conoce como volcán Santiaguito a la serie de domos que han crecido y siguen desarrollándose al costado del volcán Santa María, el cual está formado por cuatro domos: Brujo, Monje, La Mitad y Caliente, el cual es actualmente el centro de erupción.

Las explosiones verticales del Volcán Santiaguito, generalmente de 1 a 4 por hora, expulsan gases y ceniza desde 300 a 1,500 m hacia la atmósfera y en erupciones violentas han alcanzado 5,000 m por encima del cráter. La ceniza producto de las explosiones frecuentemente cae sobre el complejo de domos y varios kilómetros de acuerdo al patrón de vientos estacional y en las erupciones violentas ha caído ceniza de grano muy fino en el occidente del país, ceniza que puede provocar daños a los sistemas respiratorios de la población (Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2017) o fenómenos meteorológicos complejos e indeseables como las lluvias acidas que pueden provocar daños a las viviendas o agricultura.

Entre 2001 y 2003 el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) en colaboración con la cooperación japonesa (JICA) generaron mapas de amenaza volcánica para el complejo volcánico Santa María-Santiaguito, en el que identificaron las zonas con amenaza de caída de ceniza, expulsión de bloques, flujos piroclásticos y lahares. En estos mapas se pueden observar las poblaciones que se encuentran dentro de áreas susceptibles a cualquiera de los fenómenos enumerados anteriormente. Sin embargo, los mapas de amenaza solo muestran el escenario más crítico en el que el Volcán Santa María sufre una erupción o destrucción parcial de su cono, y no existe evidencia de que se hayan estudiado las erupciones grandes que ya han lanzado ceniza al casco urbano de Quetzaltenango como los eventos del 14 de mayo de 2016 (Miranda, 2016) y del 25 de septiembre del 2016 (Ventura, 2016).

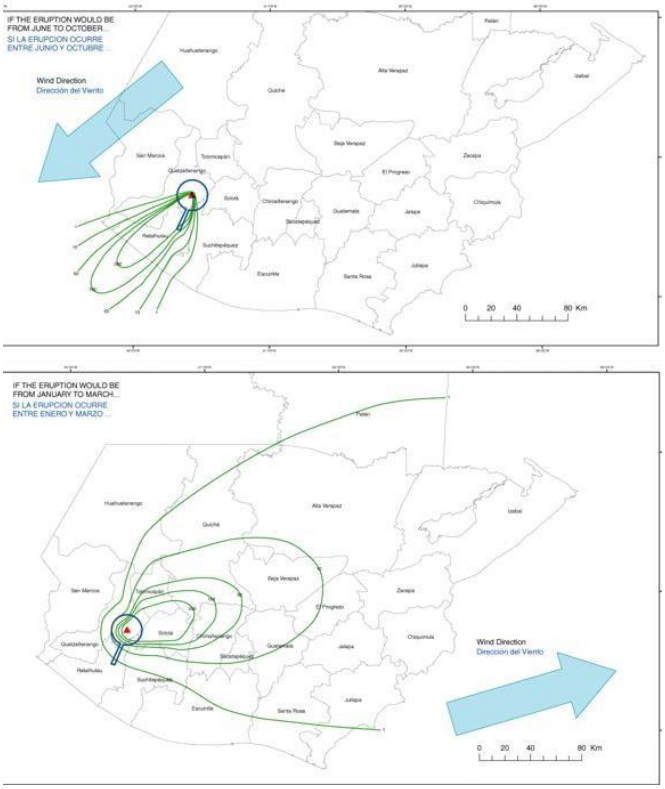


Figura 1: Mapa de amenaza de caída de ceniza, en el caso de una erupción del Volcán Santa María.
Fuente: INSIVUMEH

5. Preguntas de Investigación

¿Cuál es el área teórica a la que llegaría la ceniza proveniente de la erupción del volcán Santiaguito?

Al desarrollar el trabajo de investigación, surgen algunas preguntas auxiliares como:

- ¿Cuáles son las características físicas de la ceniza?
- ¿Cuáles son los distintos escenarios de dispersión para distintas magnitudes de erupción bajo diferentes condiciones atmosféricas?
- ¿En qué temporadas del año la dispersión de ceniza impactaría en mayor magnitud al municipio de Quetzaltenango y cuáles áreas serían las más afectadas?

6. Delimitación en Tiempo y Espacio

6.1. Delimitación en Tiempo

La investigación se llevó a cabo de febrero a octubre de 2020.

Para la realización de las actividades se designaron tres fases las cuales son:

1. Fase Recolección de Datos. (de febrero a abril 2020)
2. Fase Simulación. (de mayo a septiembre 2020)
3. Fase de difusión y divulgación (octubre 2020)

6.2. Delimitación Espacial

El área de investigación se concentrará a analizar el municipio de Quetzaltenango.

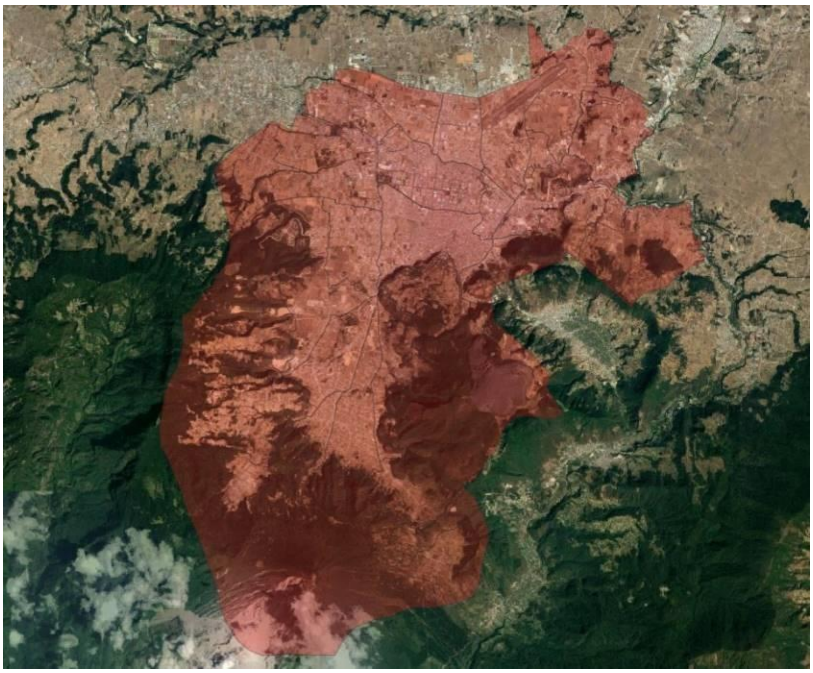


Figura 2: Imagen Satelital del Volcán Santiaguito
Fuente: QGis. 14º44´33´´ N, 91º34´13´´ W.
Editada por el autor

7. Marco Teórico

7.1. Actividad Volcánica de Guatemala

El territorio nacional cuenta con 33 volcanes, alineados en el cinturón de fuego, que inician con el volcán Tacaná, localizado entre los límites de las repúblicas de México y Guatemala, y finalizan con el volcán Chingo, entre las repúblicas de Guatemala y El Salvador. Además, la ubicación de 324 focos eruptivos localizados a lo largo de la cadena volcánica (Ramírez, 2012) de estos focos eruptivos 11 han tenido eventos de actividad histórica y 3 son los más activos siendo estos: Pacaya, Fuego, Santiaguito y 1 con una actividad fumarólica, Tacaná.

Las erupciones volcánicas que han afectado a las poblaciones cercanas a volcanes activos. Las más recientes ocurridas en 1998 y 2010 la erupción del Volcán de Pacaya; 2003, 2004 y 2018 erupción del Volcán de Fuego y 2010 erupción volcán Santiaguito. En su período de erupción estos volcanes lanzaron ceniza que alcanzó varios kilómetros siendo los principales sectores afectados la agricultura, ganadería y la navegación aérea. (Instituto Nacional de Sismología, 2018).

7.2. Volcán Santiaguito

El complejo volcánico Santa María-Santiaguito, forma parte de la cadena volcánica cuaternaria de Guatemala que cruza el país paralelo a la planicie costera del Pacifico. Se estima que Santa María ha mantenido actividad durante los últimos 28,000 años y después de miles de años de reposo, despertó repentinamente con una violenta erupción en el año 1,902 que arrojó 20 km^3, dejando un extenso cráter en donde desde 1,922 hasta el momento han crecido cuatro domos que en conjunto son llamados Santiaguito. (INSIVUMEH, 2018)

EI Volcán Santiaguito está formando de cuatro domos de lava con orientación preferentemente este-oeste que han surgido desde 1,922 del interior del cráter de la erupción de 1,902 del Santa María. Los domos tienen crecimiento endógeno y exógeno en cráteres laterales y extrusión de flujos de lava, presentando morfología de empinadas capas o espinas de lava, lo que dificulta el ascenso a este tipo de estructuras volcánicas.

Los domos del Volcán Santiaguito reciben los nombres de: Caliente, La Mitad, El Monje y El Brujo, mencionados en el orden de su nacimiento, migrando la actividad en ellos, en la actualidad el Domo Caliente es el foco eruptivo activo. Las explosiones verticales del Volcán Santiaguito expulsan gases y ceniza desde 300 a 1,500 m hacia la atmósfera (INSIVUMEH, 2018).

Figura 3: Volcán Santiaguito
Fuente: Sección de vulcanología del INSIVUMEH.

7.2.1. Características generales del volcán Santiaguito.

De acuerdo a los datos provistos por el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH, las características generales del volcán se describen en la siguiente tabla:

Tabla 1
Características generales del volcán Santiaguito

Tipo de actividad	Peleana
Morfología	Complejo de domos dacíticos
Localización geográfica	14 °44’ 33″ Latitud N; 91°34’13″ Longitud W
Altura	2500 msnm

Fuente: INSIVUMEH (2020)

7.2.2. Erupciones críticas del volcán Santiaguito.

La erupción más crítica que se ha registrado en el volcán Santiaguito, desde 1980 a la fecha se generó el 09 de mayo 2014 y duró 7 horas, sin embargo, se detalla eventos importantes en la siguiente tabla:

Tabla 2
Eventos eruptivos importantes del volcán Santiaguito

1986	Mayo: Inicia extrusión de una colada de lava por el cráter en forma de herradura de caballo en el domo Caliente.
1989	13 y 19 de julio: Fuertes explosiones provocan el colapso de la mitad este del cráter

	del domo Caliente y oleadas piroclásticas barren el bosque hasta 4 km al SE. El segundo evento piroclástico, calcina parcialmente a 4 montañistas que evaluaban los efectos de devastación de la primera erupción.
	Agosto: Tres explosiones levantan columnas de ceniza a 5 km por encima del cráter, neblina de ceniza se percibe en El Palmar y se establece caída de ceniza muy fina en Chiantla y Huehuetenango.
1990	Abril-noviembre: Veinte explosiones expulsan columnas de ceniza a 4-5 km por encima del cráter del domo Caliente y flujos piroclásticos descienden 5 a 6 km restringidos a la barranca del nacimiento del río Nimá II. Las explosiones suceden de 2 hasta 28 días de intervalo.
1992	Febrero: Viento variable provoca caída de ceniza en Quetzaltenango, Zunil, Santa María de Jesús y San Miguel Calaguaché, producto de explosiones con columnas de ceniza de 2.5 km de altura.
1999	Junio: Inicia con repetidos colapsos y flujos piroclásticos, la extrusión de una colada de lava desde la cúpula del cráter del domo Caliente que con pulsos de bajo y alto volumen de extrusión, forma renovadas coladas que sobrepuestas y en promontorios se depositan a lo largo de 4 km en la barranca cabecera del río Nimá II.
2001	19 de marzo: Serie de flujos de material fino desde el borde S de la cúpula de lava del domo Caliente, bajan de las 13.35 a 17.15 horas hasta la zanja SE. Reportan leve caída de ceniza en San Felipe Retalhuleu. 29 de abril: Diez colapsos de las 8:22 a 8:57 horas forman una nube de ceniza en forma de hongo de 3 km de ancho por 1 km de altura. Viento S y SE provoca leve caída de ceniza en Llanos del Pinal y Quetzaltenango.
2002	14 de marzo: Colapso parcial de la colada de lava en la parte media del flanco SW del domo Caliente, deja un canal de 5 m de hondo por 7 m de ancho. 19-20-29 de abril y mayo: Colapsos del frente de la colada de lava, levantan nubes de ceniza de 300 y 800 m de altura. 16 de agosto: Colapso de un bloque del borde S de la cúpula cratérica del domo Caliente, genera flujo piroclástico que levanta gruesa nube de ceniza, cubre todo el complejo de domos durante 30 minutos.
2003	2, 15 y 24 de mayo: Colapsos en el contorno de la cúpula de lava cratérica y flujos piroclásticos preceden a la extrusión de cortas coladas de lava en los bordes S, SW, E y NE. Caída de finas partículas de ceniza forman velos de color blanquecino sobre el

	follaje de la vegetación hasta 10 km del SE al SW del Santiaguito.
	3 de septiembre: Colapso del borde sur del cráter del domo Caliente, deja un acantilado de 30 m de alto y 20 m de ancho y un canal de 7 m de ancho por 5 de hondo a lo largo del flanco sur. Bloques de ≤2 m de diámetro quedan dispersos en la parte baja del canal. La nube de ceniza coignimbritica deja una película blanquecina a varias decenas de metros a los costados y a 3.5 km de la parte distal del flujo piroclástico, otro evento similar, ocurre el 24 de septiembre.
	6 de octubre: 38 colapsos durante 50 minutos a las 20:22 horas, generan secuencia de flujos piroclásticos cuyas nubes ignimbriticas calcina la vegetación del Mirador El Palmar.
	7, 8 y 10 de octubre: Pulsos de extrusión de lava producen flujos piroclásticos de 5 km de longitud canalizado en la cabecera de la barranca del río Nimá II. Depositan 3-5 cm de espesor de ceniza a 200 m a los costados de la barranca y 2 km de longitud. Las nubes de ceniza coignimbritica calcinan 28,600 matas de café en crecimiento lo cual ocasiona muchas pérdidas económicas.
	24 de noviembre: A las 7:45 horas una secuencia de 5 explosiones a intervalo de 1 minuto forma columna de gases y ceniza 2 km por encima del cráter. Partículas muy finas de ceniza caen 12 km al sur a inmediaciones del Viejo Palmar.
2004	8 de octubre: Colapsos de bloques desde el borde sur-suroeste de la cúpula del domo Caliente. Forma extensos flujos piroclásticos alcanzando a depositar abundante piroclástos en la cabecera de la barranca San Isidro y depósitos de nubes de cenizas ignimbritica en toda la cobertura vegetal hasta unos 6 km al sur del volcán.
2005	25 de febrero: Pulso de extrusión de lava con colapsos del borde sur-suroeste de la cúpula del cráter del domo Caliente y flujos piroclásticos por el flanco este y suroeste. Registro de tremor volcánico entre las 12.15 y 13:15 horas, anteceden a dos pulsos con explosiones débiles y moderadas y provocan leve caída de partículas de grano medio-grueso a inmediaciones del Observatorio Vulcanológico de Santiaguito (OVSAN). Inicia flujo de lava en la parte oeste del domo.
	Octubre: colapso de la parte sur del domo, destruye ¼ de caballería, en San Andrés el Faro.
2010	26 de abril: Erupción violenta, una de las más grandes de Santiaguito en tiempos recientes, teniendo eventos sísmicos premonitores por más de 3 horas antes, Esta erupción se dio a las 06:50 horas, e inicio con un colapso del frente de lava apilada desde la cúpula suroeste del cráter, generando un sismo con una Magnitud 4.3 Richter

	sensible en toda el área de Quetzaltenango. La erupción duro 5 horas, además del primer evento se dieron otros 3 colapsos más, acompañados de igual número de sismos sensibles. Los flujos piroclásticos generados durante la erupción se desplazaron a 3 kilómetros dentro de la barranca de río Nimá II, quemando vegetación. Las columnas de ceniza se elevaron 4 kilómetros y cubriendo totalmente el complejo de domos, permaneciendo nublado por casi 8 horas, la columna expulsada se movió 15 kilómetros en dirección norte, luego se movió 50 kilómetros al sur llegando cerca de la costa. Como producto de la erupción, causo alarma en Quetzaltenango donde la ceniza alcanzo 2 a 3 mm de espesor en algunas partes: la ceniza en suspensión causo inconvenientes por lo se cerraron escuelas por 2 días de la zona.
	30 de abril: Inicia flujo de lava al noreste del domo.
	Junio a Diciembre: Se mantuvo una actividad explosiva, abundante extrusión de lava, que generaron constantemente flujos Piroclásticos.
	21 de noviembre: Se generan colapsos del domo acompañado de flujos piroclásticos débiles y moderados que levantan columnas gruesas de ceniza a 3,500 msnm.
2012	28-30 de noviembre: Erupción generada por colapso (rompimiento) del borde sur del cráter del Cono Caliente, genera serie de flujos piroclásticos fuertes que levantan columnas de ceniza gris a más de 6,000 msnm que se desplazan a más de 70 kilómetros al sur y suroeste, causando obscuridad en la zona cercana al volcán, cubriendo de ceniza las ciudades de Retalhuleu, Champerico, Coatepeque y Ocos.
2013	6 de agosto: Desde las 08:15 hrs el volcán entra en una fase de erupción, generando explosiones fuertes, con columnas de ceniza a 4,000 y 4,500 msnm, acompañadas de flujos piroclásticos que avanzan en el flanco sur, caída de ceniza dispersa en los departamentos de Quetzaltenango y San Marcos.
2014	09 de mayo: A las 08:30 hrs el volcán Santiaguito tuvo una erupción explosiva, un colapso de la parte este del domo caliente genero una serie de flujos piroclásticos que descendieron por el río Nimá I en un periodo de 7 a 8 horas, alcanzando una distancia de ± 7.4 Km desde la cúpula del domo Caliente, llegando a cercanías de la finca El Faro. El volumen de depósitos de los flujos piroclásticos es ± 4,631,493.024 m^3, siendo uno de los flujos más extensos que ha generado el Santiaguito, superando el alcance a los generados por las erupciones de 1,989 y 1,990, siendo los más extensos desde la erupción de 1,929. A partir de la erupción inicia flujo de lava en la parte sureste.

	06 y 08 de febrero: La actividad del Santiaguito es inestable y se generan una seria de flujos piroclásticos en menos de dos días, nuevamente por un rompimiento lateral del domo Caliente, se reportó caída fina de ceniza en Quetzaltenango.
2016	02-04 de abril: Una serie de explosiones moderadas y fuertes generaron 4 flujos piroclásticos que descendieron 3 Km en el flanco sur del volcán Santiaguito, estos levantaron columnas de ceniza a más de 4,000 msnm. La cena se desplazó al oeste y suroeste, llegando hasta Mérida, Yucacatán.

Fuente: INSIVUMEH

El 09 de mayo del 2014 el volcán Santiaguito registró su erupción más grande desde 1980, en la siguiente tabla se describe las características de la erupción.

Tabla 3
Intensidad de erupción del 2014

	Intensidad			
Proceso Eruptivo	Distancia del impacto (km desde el centro de emisión)	Volumen (m^3)	Espesor	Índice de Explosividad (VEI)
Flujos Piroclásticos	7.4 km (Media)	4,631,493.024	~ 30 m	3 (Media)

Fuente: INSIVUMEH

7.3. Ceniza Volcánica y Fenómeno de Dispersión

La ceniza se compone de finas partículas de roca volcánica fragmentada (de menos de 2 mm de diámetro), es áspera, abrasiva (puede desgastar las superficies al limpiarlas frotando o cepillando), algunas veces corrosiva e irritante (esta contiene sílice, y puede contener gases ácidos y metales tóxicos) es por eso por lo que debe evitarse su aspiración e ingesta. El color puede ir desde un tono gris claro hasta el negro, y pueden variar en tamaño. Es insoluble en agua, por ser tan fino el viento lo desplaza fácilmente y lo distribuye en una gran área.

7.3.1. Dispersión de ceniza.

Investigaciones como las de Brown C. y Durant (2011), indican que un volcán genera tephra y ceniza desde una fragmentación que se produce por una rápida

descompresión del magma, lo que causa una columna eruptiva de mezcla de gases líticos y piroclastos que son colocados en la atmósfera y dispersados según las condiciones de esta.

Varios científicos (Sparks, y otros, 1997) explican el fenómeno de la propagación y dispersión de ceniza dentro de la atmósfera, que resulta de la interacción con el movimiento atmosférico y las variables que se incluyen en la estratificación, a medida que la columna de ceniza sube de manera vertical, y también según el desplazamiento en el eje horizontal; el comportamiento de la ceniza en la atmósfera depende de los movimientos y variables atmosféricas durante su elevación.

7.4. Métodos de Simulación

7.4.1. Modelo euleriano tridimensional para transporte atmosférico de tefra y deposición

El programa Ash3D, diseñado por el servicio geológico de Estados Unidos (USGS), es un modelo euleriano de volumen finito que calcula el transporte de tefra dividiendo la atmósfera en celdas tridimensional, al inicio de una erupción simulada, la tefra es inyectada a una velocidad constante en las celdas ubicadas sobre el volcán, posteriormente se utiliza un campo numérico tridimensional de viento importado de un pronosticador de clima, la advección y difusión de la ceniza es calculada numéricamente con una velocidad de difusión determinada por la difusividad previamente indicada, la ceniza caen a una velocidad determinada por la velocidad de asentamiento determinada por su tamaño, densidad y forma y posteriormente depositadas cuando tocan la superficie del suelo.

Ash3d también calcula la difusión turbulenta usando la formulación Crank-Nicolson con una difusividad constante o variable. La difusividad tiene se ha ajustado en estudios de modelos para que coincida con la tasa observada de ensanchamiento a favor del viento de un depósito o nube de ceniza, con diferentes valores requeridos para coincidir con diferentes observaciones (Bonadonna et al., 2005; Folch y col., 2009). La versión estándar de Ash3d coloca tephra en una columna de nodos fuente sobre el volcán y la distribuye verticalmente usando una fórmula (Suzuki, 1983) diseñada para concentrar masa cerca de la parte superior de la pluma. (Mastin, Eaton, & Lowenstern, 2014)

7.4.1.1. Condiciones iniciales

El programa no calcula la dinámica de ascenso de la fumarola, en lugar de esto se inyecta directamente la columna de ceniza en las celdas superiores al volcán, se puede especificar que la ceniza se concentre en una celda unitaria, distribuida a lo largo de la columna o distribuida verticalmente siguiendo la ecuación de Suzuki (Suzuki, 1983)

$$\frac{dQ_m}{dz} = \frac{k^2\left(\frac{1-z}{H}\right)e^{k\left(\frac{z}{H-1}\right)}}{H[1-(1+k)e^{-k}]}$$

Donde:

Q_m = masa total de el material expulsado en cierto intervalo de tiempo de cierto tamaño

H = altura total de la columna

z = elevacion en la columna

k = constante ajustable que controla la distribucion de ceniza con altura

Durante una erupción, Ash3d inyecta tefra a las celdas a una velocidad constante, la distribución del tamaño de grano insertado en cada celda de la columna es la misma a cada elevación y para cada pulso eruptivo.

7.4.1.2. Transporte

Se resuelve la conservación para la conservación de masa en cada celda rastreando la concentración de masa *q* en un tiempo *t*

Ecuación de Advección-Difusión

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \nabla\left((\mathbf{u}+\mathbf{v}_s)q\right) - \nabla(k\nabla q) = Q$$

Donde:

u = Vector 3D de viento

v_s = Velocidad de asentamiento

k = Diffusividad

Q = Termino de fuente, no es cero los nodos de la columna sobre el volcan

El programa por defecto utiliza las ecuaciones de Wilson y Huang (Wilson & Huang, 1979) para calcular la velocidad de asentamiento de partículas no esféricas.

Para calcular el segundo término de la ecuación se utiliza el método explícito de donación de celdas en contra viento (Schwaiger, Denlinger, & Mastin, 2012)

El término de la difusión es calculado implícitamente al final de cada paso, puede ser variable según el espacio y puede ser una función de las condiciones meteorológicas locales, se ha observado que el modelo de Ash3d tiene correlación con las observaciones cuando $K = 0$ y se tiene un valor fijado para este valor como dato inicial.

Velocidad de asentamiento

Wilson y Huang (Wilson & Huang, 1979) proponen una serie de ecuaciones para calcular la velocidad de asentamiento, las ecuación fueron calculadas a nivel del mar para 215 partículas de ceniza volcánica con una media de diámetros entre 38 y >500μm, se calculó el coeficiente de arrastre de las partículas en función del número de Reynolds, se determinó que le coeficiente de arrastre es una función del número de Reynolds y la forma de las partículas, se encontró el diámetro promedio de las partículas dado por la siguiente ecuación:

$$d_a = \frac{a + b + c}{3}$$

Obteniendo el diámetro medio de las partículas, es posible estimar el número de Reynolds y coeficiente de arrastre en función del diámetro tal como se indica en las siguientes ecuaciones:

$$R_a = d_a T \rho \eta$$

$$C_a = \frac{4 d_a \sigma g}{3 \rho T^2}$$

Posteriormente la forma de la partícula fue caracterizada por el parámetro F dado por la siguiente ecuación.

$$F = \frac{b + c}{2a}$$

Finalmente es posible expresar el coeficiente de arrastre C_a como una simple función dependiente de R_a y F .

$$C_a = \frac{24}{R_a} F^{-0.828} + 2\sqrt{1.07 - F}$$

7.4.1.3. Deposición

El programa sigue la trayectoria de la ceniza a lo largo de las celdas y la acumula al detectar que se ha llegado a la frontera que representa el suelo en una locación particular.

8. Estado del arte

8.1. Domos Activos en Volcán Santiaguito.

EL domo que ha sido considerado hasta ahora Activo, se denomina El Caliente. El resto de los domos tales como La Mitad, El Monje y el Brujo hasta ahora no han presentado una actividad explosiva. Los cambios en el comportamiento eruptivo en el domo de lava activo se han caracterizado por variaciones en la tasa de descarga de ceniza y flujos piro clásticos que han descendido en los alrededores del volcán Santiaguito generando una dispersión de ceniza hacia todas las comunidades aledañas, así como zonas cultivadas y zonas boscosas.

8.2. Representación de la Dispersión de Ceniza del Volcán Santiaguito.

El Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) ha informado la representación o descripción sobre la dispersión de ceniza volcánica en sus alrededores indicando las magnitudes de tiempo de erupción, distancias alcanzadas, volumen de flujos piro clástico en promedio que se han generado debidas al Volcán Santiaguito.

El Volcán Santiaguito en promedio realiza erupciones explosivas que tienen una duración de siente a ocho horas alcanzando distancias aproximadamente de 7.4 kilómetros siendo el domo El Caliente el cono volcánico activo hasta ahora. El volumen de los depósitos de flujos piro clásticos ha sido estimado regularmente en cada erupción que realiza el volcán en una magnitud de 4, 631,493.024 metros cúbicos ocasionando columnas eruptivas de gran magnitud.

8.3. Riegos Principales debidos al Volcán Santiaguito

Los riegos principales debidos al volcán Santiaguito que ha generado principalmente se describen a continuación:

- Lahares.
- Colapso, rotura de sus domos.
- Flujos Piroclasticos.
- Caída de Ceniza.
- Flujos de lavas en bloques.
- Desprendimiento de rocas.

8.4. Análisis de Flujos Piroclásticos en el Volcán Santiaguito.

El volcán Santiaguito genera una dispersión de cenizas, el desmoronamiento de diques y frentes de los flujos de lava silícica que también provocan avalanchas de rocas calientes y cenizas. Estos proporcionan una fuente continua de material no consolidado que luego se puede lavar mediante la caída de lluvia, al mismo tiempo también el clima influye ya que cuando existen lluvias estas comúnmente desmovilizan estos depósitos y generan inundaciones y lahares. (Bluth, 2004) (Calder, Lavallee, & Kendrick, 2015) (Anderson & Fink, 2017)

8.5. Corrientes de Densidad Piro clástica.

Las corrientes de densidad piro clásticas en el volcán Santiaguito han sido principalmente debidas al domo El Caliente con distancias de salida de hasta 3 kilómetros. La mayoría de las corrientes de densidad piro clásticas han sido resultados del colapso parcial de la columna eruptiva durante del volcán durante eventos explosivos.

8.6. Lahares.

Los depósitos de Corrientes de densidad piro clásticas y la explosiones que se han dado debidas al domo El Caliente han proporcionado un gran suministro de sedimentos a los sistemas fluviales alrededor del volcán Santiaguito. La movilización del material volcánico en las temporadas de lluvia desencadena lahares y degradación. La actividad lahar afecta típicamente a un sistema fluvial que se extiende hasta 60 kilómetros a sus alrededores siendo zonas densamente pobladas y cultivadas. El INSIVUMEH ha informado que los lahares principales descendían de las barrancas (valles empinados) al Sur-Oeste del volcán Santiaguito.

8.7. Desprendimiento de Rocas.

Los desprendimientos de rocas se han registrado durante los últimos cinco años en base al INSIVUMEH. Se identificaron tres fuentes de desprendimiento de rocas alrededor del volcán Santiaguito en las cercanías del domo El Caliente. Estos desprendimientos de rocas se han generado debido a la actividad consecutiva del volcán Santiaguito ocasionando un aumento considerable en el diámetro del cono eruptivo. El material que se ha desprendido ha descendido por las zonas del volcán que presentan pendientes muy altas generando riesgo mínimo en los alrededores del volcán. Se debe de destacar que estos desprendimientos han sido de magnitud mínima, pero con la constante actividad del domo El Caliente el aumento en el desprendimiento de rocas seguirá en incremento al transcurrir el tiempo.

8.8. Flujos de lava del Volcán Santiaguito

El volcán Santiaguito, ubicado en el Occidente de Guatemala, en el departamento de Quetzaltenango, municipio de Quetzaltenango contiene una gran variedad de estructuras proximales (como ejemplo espinas) de las cuales se originan una serie de flujos de lava estructuralmente constantes. Los flujos de lava característicos del volcán Santiaguito (flujos vesiculares) tienen un cierto tipo de porosidad en un nivel alto con poros esferoidales interconectados que pueden pasar a flujos de lava en bloques. Los flujos de lava en bloques son de gran volumen y textura variable con zonas densas de pequeñas redes de poros alineados tubulares y zonas más porosas de poros de forma esferoidal. Las espinas son densas y de bajo volumen que contienen pequeños poros en forma de esqueleto y zonas sub-verticales de poros sigmoidales. La tasa de efusión y la duración de la erupción definen la cantidad de tiempo disponible para calentar o enfriar, desgasificar y desgasificar antes y durante la extrusión, provocando cambios en las texturas de los poros y el tipo de lava.

La morfología y texturas de la lava, así como la superficie forman en respuesta a la tasa de efusión, cristalinidad, composición y procesos de fragmentación. En el caso del Volcán Santiaguito, debido a que es un volcán de cúpula, el contenido volátil, las burbujas se consideran particularmente importantes, ya que el sistema a menudo se encuentra en el límite entre comportamiento explosivo y efusivo. La actividad extrusiva en el Volcán Santiaguito ha estado marcada por eventos explosivos que han dado lugar a columnas de cenizas y gas volcánico y ocasionalmente corrientes de densidad piroclástico. EL respiradero El Caliente es el único sitio que ha estado continuamente activo desde el año 1,992. Los otros tres domos están en su mayoría inactivos. El Caliente ha sido denominado el respiradero principal ya que ha permanecido activo con intensa actividad fumarolica durante el crecimiento de los respiraderos laterales y ha sido el único centro de actividad volcánica. Los tipos de extrusión en el volcán Santiaguito se han clasificado en función de la velocidad de extrusión y se han realizado clasificaciones de lava según su textura y morfología.

9. Objetivos

9.1. Objetivo General.

Simular numéricamente el escenario de dispersión y caída de ceniza proveniente del volcán Santiaguito en el municipio de Quetzaltenango, basándose en registros históricos.

9.2. Objetivos Específicos

- Determinar las características físicas de la ceniza expulsada por el volcán Santiaguito.
- Simular por medio de un modelo numérico computacional, distintos escenarios de erupción, basados en los registros históricos.
- Generar un mapa de zonificación según distintos escenarios, para los análisis de impacto correspondientes en diferente temporalidad.

10. Materiales y métodos

10.1. Enfoque y tipo de Investigación

El enfoque de la investigación fue cuantitativo, ya que la información utilizada en la simulación se obtuvo directamente de medidas estadísticas de datos meteorológicos y vulcanológicos los cuales arrojan valores numéricos que alimentan la modelación matemática.

10.2. Técnicas e Instrumentos

De manera inicial se realizó una revisión bibliográfica a detalle, en la cual se recopilaron datos de caracterización previa de todos los componentes vulcanológicos del volcán Santiaguito (Granulometría de la ceniza, altura de columna eruptiva).

Para la realización del análisis de datos meteorológicos se utilizó el programa MATLAB, el cual permitió extraer la base de datos de la oficina nacional de administración oceánica y atmosférica (“NOAA” por sus siglas en ingles), la cual contiene vectores de viento a diferentes superficies isobáricas, las cuales requirieron un procesamiento previo para posteriormente encontrar componentes vectoriales.

Para realizar la simulación se utilizó la herramienta ASH3d del Servicio Geológico de Estados Unidos (“USGS” por sus siglas en Ingles), el cual realiza una simulación mediante elementos finitos y un modelo euleriano para el transporte atmosférico y

deposición de tefra, el cual se debe alimentar con los datos vulcanológicos y meteorológicos.

La información que el modelo proporcione será plasmada de la manera más homogénea y gráfica empleando mapas generados en el software QGIS, en el cual se puede observar de manera zonificada, el impacto de la deposición de tefra a cierto periodo de retorno tomando en cuenta erupciones críticas.

10.3. Recolección de la Información

10.3.1. Tamaño de la muestra.

Las variables de entrada al modelo de simulación consisten en, altura de columna, fecha y horade simulación, altura de columna y volumen eruptivo, por lo cual se tomará una muestra de 10 simulación con una o más variables de entrada críticas para poder inferir el impacto máximo en el periodo de retorno de dicho evento.

10.3.2. Método de muestreo

El muestreo se realizó de manera analítica mas no probabilística, esto debido a que el modelo es sensible a pequeños cambios en las variables ingreso, por lo tanto, se requirió encontrar periodos de simulación en las que las propiedades eruptivas y meteorológicas maximizaran el impacto en el municipio estudiado.

10.4. Operacionalización de las Variables

10.4.1. Variables de entrada al modelo de simulación (Inputs).

10.4.1.1. Altura de columna.

Para la elección de la altura de columna eruptiva se utilizaron los datos proporcionados por el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH. Se realizaron simulaciones con alturas de columnas extremas a 4500 y 6500 msnm.

10.4.1.2. Volumen eruptivo

Se seleccionó el volumen eruptivo en base al tipo de erupción y el volumen eruptivo de la erupción del volcán Santiaguito en el 2014 para la obtención de resultados significativos para el periodo de diseño.

10.4.1.3. Duración de erupción

Para la elección de la duración de la erupción volcánica se seleccionó tomando en cuenta la duración de erupciones criticas proporcionadas por el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH, asimismo de acuerdo al Índice de Explosividad Volcánica, VEI, de la erupción estudiada.

Tabla 4
Variables de entrada en simulaciones

Input	Derivación	Valor	Fuente
VEI	Erupción máxima en 40 años y criterios de VEI asignados al tipo de volcán (Domo de lava)	3	INSIVUMEH
Volumen Eruptivo	Valor en el rango de erupciones del VEI asignado y erupción máxima en 40 años	4,631,493.024 m3	INSIVUMEH
Altura de columna	Alturas extremas de columnas eruptivas registradas en los últimos 40 años	4.5-6.5 kmsnm	INSIVUMEH
Duración de erupción	Erupciones críticas en los últimos 40 años	7 horas	INSIVUMEH
Condiciones de viento	Las velocidades y direcciones de viento son calculadas automáticamente por el programa ASH3D en base a la base de datos de NCPAR		ASH3D
Fecha y hora de simulación	Eventos meteorológicos con vientos críticos conocidos (tormentas tropicales, huracanes) y caídas de cenizas históricas en Quetzaltenango		INSIVUMEH

Fuente: Elaboración propia

10.5. Calculo Probabilístico

Para calcular la probabilidad del evento extremo simulado se considera la probabilidad de ocurrencia de tres eventos independientes, la ocurrencia de erupción, la ocurrencia de una erupción con VEI, índice de explosividad volcánica, igual o mayor a 3 y viento en la dirección crítica. Cada de uno de estos eventos se manejan de como eventos

independientes, utilizando la formula general para la probabilidad de eventos independientes.

$$P(A \cup B \cup C) = P(A) * P(B) * P(C)$$

Donde se asigna una probabilidad anual a cada evento independiente en función de los registros de la ocurrencia de dicho evento.

11. Vinculación, difusión y divulgación

A nivel interno de la Universidad de San Carlos, se motivará a la generación de conocimiento y modelación de amenazas volcánicas con la Dirección General del Sistema de Investigación (DICUNOC), el Instituto de Investigaciones de la División de Ciencias de la Ingeniería y docentes investigadores de otras carreras que estén interesados en el tema de la gestión integral de riesgo de desastres.

En lo que respecta las Organizaciones Gubernamentales en donde se efectuaron cooperaciones de doble vía se encuentran e CONRED, el INSIVUMEH, principalmente el observatorio del volcán Santiaguito; instituciones en las cuales se presentarán los resultados y se expresará la disposición de colaboración en proyectos similares en la temática de amenazas de origen volcánicos.

En términos de difusión, el informe impreso se distribuirá en las entidades mencionadas anteriormente y la versión digital se publicará en la biblioteca general de la DIGI, así como en los medios digitales de DICUNOC. Asimismo, se ingresará el manuscrito correspondiente para su publicación en una revista científica indexada de libre acceso, y luego compartir dicho artículo publicado en los medios digitales del DICUNOC y la página institucional de las División de Ciencias de la Ingeniería.

Para su divulgación, está proyectada la realización de un webinar en el mes de noviembre con el fin de dar a conocer los resultados de la investigación a la comunidad universitaria; así como la participación en las actividades de divulgación planificadas por la DIGI.

12. Resultados

12.1. Características físicas y químicas de la ceniza

12.1.1. Análisis Mineralógico y geoquímico de la ceniza

La metodología que utilizaron A.Wallace, D.Lamb, & Angelisa (2019) establece qe se puede cuantificar los datos de mineralogía y las abundancias de fase se pueden utilizando QEM-SCAN, un sistema automatizado SEM-EDS (Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy). Realizaron un análisis utilizando un voltaje de aceleración de 15 kV y una corriente de haz de ~ 5 nA, con el haz rastrillado a lo largo de la muestra a intervalos de 2 μm para generar un mapa de distribución de fase codificado por color cuantitativo para cada muestra de ceniza y bomba. El análisis de difracción de polvo de rayos X a granel (DRX) lo realizaron en tres muestras de ceniza (del 31 de diciembre de 2015, 21 de abril de 2016 y 19 de junio de 2016) para verificar de forma independiente el conjunto mineral identificado en QEM-SCAN. Los análisis se realizaron en un difractómetro de polvo Bruker D8 Advance en la Universidad de Leicester con geometría theta-theta Bragg-Brentano usando radiación de Cu Kα y un detector sensible a la posición LynxEye (PSD). El ángulo de inicio fue de 4.0 grados, un tamaño de paso de 0.010309 grados y un tiempo de paso de 0.5 segundos. (Schwaiger, Denlinger, & Mastin, 2012).

A.Wallace, D.Lamb, & Angelisa (2019) obtuvieron los siguientes resultados de la mineralogía de la ceniza del volcán Santiaguito en la investigación “Integrated constraints on explosive eruption intensification at Santiaguito dome complex, Guatemala” en la tabla 5.

Tabla 5

Composición química de roca a granel de elementos principales y trazas para cenizas y bombas recolectadas entre 2015 y 2016. Las ubicaciones de muestra incluyen El Caliente (El), campamento VIP ((VC), El Brujo (EB), La Mitad (LM), El Palmar (EP), Monte Bello Farm (MBF), Llano de Pinal (LdP) y OVSAN

Erupción	26/11	30/12	31/12	07/02			19/04	21/04					06/05		25/05	19/06
Fecha	2014	2015	2015	2016			2016	2016					2016		2016	2016
Ubicacion:	EC	VC	EB	LM			EP	EP	MBF	OVSAN			EP	OVSAN	MBF	LdP
Litología:	Flujo de lava	Ceniza	Ceniza	Ceniza	Bomba		Ceniza		Ceniza	Vesicular	Bomba	densa	Ceniza Ceniza	Ceniza		Ceniza
Muestra no.:	261114	301215	311215C	070216C	070216A	070216B	190416	210416B	210416C	210416A		210416A	060516A	060516B	250516	190616
(wt.%)																
SiO_2	62.65	61.37	61.30	61.84	61.68	61.51	61.57	61.62	61.56	61.57		62.10	61.64	61.42	61.96	62.27
TiO_2	0.48	0.60	0.63	0.58	0.58	0.58	0.57	0.57	0.60	0.59		0.57	0.60	0.57	0.58	0.52
Al_2O_3	17.17	17.65	16.97	17.31	17.79	17.70	17.93	17.92	17.32	17.78		17.86	16.97	17.98	17.18	18.08
FeO*	4.61	5.21	5.83	5.05	4.98	5.07	4.95	4.94	5.52	5.13		5.02	5.48	4.95	5.16	4.64
MnO	0.15	0.14	0.17	0.15	0.14	0.14	0.14	0.14	0.16	0.14		0.14	0.17	0.14	0.15	0.14
MgO	1.72	2.29	2.77	2.33	2.20	2.19	2.10	2.11	2.65	2.26		2.24	2.62	2.09	2.35	1.88
CaO	5.42	5.75	5.49	5.44	5.69	5.70	5.73	5.73	5.57	5.73		5.64	5.39	5.78	5.34	5.61
Na_2O	4.76	4.42	4.28	4.43	4.50	4.47	4.52	4.52	4.37	4.54		4.57	4.36	4.55	4.42	4.55
K_2O	1.36	1.55	1.53	1.57	1.53	1.54	1.49	1.49	1.50	1.54		1.57	1.58	1.46	1.61	1.46
P_2O_5	0.23	0.22	0.23	0.21	0.22	0.22	0.22	0.21	0.23	0.22		0.22	0.23	0.21	0.23	0.21
LOI	0.08	−99.180.04	−99.200.02	0.06	−99.250.06	−99.100.04	0.01	0.04	0.03	0.02		−99.890.05	−99.010.03	0.05	0.10	0.06
Total	98.62			98.99			99.24	99.28	99.54	99.52				99.21	99.09	99.43
(ppm)																
Ba	780	728	729	755	758	752	759	760	730	743		751	766	756	774	765
Ce	28	26	27	26	29	26	26	25	30	29		27	25	23	24	23

Cu	20	22	27	24	24	24	23	25	22	32	26	26	25	24	19
La	14	13	13	15	14	14	14	14	14	15	14	15	16	13	14
Nb	4	4	4	5	4	4	4	4	4	6	5	4	4	5	4
Rb	30	29	30	30	29	29	28	28	30	29	29	30	27	31	28
Sc	9	12	13	12	15	12	14	14	12	14	13	13	12	14	12
Sr	501	492	474	475	498	501	512	509	492	499	494	460	513	469	517
V	74	91	106	94	90	90	91	96	95	104	96	103	92	95	84
Y	19	20	20	20	19	20	20	19	20	19	18	20	19	21	19
Zn	72	71	82	82	69	71	75	74	124	76	74	85	71	80	70
Zr	150	145	148	150	145	146	143	143	146	145	148	149	141	153	141

Fuente: (A.Wallace, D.Lamb, & Angelisa, 2019)

12.2. Simulaciones de dispersión y caída de ceniza del volcán Santiaguito

Se realizaron 13 simulaciones de dispersión y caída de ceniza del volcán Santiaguito utilizando los datos de entrada mencionados anteriormente, el programa divide el espacio en cuadriculas tridimensionales y con condiciones de frontera calcula los valores de las variables de salida en cada punto. El tamaño de cada cuadricula es asignado automáticamente por el programa en función a la variabilidad de los resultados de cada uno, en la siguiente tabla se presentan los resultados de las simulaciones tomando la cuadricula critica en el municipio de Quetzaltenango.

Tabla 6
Resultados de simulaciones de dispersión y caída de ceniza del volcán Santiaguito

Numero	Fecha	Altura de Columna (msnm)	Altura de nube (Km)	Carga de nube (T/km2)	Concentración de nube (mg/m3)	Espesor de Caída (mm)
1	04/06/2020	6500	4,22	1,43	0,99	19,48
		4500	4,05	2,42	1,51	14,57
2	22/05/2017	6500	6,82	1,68	0,59	17,89
		4500	4,95	1,96	1,11	26,87
3	01/06/2020	6500	8,45	67,79	15,18	18,82
		4500	5,85	59,23	20,56	32,25
4	03/06/2020	6500	5,85	20,03	6,47	14,23
		4500	5,85	61,06	26,45	16,15
5	25/05/2020	6500	7,80	114,82	34,00	30,60
		4500	5,85	182,13	91,94	37,82
6	31/05/2020	6500	8,45	86,98	19,79	26,59
		4500	5,85	80,55	26,75	43,88
7	04/06/2020	6500	4,22	1,43	0,99	7,90
		4500	4,05	2,42	1,51	1,50
8	06/06/2020	6500	7,47	54,56	13,87	26,95
		4500	5,40	59,98	20,70	13,51
9	07/06/2020	6500	7,47	69,97	16,97	29,14
		4500	4,95	98,65	43,74	44,23
10	08/06/2020	6500	7,15	101,40	29,16	23,79
		4500	4,95	90,15	32,71	27,36
11	19/06/2020	6500	7,80	91,69	21,69	18,54
		4500	5,64	80,27	24,59	26,24
12	09/05/2014	6500	8,45	227,55	73,08	47,22
		4500	5,85	319,36	175,09	53,39
13	25/09/2016	6500	7,80	96,26	31,31	55,77

Fuente: Elaboración propia con resultados del programa ASH3D

12.3. Correlación entre Altura de Columna y Deposición

Las simulaciones se realizaron en dos alturas de columna, sin embargo, debido a la proximidad del municipio de Quetzaltenango se obtienen deposiciones mayores con altura de columna de 4500 msnm, mientras que la deposición con simulaciones de altura de columna a 6500msnm se muestran más constantes.

Figura 4 Comparación de deposición en función de la altura de columna
Fuente: Elaboración propia con datos de ASH3D

12.4. Análisis de Viento

Se realizó una solicitud de acceso a los datos meteorológicos de las estaciones del INSIVUMEH para analizar el comportamiento del viento en el municipio de Quetzaltenango, sin embargo, la variabilidad que existe en magnitud y dirección de viento en diferentes superficies isobáricas son diferentes, por lo tanto el viento presentado en la estación Labor Ovalle y la estación de Retalhuleu no proporcionan datos significativos para la investigación.

Los datos de magnitud y dirección del viento se obtuvieron de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos, la cual proporciona promedios diarios de vectores de viento en diferentes superficies isobáricas, para ello se

determinó las superficies isobáricas a extraer de la base datos en función a la altura de columna critica escogida en la simulación.

La presión atmosférica o presión barométrica se define como la fuerza que ejerce una columna de aire de la atmósfera sobre la superficie terrestre en un punto determinado. La fuerza que ejerce la columna de aire es inversamente proporcional a la altitud. La presión atmosférica se ve influida por varios factores como la densidad y la temperatura del aire, además de sus constituyentes. Para el cálculo de la presión atmosférica se puede utilizar la fórmula barométrica, un modelo matemático aproximado que define la presión atmosférica a una determinada altura, que se representa de la siguiente forma:

$$P(h) = P_0 e^{-\alpha h}$$

Que incluye variables como la presión atmosférica al nivel del mar, la altura a la que se quiere encontrar la presión atmosférica, la densidad del aire y la gravedad, con lo cual los resultados de superficies isobáricas en el municipio de Quetzaltenango se muestran en la siguiente tabla donde la presión atmosférica se encuentra en milibar (mb):

Tabla 7
Presión atmosférica en alturas de columna críticas para el municipio de Quetzaltenango

Atura en msnm	Presión (mb)
6500	449.21
4500	557.07

Fuente: Elaboración propia

Se extrajeron las componentes vectoriales de viento en las superficies isobáricas de 400, 500 y 600 hP (high presure) esto durante un periodo de 20 años (2009-2019), teniendo un total de 7300 registros por cada superficie isobárica, a continuación, se muestran las rosas de viento en las tres alturas de interés:

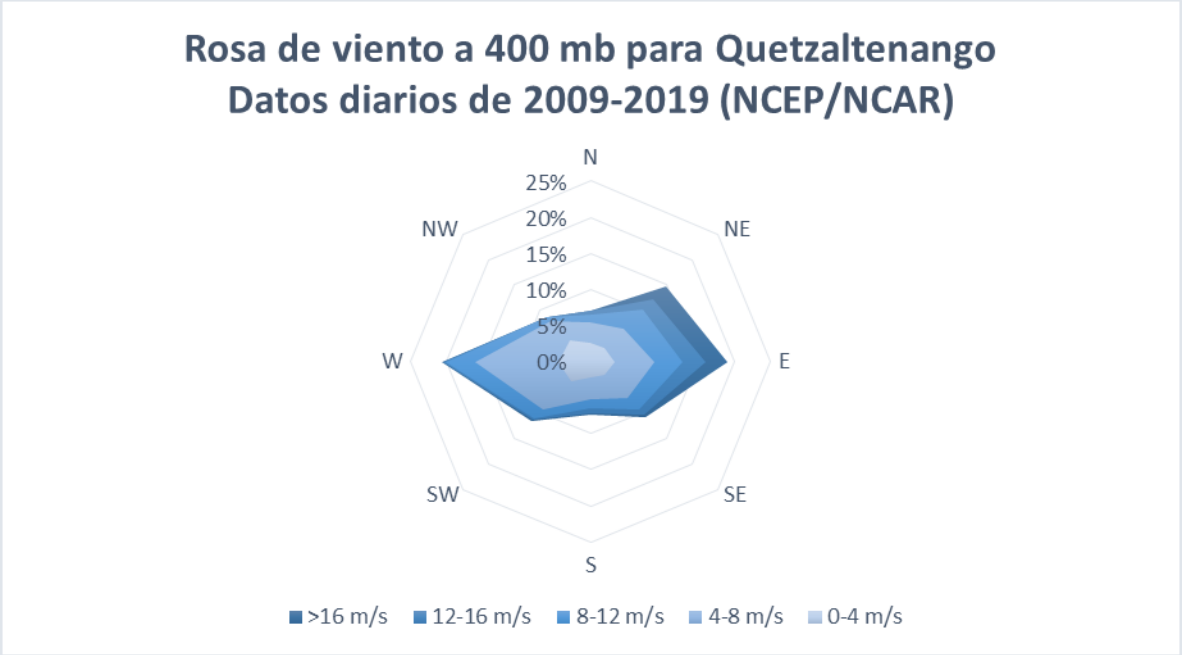


Figura 5 Rosa de viento de superficie isobárica de 400 mb
Fuente: Elaboración propia con datos de NCEP/NCAR

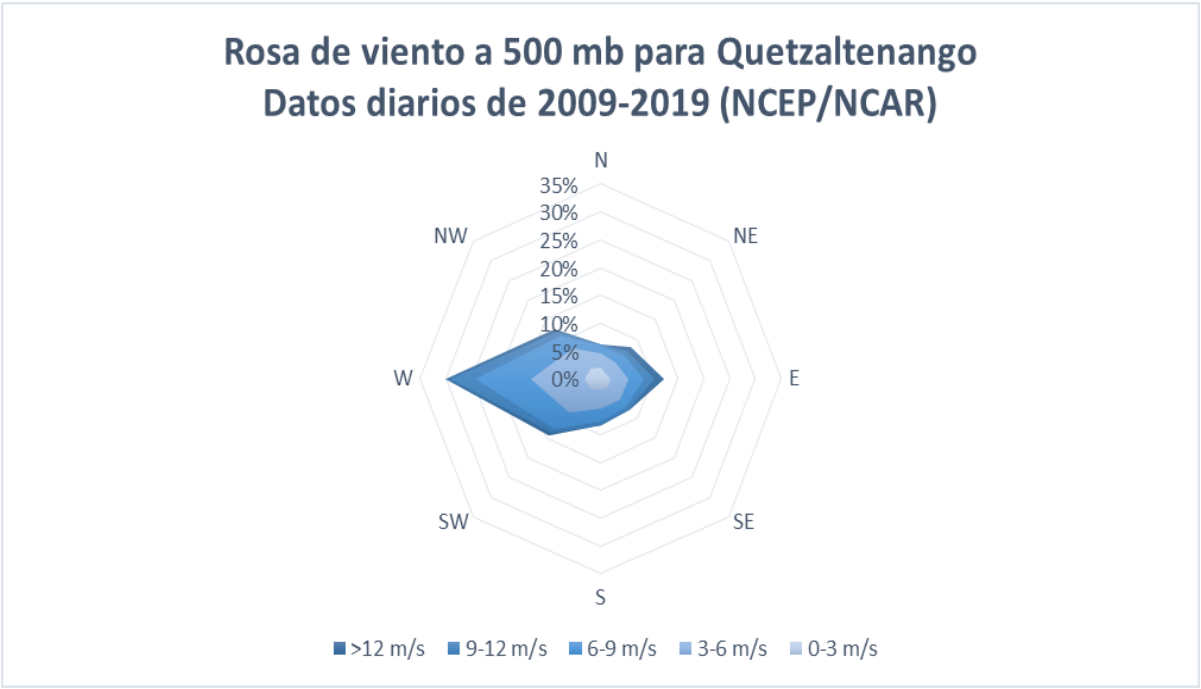


Figura 6 Rosa de viento de superficie isobárica de 500 mb
Fuente: Elaboración propia con datos de NCEP/NCAR

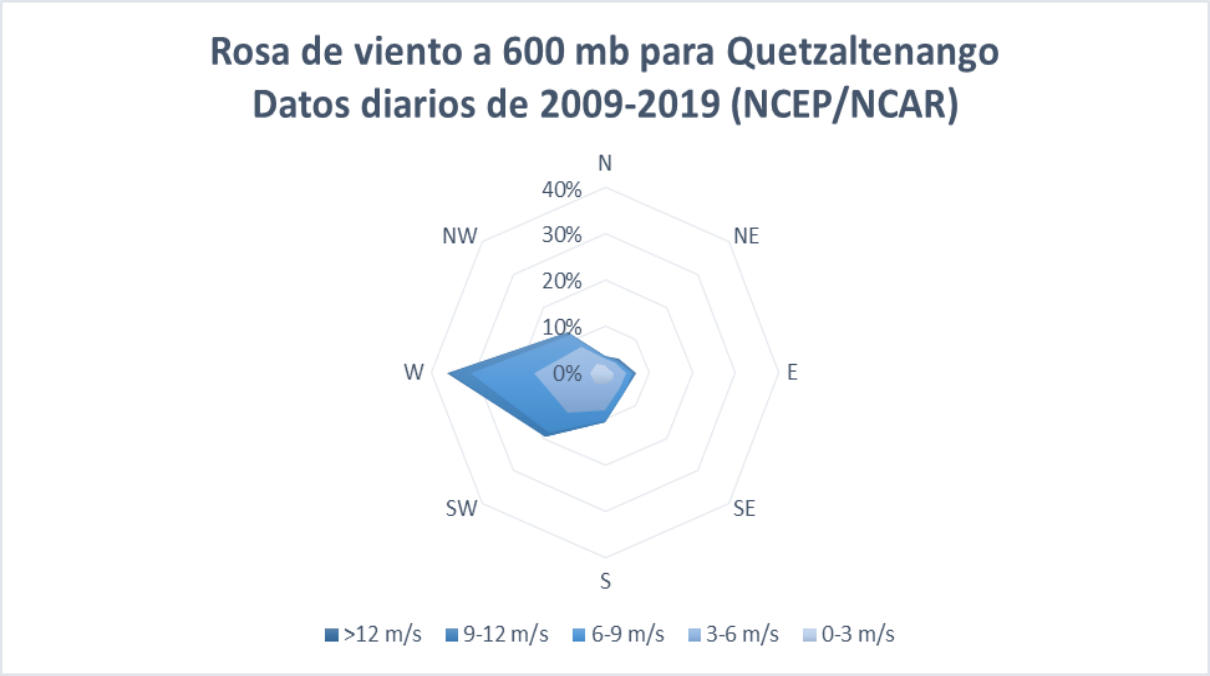


Figura 7 Rosa de viento de superficie isobárica de 600 mb
Fuente: Elaboración propia con datos de NCEP/NCAR

En las gráficas se puede observar la tendencia de los vientos en los últimos 20 años, en la superficie de 600mb y 500 mb, que son las de mayor interés, muestran una tendencia de vientos hacia el este y oeste con mayores velocidades, lo cual coincide con la poca caída histórica de ceniza en el municipio de Quetzaltenango.

12.5. Periodo de Retorno de Erupción Extrema

Para calcular la probabilidad de cada evento independiente se encontró la ocurrencia en cierto periodo de tiempo.

12.5.1. Probabilidad eruptiva.

En los datos de entrada de las simulaciones de prueba se utilizaron datos de columna y volumen eruptivo correspondiente a erupciones con índice de explosividad volcánica (VEI) mayor a 3, se realizó una recopilación de erupciones de esa magnitud o mayor registradas, de las cuales se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 8
Erupciones registradas con VEI mayor a 3 en el volcán Santiaguito

Año	VEI
1902	6
1929	3
1978	3
1990	3
2014	3

Fuente: INSIVUMEH y Smithsonian Institution

Los registros abarcan un rango de 118 años, lo cual equivale a una probabilidad de 0.04237 de ocurrencia del evento en un año aleatorio.

12.5.2. Probabilidad de vientos críticos

La mayor dispersión y deposición de ceniza sobre el municipio de Quetzaltenango se da cuando el viento está en una dirección entre 0 y 45 grados acimutales, para calcular la probabilidad de este evento extremo se tomaron los datos de viento de un periodo de 10 años (2009-2019) y se cuantificaron los días con vientos predominantes en esta dirección.

En la siguiente tabla se muestran los días con vientos en dirección critica en la superficie isobárica que corresponde a una columna eruptiva de 4500 msnm, para esto se realizó una interpolación lineal entre las superficies isobáricas de 600 y 500 mb (milibar), con los siguientes resultados.

Tabla 9
Probabilidad de vientos critico en la ciudad de Quetzaltenango a una altura de 4500msnm

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	total
Días con dirección de viento critico	13	17	18	10	9	5	17	10	9	9	9	126
Días totales	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	365	4015
Probabilidad	0.036	0.047	0.049	0.027	0.025	0.014	0.047	0.027	0.025	0.025	0.025	0.0314

Fuente: elaboración propia con datos de NCEP/NCAR

12.5.3. Periodo de retorno y probabilidad de excedencia

El periodo de retorno está directamente inversamente relacionado con la probabilidad de excedencia de un evento, por lo cual, la probabilidad total del evento extremo simulado es la siguiente:

Tabla 10
Probabilidad total de ocurrencia de un evento extremo

Evento Individual independiente	Total
Probabilidad de erupción mayor a VEI =3	0.042372881
Probabilidad de viento critico	0.031382316
Probabilidad total	0.001329759

Fuente: elaboración propia

Para calcular el periodo de retorno de algún evento se utiliza la inversa de la probabilidad de ocurrencia de un evento, por la cual el periodo de retorno estaría dado por la siguiente ecuación.

$$T = \frac{1}{P} = \frac{1}{0.001329759} \approx 752\ años$$

Asimismo, resulta útil calcular la probabilidad de excedencia del evento extremo, la cual se puede encontrar mediante la siguiente ecuación:

$$P(X < xt) = \left(1 - \frac{1}{T}\right)$$

De la cual se obtiene la siguiente grafica de probabilidad de excedencia.

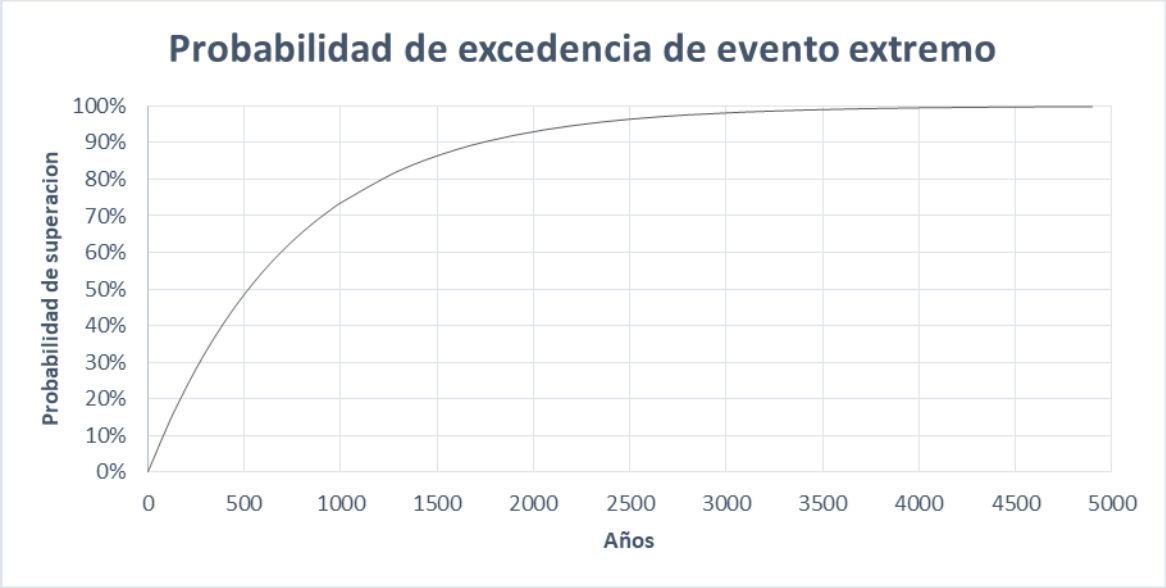


Figura 8 Probabilidad de excedencia de evento de evento eruptivo y meteorológico extremo
Fuente Elaboración propia.

12.6. Dispersión y Deposición por Zonas

Para generar un mapa de zonificación de distintos escenarios se utilizó una envolvente con las 5 erupciones más críticas del total de simulaciones realizadas, el programa de simulación genera los resultados basados en cuadriculas variables en cada simulación, proporcionando valores exactos en cada centro de cuadricula, por lo que es necesario realizar una interpolación bilineal para poder encontrar los datos de dispersión y simulación en cada zona del municipio, los resultados de las simulaciones y las interpolaciones se muestran en las tablas 11- 13.

La deposición en mm, concentración en mg/m^3 y carga de nube en T/km^2 se presentan en las tablas 11, 12 y 13 correspondiente, a una altura de columna eruptiva de 4500 msnm y 6500 msnm, donde se obtuvieron una deposición, concentración y carga de nube mayor a una altura eruptiva de 4500 msnm, se presentan los resultados de deposición, concentración y carga de nube promedio y máximo para cada zona especificada en latitud y longitud, en el apéndice A se encuentran los mapas de deposición promedio a 4500 msnm y deposición promedio y máximo a 6500 msnm, en el apéndice B se encuentran los mapas de concentración promedio a 4500 msnm y concentración promedio y máximo a 6500 msnm y en el apéndice C se encuentran los mapas de carga de nube promedio a 4500 msnm y carga de nube promedio y máximo a 6500 msnm.

Tabla 11
Deposición en mm (milímetros) de columna eruptiva a 4500 y 6500 msnm

			Columna eruptiva a 4500 msnm		Columna eruptiva a 6500 msnm	
Zona	Y	X	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo
Chuicaracoj	14.79	-91.57	38.53	48.75	25.56	43.18
Volcán Santa María	14.76	-91.56	34.07	44.25	26.99	35.67
Tierra Colorada Alta	14.81	-91.57	32.14	38.55	22.42	35.90
Xecaracoj	14.79	-91.55	30.92	34.83	24.89	31.77
Tierra Colorada Baja	14.82	-91.55	25.41	28.53	21.25	26.19
Xepache	14.81	-91.55	26.11	28.39	21.62	26.13
Zona 12	14.83	-91.56	24.05	28.31	20.58	25.90
Llanos del Pinal	14.79	-91.54	26.38	27.70	21.75	25.45
Chitux	14.85	-91.56	21.53	26.36	16.97	23.99
Candelaria	14.80	-91.53	21.02	23.25	18.00	19.78
Zona 10	14.83	-91.54	20.47	23.22	17.70	20.77

Chuicavioc	14.78	-91.53	19.36	21.73	17.54	20.81
Zona 9	14.85	-91.55	18.15	21.62	16.08	19.43
Bella Vista	14.77	-91.53	18.37	20.53	16.99	20.63
Chilajú	14.82	-91.53	17.97	20.50	15.72	17.43
Chicua	14.80	-91.51	14.21	19.75	13.17	16.41
Xetuj	14.82	-91.52	16.10	19.66	14.33	16.57
Zona 1	14.83	-91.53	16.54	19.15	14.60	16.12
Las Majadas	14.76	-91.52	14.88	18.45	14.70	19.05
Zona 4	14.83	-91.51	13.29	18.05	12.20	14.55
Zona 3	14.85	-91.52	15.20	17.83	13.46	14.97
Zona 8	14.86	-91.54	15.04	17.72	13.43	15.72
Zona 2	14.84	-91.51	13.28	17.64	12.00	13.95
Zona 7	14.86	-91.52	13.21	16.18	11.72	13.31
Zona 5	14.84	-91.49	10.95	15.53	10.47	12.35
Zona 6	14.86	-91.51	11.65	15.45	10.62	12.32
Chiquilajá	14.87	-91.49	9.36	13.21	9.01	10.63
Zona 11	14.86	-91.48	8.69	13.15	8.77	11.53
Chichiuhitán	14.83	-91.47	8.04	12.85	8.62	12.80

Fuente: Elaboración propia

Mapa de Zonificación

Deposición máxima en mm de columna eruptiva a 4500 msnm

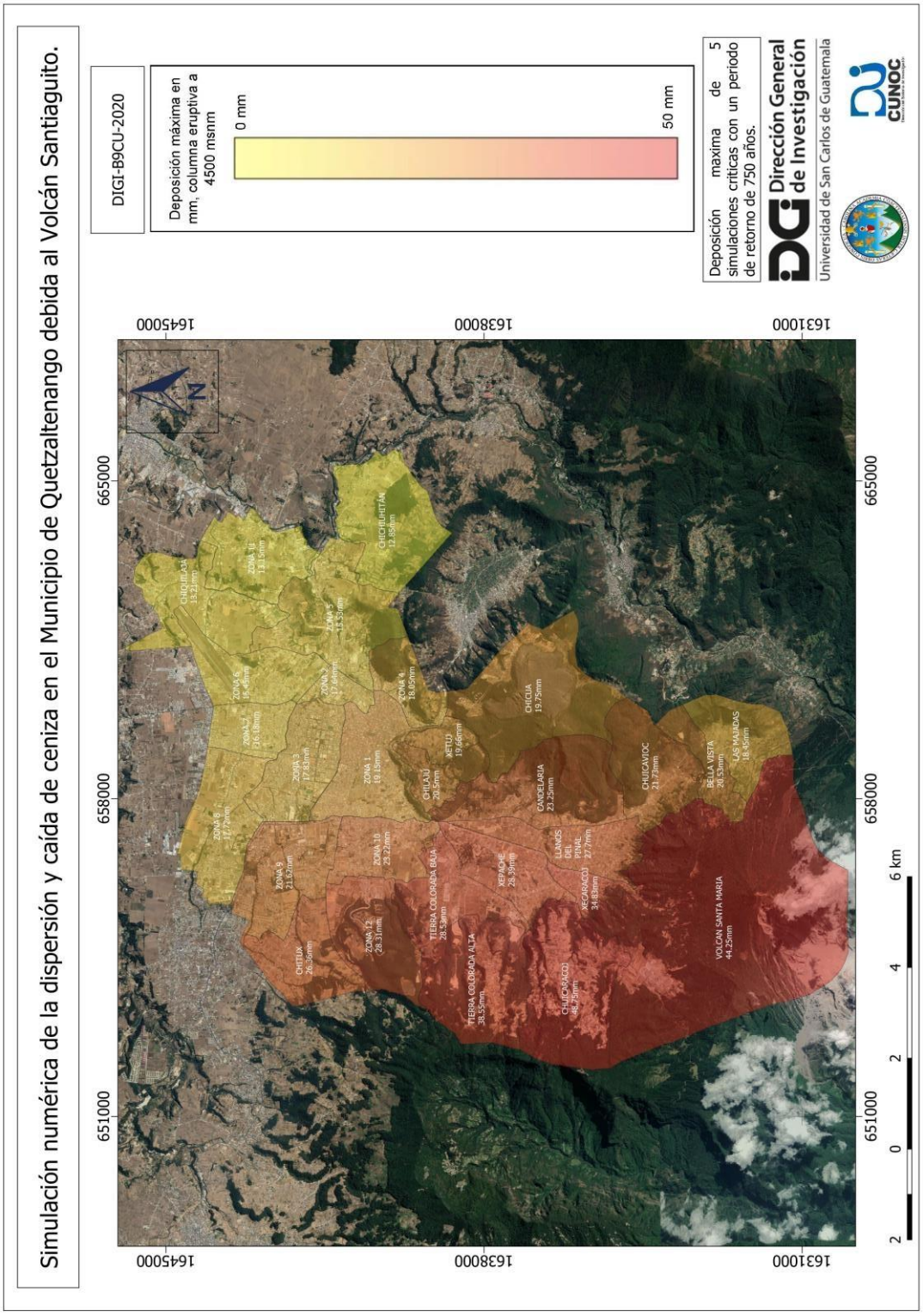


Tabla 12

Concentración en mg/m³ de columna eruptiva a 4500 y 6500 msnm

			Columna eruptiva a 4500 msnm		Columna eruptiva a 6500 msnm	
Zona	Y	X	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo
Chuicaracoj	14.79	-91.57	77.46	98.84	70.69	87.10
Volcán Santa María	14.76	-91.56	71.31	86.86	70.72	81.56
Tierra Colorada Alta	14.81	-91.57	71.19	101.45	62.94	84.64
Xecaracoj	14.79	-91.55	80.99	106.02	64.67	76.58
Tierra Colorada Baja	14.82	-91.55	74.92	107.53	59.72	75.46
Xepache	14.81	-91.55	77.75	115.16	60.07	73.55
Zona 12	14.83	-91.56	70.93	97.27	58.24	74.00
Llanos del Pinal	14.79	-91.54	84.23	112.49	61.18	71.51
Chitux	14.85	-91.56	68.09	89.52	56.25	70.71
Candelaria	14.80	-91.53	88.88	121.65	56.76	65.22
Zona 10	14.83	-91.54	75.60	106.16	56.16	66.30
Chuicavioc	14.78	-91.53	82.29	109.18	57.96	63.72
Zona 9	14.85	-91.55	71.84	95.31	53.54	61.84
Bella Vista	14.77	-91.53	78.31	101.62	59.21	63.95
Chilajú	14.82	-91.53	81.12	118.95	55.77	63.95
Chicua	14.80	-91.51	94.43	132.63	50.46	55.29
Xetuj	14.82	-91.52	82.88	122.41	54.87	65.94
Zona 1	14.83	-91.53	79.50	112.91	53.64	64.98
Las Majadas	14.76	-91.52	76.75	98.91	58.03	61.00
Zona 4	14.83	-91.51	84.77	124.22	52.20	69.90
Zona 3	14.85	-91.52	77.68	106.35	51.54	65.88
Zona 8	14.86	-91.54	72.60	93.83	50.46	62.91
Zona 2	14.84	-91.51	82.44	116.69	50.74	70.13
Zona 7	14.86	-91.52	78.07	104.61	49.35	68.68
Zona 5	14.84	-91.49	86.17	123.18	48.69	75.00
Zona 6	14.86	-91.51	80.93	109.56	48.10	72.37
Chiquilajá	14.87	-91.49	82.62	109.56	45.58	77.18
Zona 11	14.86	-91.48	86.67	119.78	45.76	79.52
Chichiuhitán	14.83	-91.47	92.57	137.65	47.17	80.35

Fuente: Elaboración propia

Mapa de Zonificación

Concentración máxima en mg/m^3 de columna eruptiva a 4500 msnm

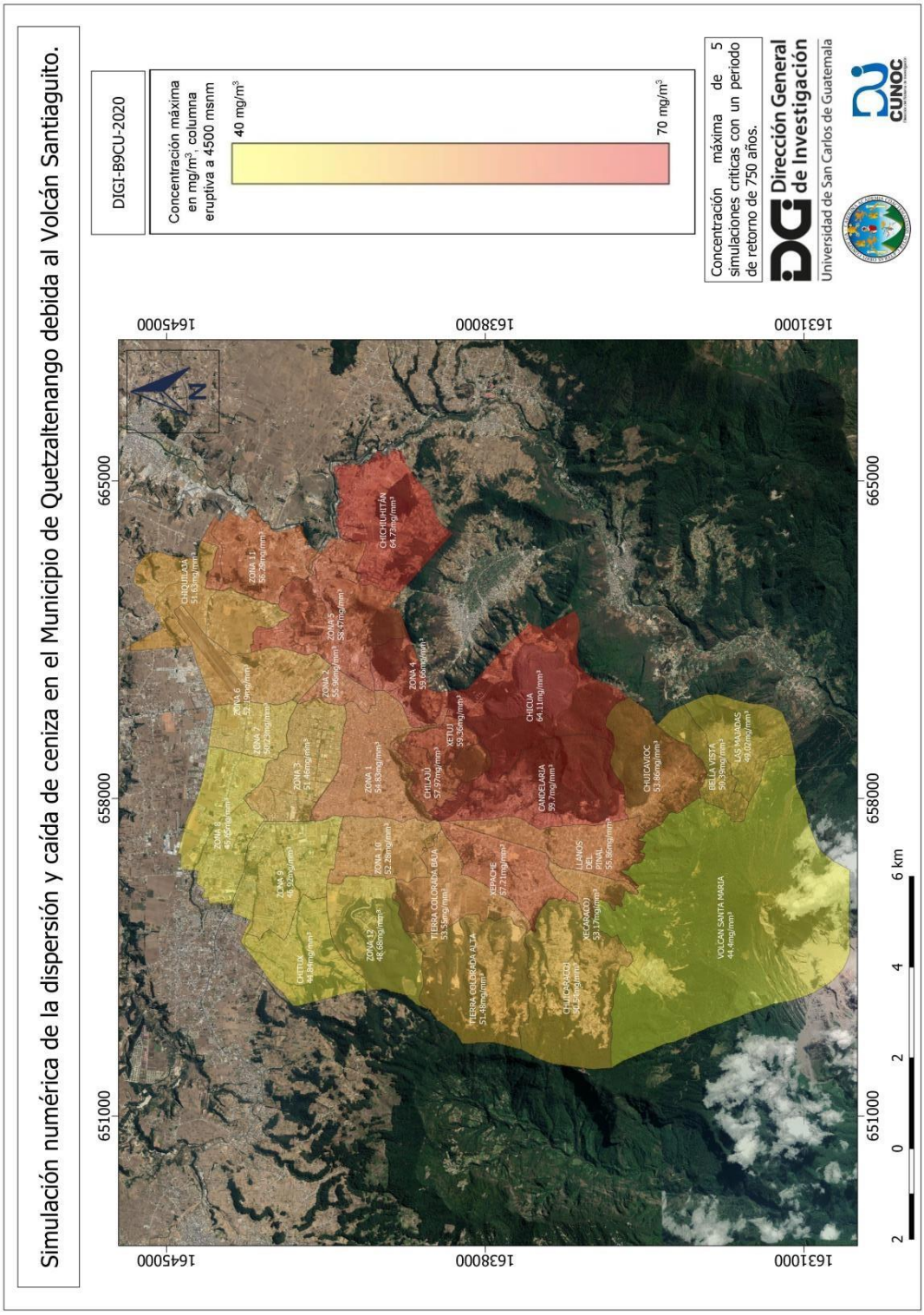

Simulación numérica de la dispersión y caída de ceniza en el Municipio de Quetzaltenango debida al Volcán Santiaguito.
DIGI-B9CU-2020
Concentración máxima en mg/m^3, columna eruptiva a 4500 msnm
40 mg/m^3
70 mg/m^3
Concentración máxima de 5 simulaciones criticas con un periodo de retorno de 750 años.
Dirección General de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala
CUNOC
N
ZONA 1
ZONA 2
ZONA 3
ZONA 4
ZONA 5
ZONA 6
ZONA 7
ZONA 8
ZONA 9
ZONA 10
ZONA 11
ZONA 12
CHICHILHITÁN
CHIQUIJAJÁ
CHIQUIJAJÁ
CHIQUIJAJÁ

Tabla 13

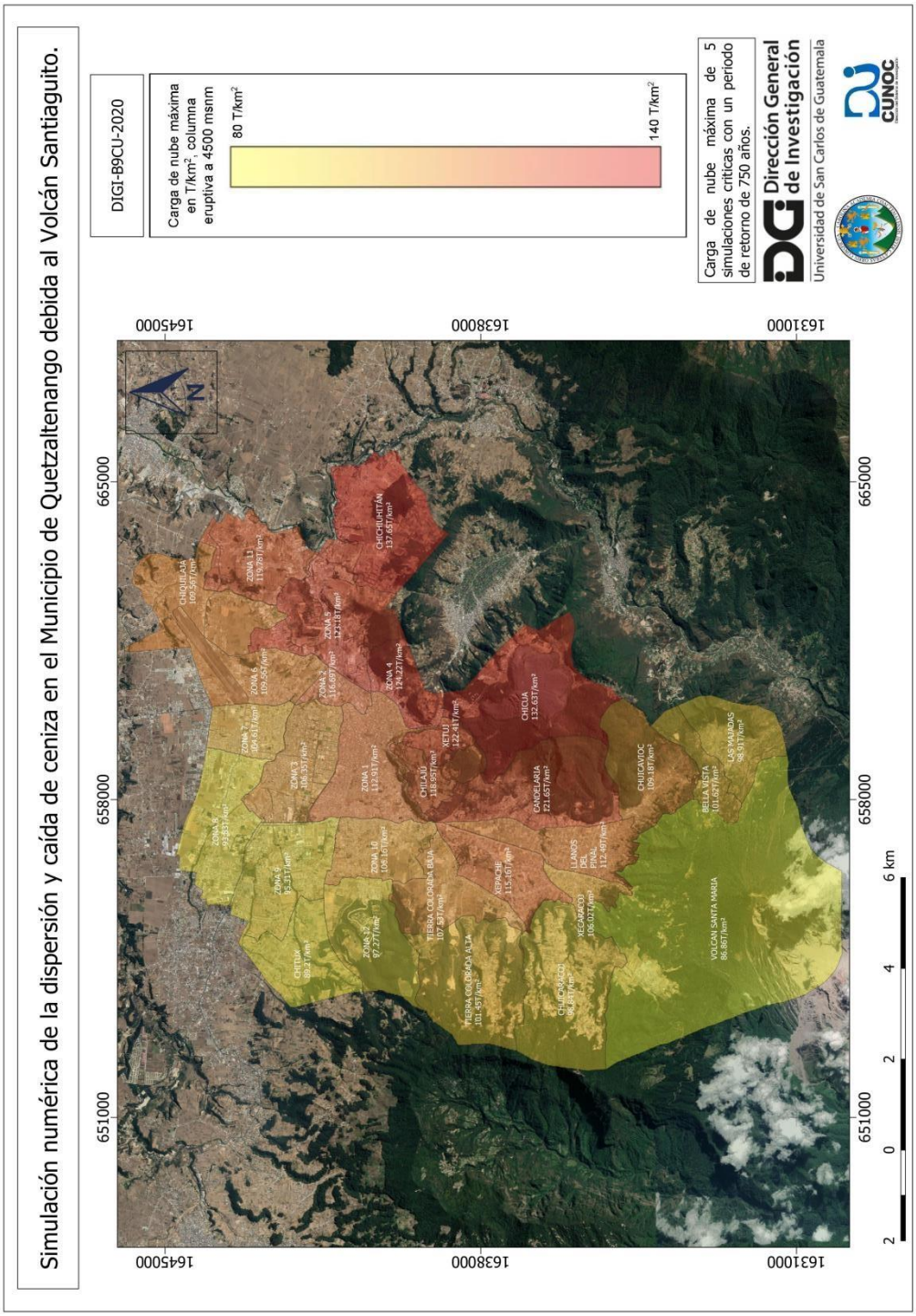
Carga de nube en T/km^2 de columna eruptiva a 4500 y 6500 msnm

			Columna eruptiva a 4500 msnm		Columna eruptiva a 6500 msnm	
Zona	Y	X	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo
Chuicaracoj	14.79	-91.57	77.46	98.84	70.69	87.10
Volcán Santa María	14.76	-91.56	71.31	86.86	70.72	81.56
Tierra Colorada Alta	14.81	-91.57	71.19	101.45	62.94	84.64
Xecaracoj	14.79	-91.55	80.99	106.02	64.67	76.58
Tierra Colorada Baja	14.82	-91.55	74.92	107.53	59.72	75.46
Xepache	14.81	-91.55	77.75	115.16	60.07	73.55
Zona 12	14.83	-91.56	70.93	97.27	58.24	74.00
Llanos del Pinal	14.79	-91.54	84.23	112.49	61.18	71.51
Chitux	14.85	-91.56	68.09	89.52	56.25	70.71
Candelaria	14.80	-91.53	88.88	121.65	56.76	65.22
Zona 10	14.83	-91.54	75.60	106.16	56.16	66.30
Chuicavioc	14.78	-91.53	82.29	109.18	57.96	63.72
Zona 9	14.85	-91.55	71.84	95.31	53.54	61.84
Bella Vista	14.77	-91.53	78.31	101.62	59.21	63.95
Chilajú	14.82	-91.53	81.12	118.95	55.77	63.95
Chicua	14.80	-91.51	94.43	132.63	50.46	55.29
Xetuj	14.82	-91.52	82.88	122.41	54.87	65.94
Zona 1	14.83	-91.53	79.50	112.91	53.64	64.98
Las Majadas	14.76	-91.52	76.75	98.91	58.03	61.00
Zona 4	14.83	-91.51	84.77	124.22	52.20	69.90
Zona 3	14.85	-91.52	77.68	106.35	51.54	65.88
Zona 8	14.86	-91.54	72.60	93.83	50.46	62.91
Zona 2	14.84	-91.51	82.44	116.69	50.74	70.13
Zona 7	14.86	-91.52	78.07	104.61	49.35	68.68
Zona 5	14.84	-91.49	86.17	123.18	48.69	75.00
Zona 6	14.86	-91.51	80.93	109.56	48.10	72.37
Chiquilajá	14.87	-91.49	82.62	109.56	45.58	77.18
Zona 11	14.86	-91.48	86.67	119.78	45.76	79.52
Chichiuhitán	14.83	-91.47	92.57	137.65	47.17	80.35

Fuente: Elaboración propia

Mapa de Zonificación

Carga de nube máxima en T/km^2 de columna eruptiva a 4500 msnm



13. Análisis y discusión de resultados

La predicción de eventos eruptivos es altamente improbable debido a la gran cantidad de variables desconocidas que se están involucradas, sin embargo, es posible encontrar valores de dispersión y deposición con probabilidades de excedencia asociadas, mediante esto se puede inferir un riesgo a largo plazo, sin embargo, para poder redecir un riesgo a corto plazo se requiere una investigación a profundidad de los parámetros involucrados.

Los mapas dispersión y deposición de ceniza indican la amenaza que presenta una erupción del volcán Santiaguito, sin embargo, es importante considerar la vulnerabilidad de cada zona, ya que, dependiendo el uso de la tierra, los daños pueden ser de menor o mayor repercusión.

13.1. Intensidad del Riesgo

Como se menciona en la investigación de (Jenkins, Wilson, Magill, Miller, & Stewart, 2015), normalmente se consideraba el espesor de caída de ceniza como un indicador del riesgo, sin embargo, en estudios recientes se recomienda utilizar la concentración como medida de intensidad de riesgo, ya que presenta una medida más exacta.

El estudio del riesgo por ceniza volcánica, es en comparación al riesgo sísmico, muy poco estudiado y desarrollado, sin embargo, se han definido varios tipos de zonas según el tipo de riesgo que se presenta, la investigación de (Jenkins, Wilson, Magill, Miller, & Stewart, 2015) presenta 3 zonas principales en función del riesgo que podrían presentar.

Tabla 14

Zonas de riesgo

Zona	Daños
I	Destructiva y potencialmente mortal
II	Dañino y/o perturbador
III	Ligeramente perturbador y/o una molestia

Fuente: Jenkins, Wilson, Magill, Miller, & Stewart, 2015

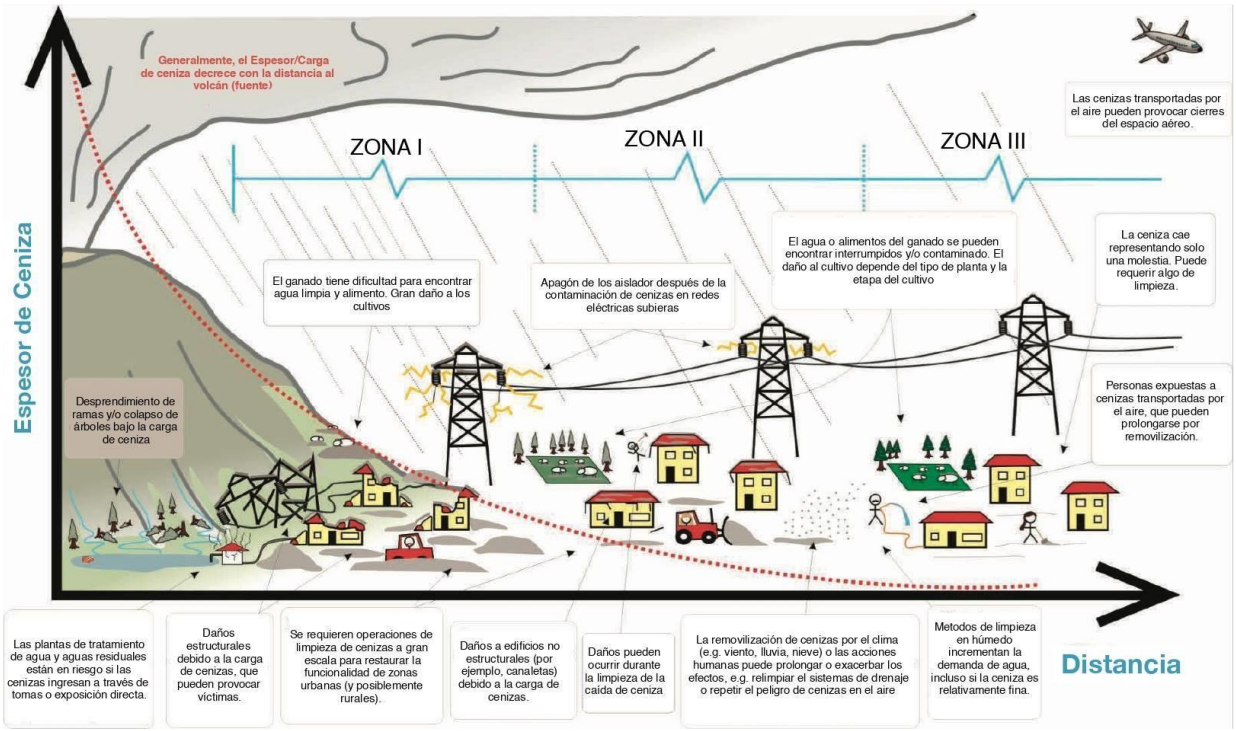


Figura 9 Esquema de impactos de caída de ceniza relacionando la distancia de un volcán
Fuente: Jenkins, Wilson, Magill, Miller, & Stewart, 2015

13.2. Estimación de vulnerabilidad

El riesgo que existe debido a la caída de ceniza en un punto es independiente de su uso u ocupación, sin embargo, la vulnerabilidad dependerá del uso de determinado tipo de suelo, la caída de ceniza en lugares más poblados con viviendas de concreto reforzado o mampostería afectaran mucho menos económicamente que a un agricultor que su sustento depende de los sembradíos.

Para poder analizar la vulnerabilidad, en la investigación de (Jenkins, Wilson, Magill, Miller, & Stewart, 2015), se presenta un método de categorías de vulnerabilidad para infraestructura, edificios y agricultura, estas tablas están hechas de manera empírica, se basan en una escala que va de (D0 a D5) en escala de vulnerabilidad, estas tablas se presentan a continuación.

Tabla 15

Media aproximada de intensidades de amenaza que se relacionan con infraestructura

		Código	D0	D1	D2	D3	D4	D5
		Descripción	**Sin daño**	**Limpieza requerida**		**Reparación requerida**		**Sin reparación económica**
TIPO DE INFRAESTRUCTURA CRITICA	**Aeropuertos**	**Funcionalidad**	Completamente funcional	Cierre de pista				Cierre indefinido
		Daño	Sin daño (perdidas de ganancias)		Posible degradación de superficie de pista	Colapso de edificios críticos: Posible degradación de superficie de pista		Entierro completo
		Espesor	0 mm	>0 mm				>500 mm
	Poder	**Funcionalidad**	Completamente funcional	Disrupción temporal, por ejemplo. Parpadeo de aisladores		Disrupción requiere reparación		Disrupción permanente
		Daño	Sin Daño	Sin daño a componentes		Daño a componentes críticos; retrasos largos en recibir remplazos de componentes		Daño estructural
		Espesor	0 (0-20) mm	5 (1-20) mm		20 (2-100) mm		>500 mm (100-1000 mm)
	Vías de tren	**Funcionalidad**	Completamente funcional	Visibilidad reducida y tracción	Disrupción de señales	Perdida de tracción haciendo su uso inseguro; Posible descarrilamiento debido a acumulación de ceniza		Intransitable
		Daño	Sin daño		Posible abrasión y/o tracción de señales y vías			Entierro total
		Espesor	0 (0-5) mm	0.5 (0.1-10) mm	1 (0.1-20) mm	30 (2-100) mm		100 (50-200) mm
	Carreteras	**Funcionalidad**	Completamente funcional	Visibilidad reducida y tracción	Marcas en carreteras oscurecidas	Vehículos 2WD obstruidos	Vehículos 4WD Obstruidos	Intransitable
		Daño	Sin daño		Posible abrasión de la superficie de carretera y marcas.	Abrasión de la superficie de carretera y marcas.		Entierro total
		Espesor	0 (0-5) mm	0.5 (0.1-10) mm	2 (1-20) mm	50 (10-100) mm	150 (50-300) mm	

Fuente: Jenkins, Wilson, Magill, Miller, & Stewart, 2015

Tabla 16

Media aproximada de intensidades de amenaza que se relacionan con tipos genéricos de techo

Código		D0	D1	D2	D3	D4	D5
Descripción		**Sin daño**	**Reparación básica o mínima requerida**	**Reparación moderada requerida**	**Reparación mayor o especializada requerida**		**Sin reparación económica**
Funcionalidad		Funcional	Limpieza repetida requerida; perdida de alguna funcionalidad para algunos contenidos y accesorios	Infiltración de ceniza o amenaza de colapso de techo y/o pared, puede hacerla inhabitable			Retirado
Costo (% costo de remplazo):		0 – 1	1 – 5	5 – 20	20 – 60		>60
Daño Estructural		Sin daño	Sin daño	Sin daño a las estructuras de soporte de techo	Falla parcial o completa de la estructura soportante, por ejemplo, listones o armaduras: Daño parcial o moderado a la estructura vertical		Colapso del techo y la estructura de soporte sobre 50% del área del techo; Las paredes externas pueden desestabilizarse
Daño no estructural		Sin daño	Daños menores a las cubiertas del techo, p. Ej. Abrasión y corrosión de techos metálicos.	Daños potenciales a las canaletas y al techo, por ejemplo. flexión excesiva y voladizos	Daños severos o colapso parcial de los voladizos del techo; Colapso o colapso parcial de la cubierta del techo		Paredes divisorias destruidas en algunos casos
Contenido y accesorios:		Posible infiltración de cenizas	Infiltración de cenizas y daño potencial a los accesorios, p. Ej. aire acondicionado y electrodomésticos	Niveles variables de contaminación y daño			Daño a la mayoría de los contenidos y los accesorios son irreversibles, o el rescate es antieconómico
TIPO GENÉRICO DE TECHO	**Tablero de madera sobre soportes de madera débiles**	1 mm?	10 mm	200 mm (100 – 400 mm)			
	Azulejos sobre soportes de madera			300 mm (150 – 600 mm)			
	Revestimiento modesto sobre soportes de madera.			300 mm (150 – 600 mm)			
	Hormigón armado doméstico			700 mm (400 - 1400 mm)			

Fuente: Jenkins, Wilson, Magill, Miller, & Stewart, 2015

Tabla 17

Media aproximada de intensidades de amenaza que se relacionan con niveles de pérdidas de producción para un rango de tipos de agricultura

Código:			D0	D1	D2	D3	D4	D5
Descripción:			Sin daño	Interrupción de las operaciones de cosecha y pastoreo de ganado de alimentos expuestos	Pérdida de productividad menor: menos de 50 %/cosecha	Gran pérdida de productividad: más de 50 %/cosecha; Requiere remediación	Pérdida total de cultivos; Se requiere una remediación sustancial	Requiere rehabilitación importante / Retiro de tierras
TIPO DE AGRICULTURA	Horticultura y Arable	Suelo Cultivos y Cultivable	0 mm (0-20 mm)	1 mm (0.1-50 mm)	5 mm (1-50 mm)	50 mm (1-100 mm)	100 mm (25-200 mm)	300 mm (100- 500 mm)
		Cultivos de árboles	0 mm (0-20 mm)	1 mm (0.1-50 mm)	5 mm (1-50 mm)	50 mm (1-100 mm)	200 mm (5-500 mm)	300 mm (200- 500 mm)
	Pastoral		0 mm (0-20 mm)	3 mm (0.1-50 mm)	25 mm (1-70 mm)	60 mm (20-150 mm)	100 mm (30-200 mm)	300 mm (100- 500 mm)
	Arrozales		0mm (0-50 mm)	1 mm (0.1-50 mm)	30 mm (1-75 mm)	75 mm (20 - 300 mm)	150 mm (75 – 300 mm)	300 mm (100- 750 mm)
	Silvicultura		0 mm (0-75 mm)	5 mm (0.1-75 mm)	200 mm (20-300 mm)	1000 mm (100-2000 mm)	1500 mm (100->2000 mm)	

Fuente: Jenkins, Wilson, Magill, Miller, & Stewart, 2015

13.3. Uso del suelo en Quetzaltenango

El plan de ordenamiento territorial de Quetzaltenango establece el uso del suelo como cualquier actividad que se realiza en el suelo de forma habitual, en la totalidad o en una porción de la superficie de un predio, de un inmueble, de una edificación o de una estructura, clasificando el uso del suelo en 4 grades grupos; suelo urbano, suelo rural y suelo de protección especial.

13.3.1. Suelo Urbano

Esta categorización responde a las características físicas que tienen cada área en cuanto a topografía, orografía y las características urbanas del sector, como lo es la calidad

de servicios públicos del sector y la incidencia de desastres naturales en el área. (Municipalidad de Quetzalteango, 2019)

13.3.2. Suelo Rural

El suelo rural son áreas que por su productividad, paisaje ecológico y su topografía se consideran predominantemente de vocación para el desarrollo de actividades agrícolas, pecuarias, forestales y de conservación del ambiente y los recursos naturales, con aptitud para la ocupación humana, correspondiente a una baja intensidad de construcción, en el cual no se permite el desarrollo de urbanizaciones, lotificaciones y/o condominios destinados a actividades residencial o no residenciales y actividades extracción o explotación mineras. (Municipalidad de Quetzalteango, 2019)

13.3.3. Suelo Forestal

El suelo forestal son áreas que por su topografía, orografía y paisaje ecológico se consideran de vocación para la conservación del ambiente y los recursos naturales y que, por sus condiciones para la potencial ocurrencia de deslizamientos o derrumbes, se consideran de riesgo de desastres y no aptas para la ocupación humana. En estas áreas queda prohibido todo uso del suelo que implique la ocupación humana, desarrollos de urbanizaciones, lotificaciones y/o condominios destinados a actividades residenciales o no residenciales y actividades de extracción o explotación mineras. (Municipalidad de Quetzalteango, 2019)

13.3.4. Suelo de protección especial

Se establece la categorización de zonas especiales en 13 tipos. Esta categorización responde a los usos mono-funcionales existentes y proyectados en Quetzaltenango, a los suelos especiales de protección patrimonial o cultural, áreas de riesgo a inundaciones y deslizamientos, extracción de materiales, recursos hídricos, plantas de tratamiento, aplicándoles para ello normas especiales con el objeto de lograr su adecuada gestión territorial. (Municipalidad de Quetzalteango, 2019)

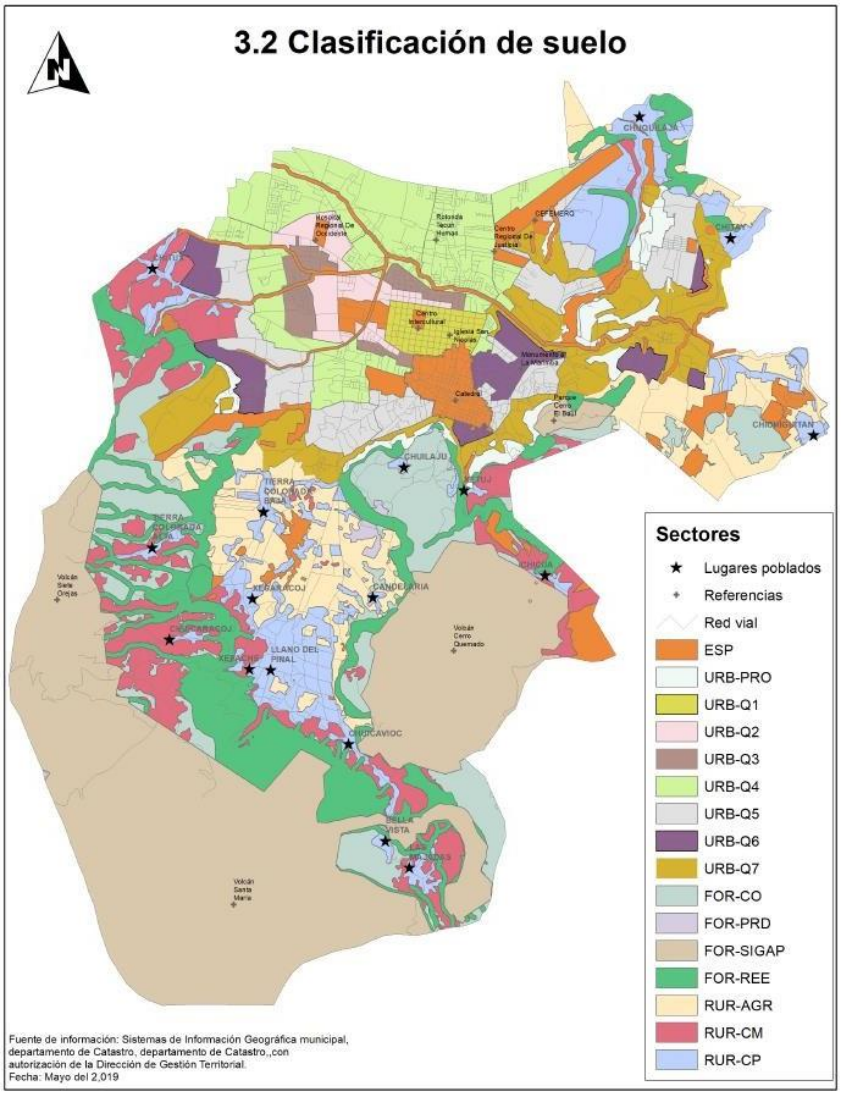


Figura 10 Clasificación de suelo en Quetzaltenango
Fuente: Municipalidad de Quetzalteango, 2019

Esta clasificación nos permite correlacionar el uso del suelo para determinar los diferentes sectores que están expuestos a la vulnerabilidad de la deposición de la ceniza del volcán Santiaguito a través de las tablas 15-17 (Jenkins, Wilson, Magill, Miller, & Stewart, 2015) presentadas anteriormente. Para asignar una categoría de vulnerabilidad se utilizaron los datos de la simulación con probabilidad de excedencia de 750 años y una deposición máxima a una altura de columna eruptiva de 4500 msnm.

Tabla 18

Clasificación de vulnerabilidad en estructuras/ viviendas

Clasificación POT		ESP	URB-Q1	URB-Q2	URB-Q3	URB-Q4	URB-Q5	URB-Q6	URB-Q7	RUR-CP
Clasificación Vulnerabilidad		Infraestructura /viviendas	Infraestructura/vivienda							Vivienda
Zona	Deposición máxima (mm)									
Chuicaracoj	48.75	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
Volcán Santa María	44.25	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
Tierra Colorada Alta	38.55	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
Xecaracoj	34.83	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
Tierra Colorada Baja	28.53	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
Xepache	28.39	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
Zona 12	28.31	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
Llanos del Pinal	27.70	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
Chitux	26.36	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
Candelaria	23.25	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
Zona 10	23.22	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
Chuicavioc	21.73	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
Zona 9	21.62	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
Bella Vista	20.53	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
Chilajú	20.50	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
Chicua	19.75	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
Xetuj	19.66	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
Zona 1	19.15	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
Las Majadas	18.45	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
Zona 4	18.05	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
Zona 3	17.83	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
Zona 8	17.72	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
Zona 2	17.64	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
Zona 7	16.18	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
Zona 5	15.53	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
Zona 6	15.45	D1	D1	D1	D1	D1	D1	D1	D1	D1
Chiquilajá	13.21	D1	D1	D1	D1	D1	D1	D1	D1	D1
Zona 11	13.15	D1	D1	D1	D1	D1	D1	D1	D1	D1
Chichiuhitán	12.85	D1	D1	D1	D1	D1	D1	D1	D1	D1

Mapa de vulnerabilidad de infraestructura/ vivienda

Deposición máxima en mm de columna eruptiva a 4500 msnm

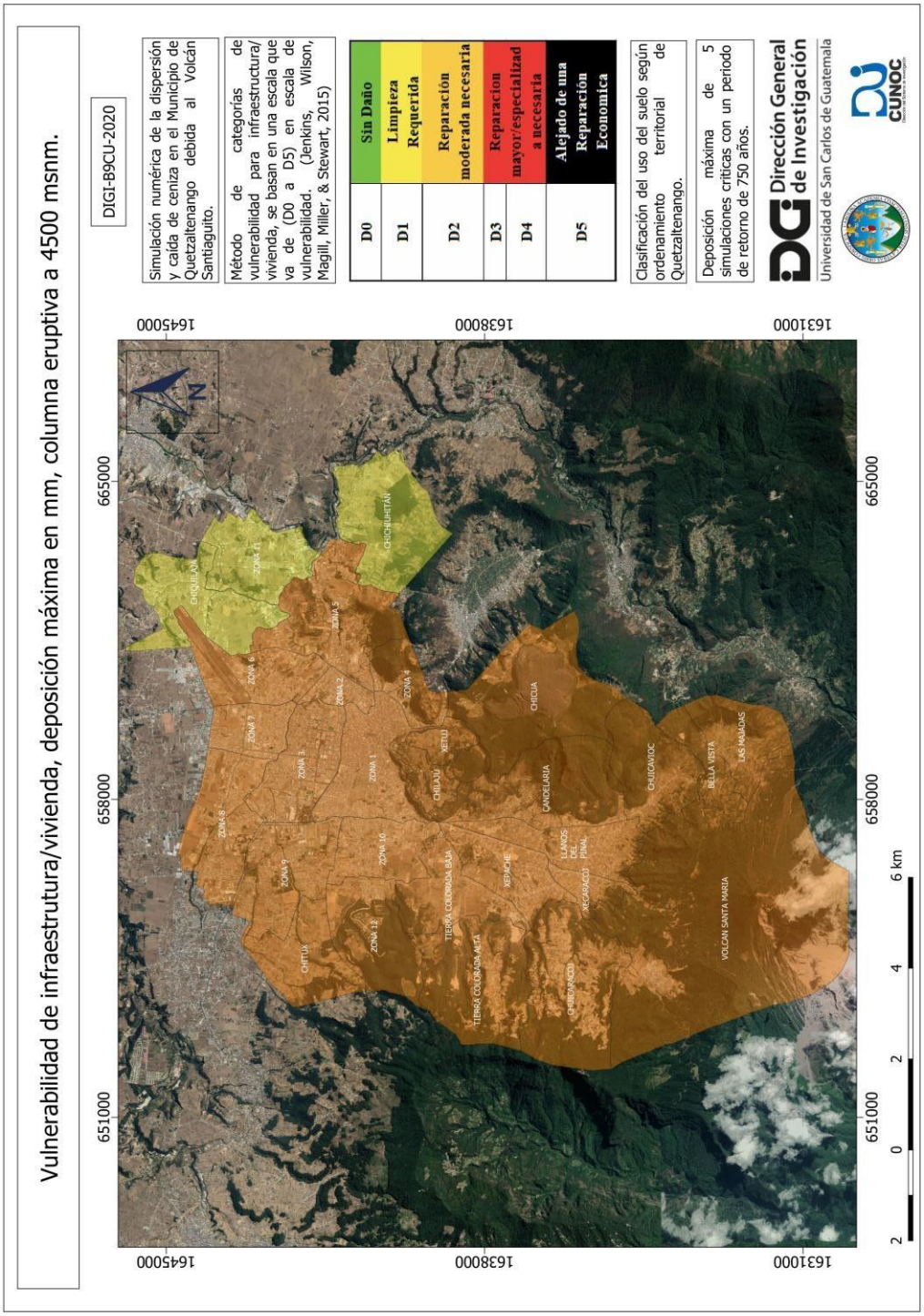


Tabla 19

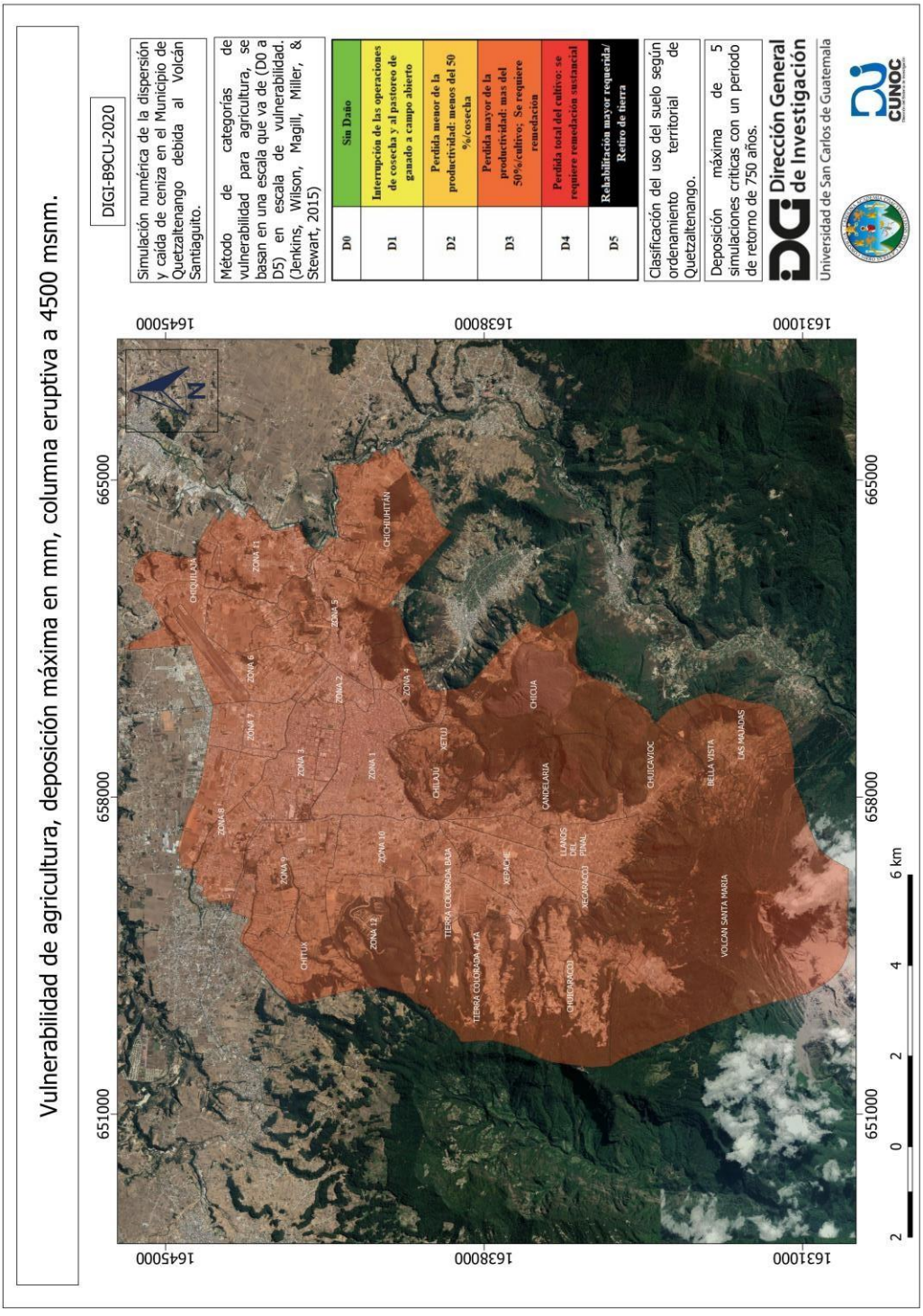
Clasificación de vulnerabilidad en silvicultura y agricultura

Clasificación POT		URB-PRO	FOR-CO	FOR-PRD	FOR-SIGAP	FOR-REE	RUR-AGR	RUR-CM
Clasificación Vulnerabilidad		Silvicultura			Silvicultura		Agricultura	
Zona	Deposición máxima (mm)							
Chuicaracoj	48.75	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Volcán Santa María	44.25	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Tierra Colorada Alta	38.55	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Xecaracoj	34.83	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Tierra Colorada Baja	28.53	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Xepache	28.39	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Zona 12	28.31	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Llanos del Pinal	27.70	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Chitux	26.36	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Candelaria	23.25	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Zona 10	23.22	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Chuicavioc	21.73	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Zona 9	21.62	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Bella Vista	20.53	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Chilajú	20.50	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Chicua	19.75	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Xetuj	19.66	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Zona 1	19.15	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Las Majadas	18.45	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Zona 4	18.05	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Zona 3	17.83	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Zona 8	17.72	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Zona 2	17.64	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Zona 7	16.18	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Zona 5	15.53	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Zona 6	15.45	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Chiquilajá	13.21	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Zona 11	13.15	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3
Chichiuhitán	12.85	D2	D2	D2	D2	D2	D3	D3

Fuente: elaboración propia con clasificación de Jenkins, Wilson, Magill, Miller, & Stewart, 2015.

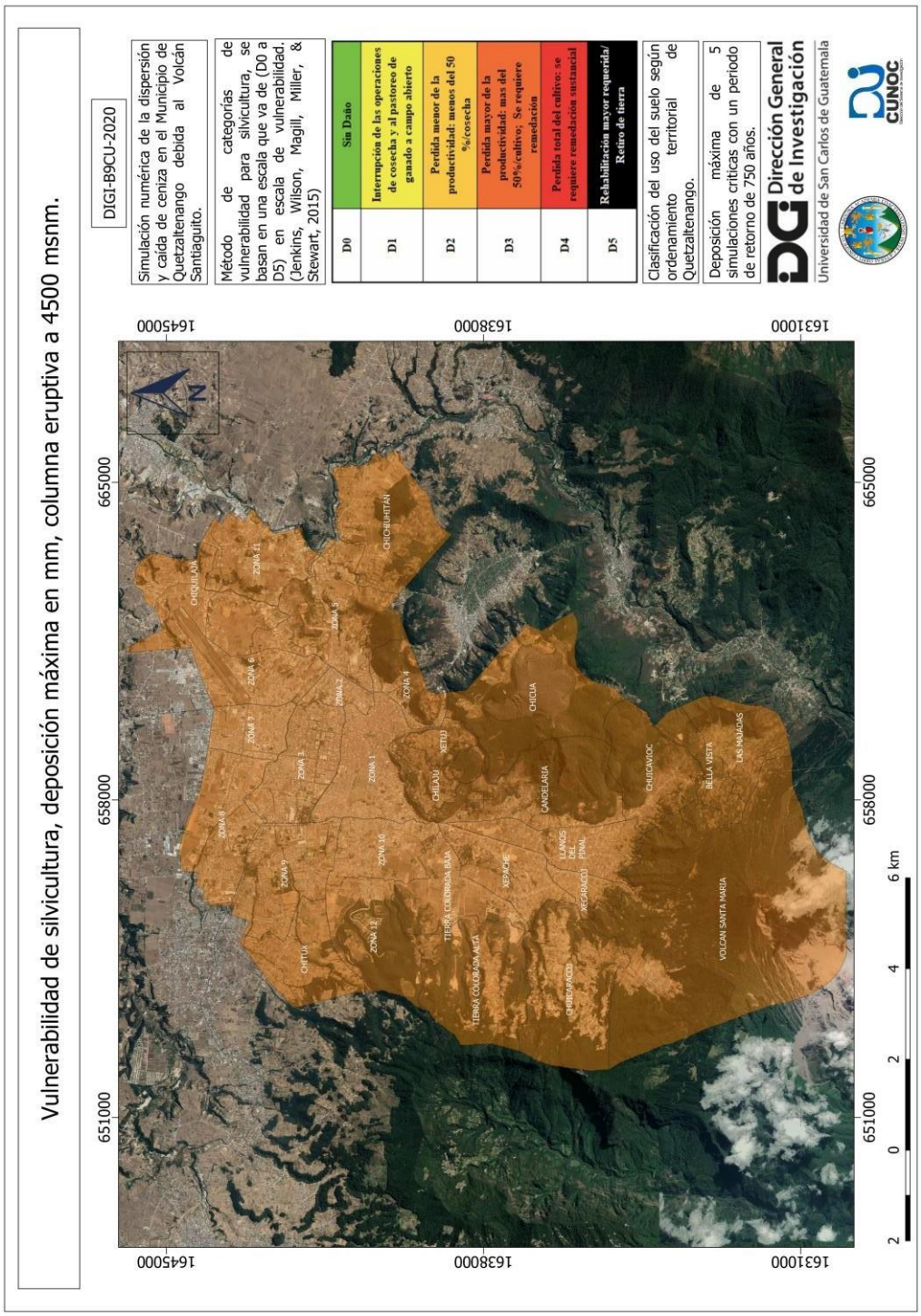
Mapa de vulnerabilidad de agricultura

Deposición máxima en mm de columna eruptiva a 4500 msnm



Mapa de vulnerabilidad de silvicultura

Deposición máxima en mm de columna eruptiva a 4500 msnm



14. Conclusiones

- Se realizó una investigación de registros vulcanológicos en el observatorio OVSAN del volcán, pudiendo así encontrar los datos de máximas columnas eruptivas y estableciendo los valores de simulación para estas en 4500 msnm y 6500 msnm y el volumen eruptivo máximo de 4,631,493.024 m3, datos que fueron importantes en los procesos de simulación; Adicional se revisó lo ya recabado por diferentes investigaciones previas, destacando la de A.Wallace, D.Lamb & Angelisa (2019) en la que se determinaba la composición geoquimica y mineralógica de la ceniza.

- A través de la envolvente de 5 erupciones críticas simuladas en el software ASH3D del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), con información de registros históricos, dando como resultado una mayor deposición de la ceniza volcánica a una altura de columna eruptiva de 4500 msnm afectando principalmente a los cantones de Tierra Colorada Alta, Chuicaracoj y el área poblada del volcán Santa María-Santiaguito.

- Se generó un mapa de vulnerabilidad del municipio de Quetzaltenango a través de la metodología propuesta por Jenkins, Wilson, Magill, Miller, & Stewart (2015) en una escala de D0 a D5. Se separaron 3 categorías, siento estas infraestructura, silvicultura y agricultura, donde se determinó una vulnerabilidad D1 y D2 para infraestructura, D2 para silvicultura y D3 para la agricultura, siendo esta la actividad más golpeada en caso de una erupción coincidente con las condiciones meteorológicas de simulación.

15. Impacto esperado

Los resultados de la investigación presentan información relevante para las instituciones de respuesta a emergencias para poder priorizar zonas que deben de prepararse o generar medidas de mitigación para los posibles efectos sobre la infraestructura y agricultura, estas medidas reducen el impacto negativo a las comunidades cercanas y así también pérdidas económicas considerables.

Para los habitantes del municipio de Quetzaltenango, los resultados conforman también un aporte para el conocimiento del riesgo y de prepararse con medidas de mitigación en temas de salud, infraestructura y agricultura.

En el ámbito académico se resalta la generación de competencias en procesos de simulación y conocimiento de la amenaza volcánica en el Centro Universitario de

Occidente, esto abre las posibilidades de conformar redes académicas internas y con otras universidades y así considerar la planeación de sistemas de monitoreo volcánico para el complejo Santa María-Santiaguito.

16. Agradecimientos

A los técnicos meteorológicos Victor Bautista y Carlos Paiz de las estaciones meteorológicas Los Altos y Labor Ovalle del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) y al Alvaro Rojas del Observatorio del Volcán Santiaguito (OVSAN) por su apertura y disposición a colaborar con información

A los estudiantes Fabián López Tezó y Daniel Alberto Rodas de la carrera de Ingeniería Civil del Centro Universitario de Occidente de la Universidad de San Carlos de Guatemala que apoyaron en el procesamiento de datos y generación de mapas de amenaza

A la Msc. Ing. Mirna Montes, directora de DICUNOC por su acompañamiento en la ejecución, así como al Instituto de Investigaciones de la División de Ciencias de la Ingeniería por el apoyo en la planeación del proyecto.

17. Referencias

A.Wallace, P., D.Lamb, O., & Angelisa, S. D. (2019). Integrated constraints on explosive eruption intensification at Santiaguito dome complex, Guatemala. *Earth and Planetary Science Letters*.

Álvarez, J. A. (18 de Septiembre de 2012). Metodología para simular la dispersión de cenizas. *Revista Unimar*, 21.

Auker, M., Sparks, R., Siebert, L., & Crosweller, H. &. (2013). A statistical analysis of the global historical volcanic fatalities record. *Journal of Applied Volcanology*, 1-24.

Brown, R. B., & C. & Durant, A. (2011). A review of volcanic ash aggregation. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 14. Elsevier*.

Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2017). *Los Peligros de la ceniza para la salud.* Obtenido de Los peligros de la ceniza para la salud: http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/208-LOSPELIGROSDELASCENIZASVOLCNICASPARALASALUD.GUAPARAELPBLICO.PDF

Costa, & A., M. (2005). A computer model for volcanic ashfallout and assessment of subsequent hazard. *Computers & Geosciences*.

Costa, A., Macedonio, G., & Folch, A. (2006). *A three-dimensional Eulerian model for transport and deposition of volcanic ashes.* Obtenido de Earth and Planetary Science Letters: doi:10.1016/j.epsl.2005.11.019

Fall3d. (6 de Febrero de 2012). *Centro de Supercomputación de la Universidad de Barcelona, Modelo Fall3D.* Obtenido de http://www.bsc.es/projects/earthscience/fall3d/

INSIVUMEH. (2018). *Volcán Santiaguito.* Obtenido de Volcán Santiaguito: http://www.insivumeh.gob.gt/?page_id=401

INSIVUMEH. (2018). *Volcanes de Guatemala.* Obtenido de Volcanes de Guatemala: http://www.insivumeh.gob.gt/?page_id=401

Instituto Nacional de Sismología, V. M. (Enero de 2018). *El INSIVUMEH*. Obtenido de Historia vulcanológica de Guatemala: http://www.insivumeh.gob.gt/?page_id=401

Jenkins, S. F., Wilson, T. M., Magill, C. R., Miller, V., & Stewart, C. (2015). Volcanic ash fall hazard and risk. *Technical background papaer for the UN-ISDR Golbal Assesment Report on Disaster Risk Reduction*, 1-43.

Mastin, L. G., Eaton, A. R., & Lowenstern, J. B. (2014). Modeling ash fall distribution from a Yellowstone. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*.

Miranda, R. (14 de Mayo de 2016). Pobladores reportan caída de ceniza en dos departamentos. *Prensa Libre.*

Municipalidad de Quetzalteango. (2019). *Plan de ordenamiento territorial del municipio de Quetzaltenango y sus reformas 01-2019.* Quetzaltenango.

Newhall, C. G. (2002). Constructing event trees for volcanic crises. *Bulletin of Volcanology*, 3-20.

Paul A.Wallace, O. D. (2019). Integrated constraints on explosive eruption intensification at Santiaguito dome complex, Guatemala. *Earth and Planetary Science Letters*.

Ramírez, A. X. (2012). *Evaluación de la vulnerabilidad asociada a la amenaza del volcan de fuego.* Guatemala.

Scasso, R., Corbella, H., & Tiberi, P. (1994). Sedimentological analysis of the tephra from the 12–15 August 1991 eruption of Hudson volcano. . *Bulletin of Volcanology, 56*, 121-132.

Schwaiger, H., Denlinger, R., & Mastin, L. G. (2012). *Ash3d: a finite-volume, conservative numerical model for ash transport and tephra deposition.* Journal of Geophysical Research.

Simkin, T., Siebert, L., & Blong, R. (2001). DISASTERS: Volcano fatalities- lessons from the historical record. *Science*, 291.

Sparks, R., Woods, A., Bursik, M., C. S., Sigurdsson, H., Glaze, L., & Gilbert, J. (1997). Volcanic Plumes.

Suzuki, T. (1983). A theoretical model for dispersion of tephra. Tokyo: Physics and Tectonics: Tokyo, Terra Scientific Publishing Company,.

USGS. (Mayo de 2009). *Ash properties & dispersal by wind.* Obtenido de http://volcanoes.usgs.gov/ash/properties.html

USGS. (Marzo de 2010). *Volcano Hazards Program Site.* Obtenido de htpp://volcanoes.usgs.gov/ash/build/

Ventura, C. (25 de Septiembre de 2016). Ceniza del Santiaguito vuelve a caer sobre Xelajú. *Prensa Libre*.

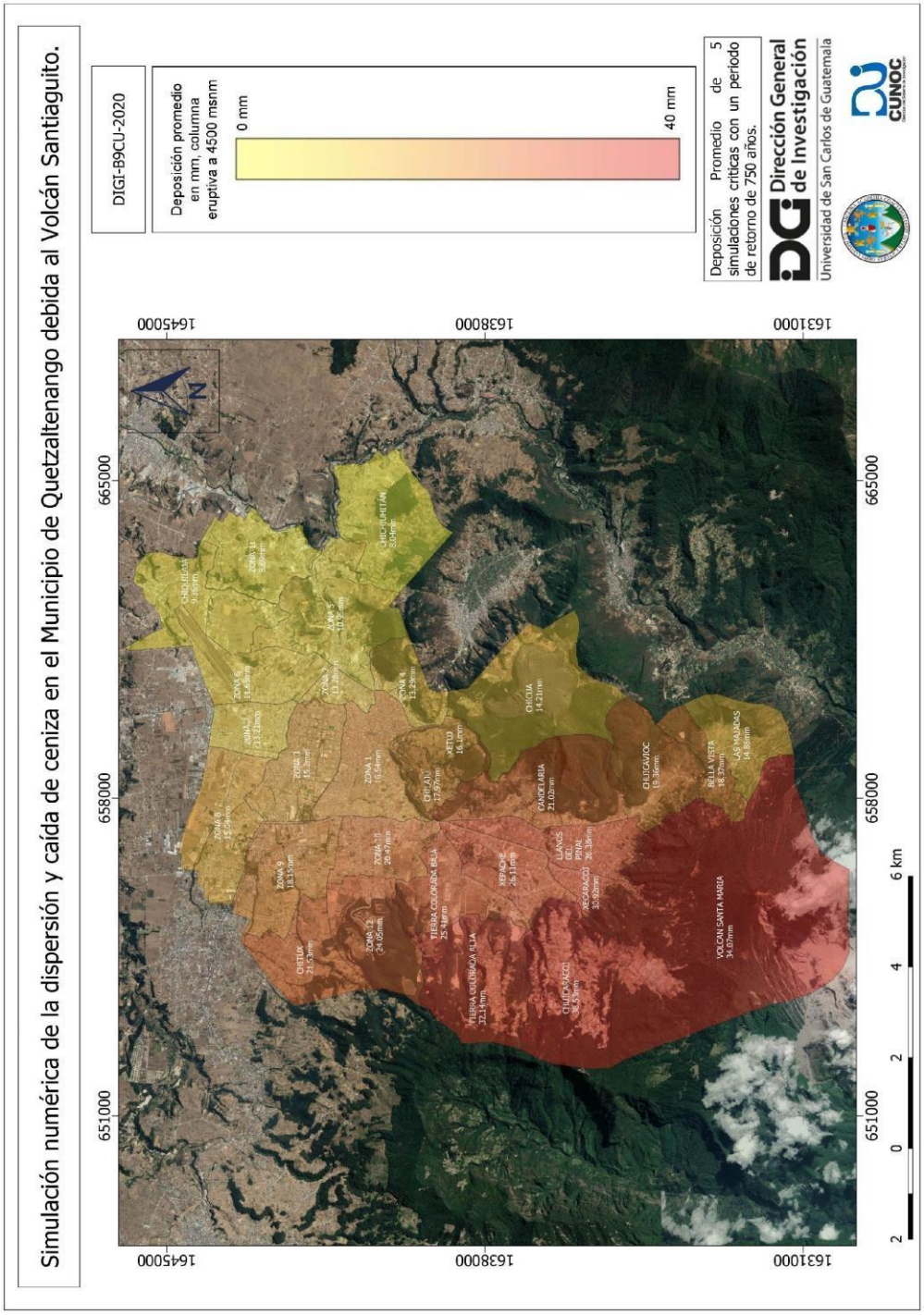
Wilson, L., & Huang, T. C. (1979). The influence of shape on the atmospheric settling velocity of volcanic ash particles. Earth and Planetary Science Letters.

Witham, C. S. (2005). Volcanic disasters and incidents: A new database. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 191-233.

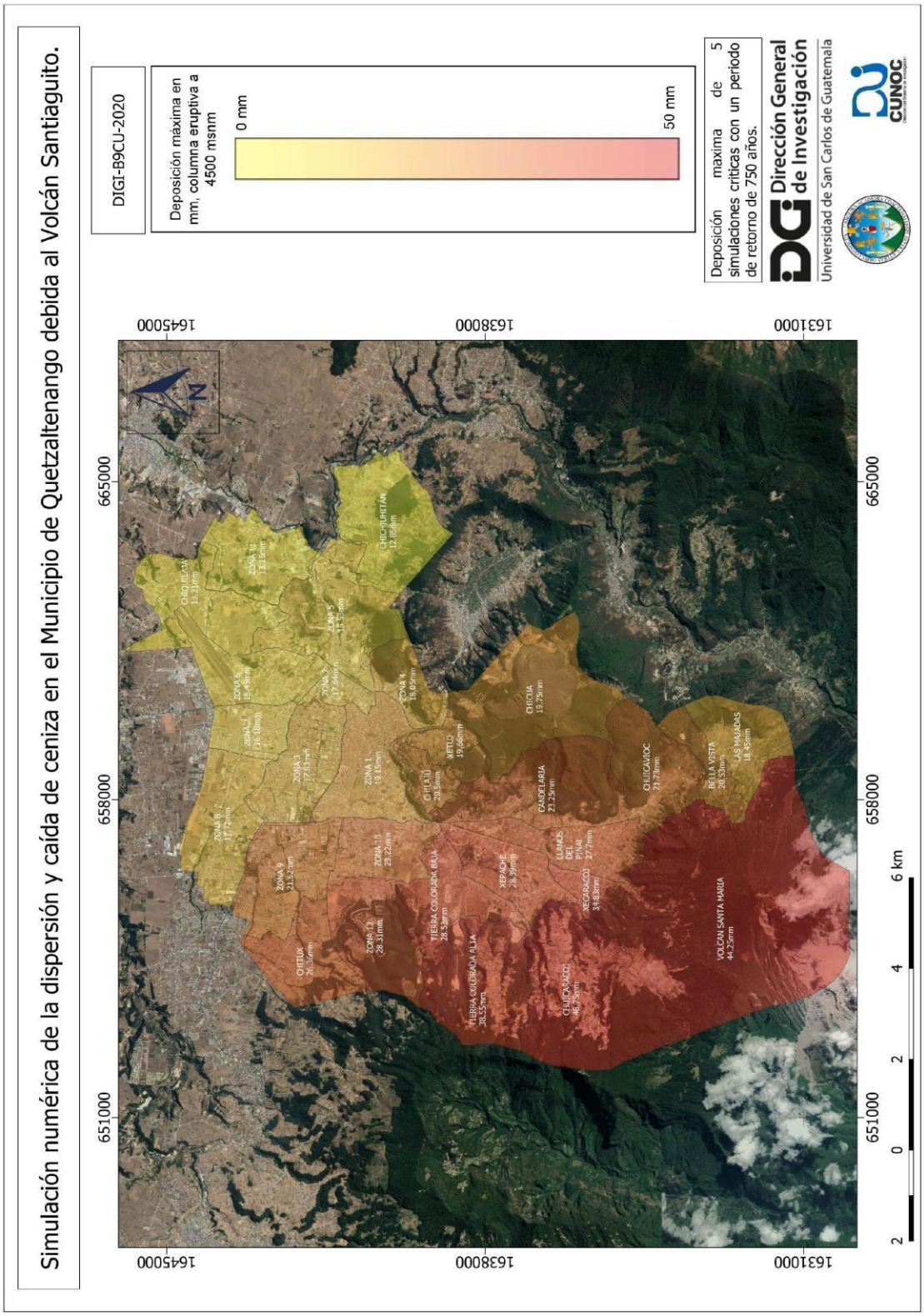
18. Apéndice

Apéndice A: Mapas de deposición promedio y máxima a una altura de columna eruptiva de 4500 msnm y 6500 msnm.

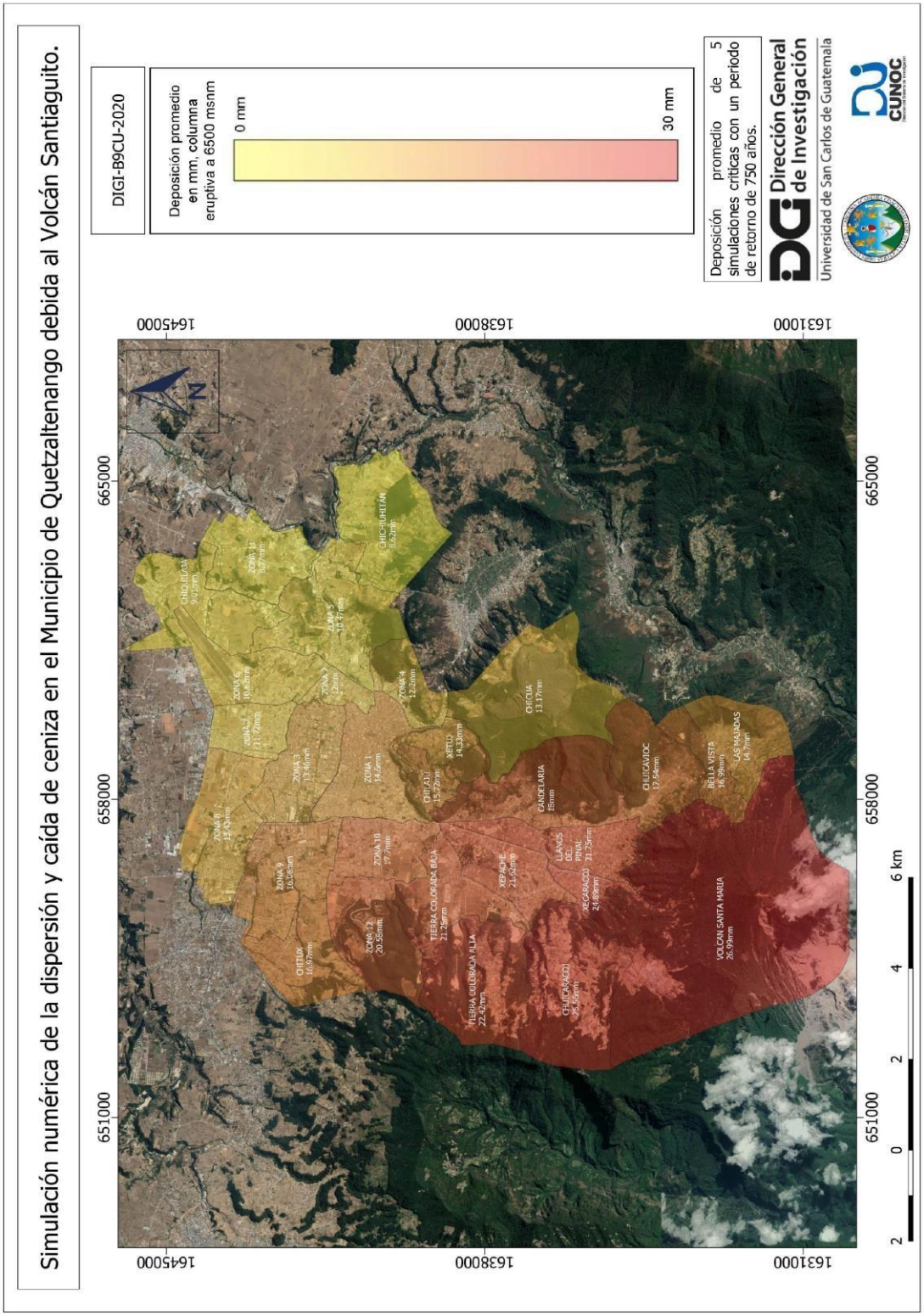
Mapa de deposición promedio, columna eruptiva a 4500 msnm.



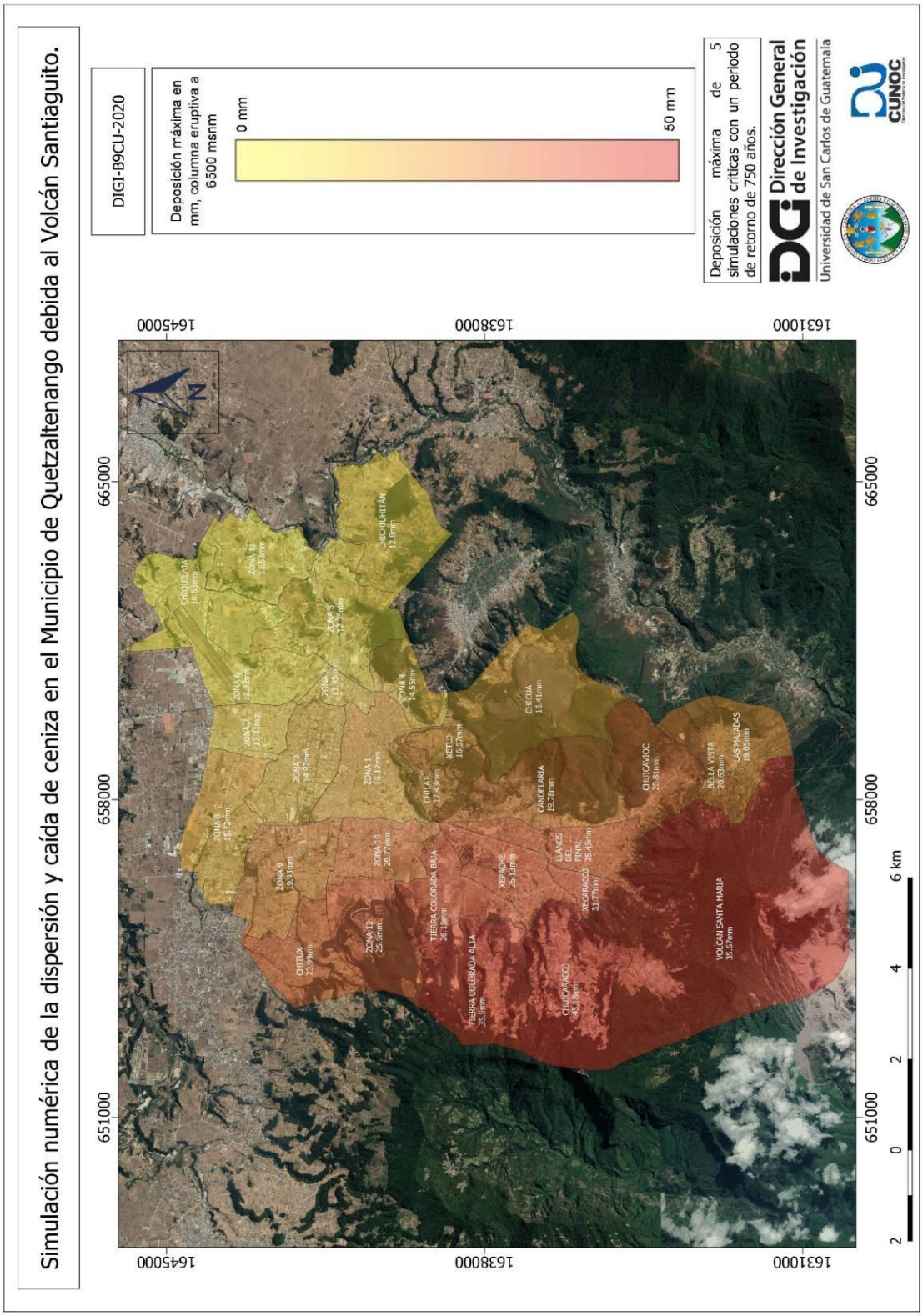
Mapa de deposición máxima, columna eruptiva a 4500 msnm.



Mapa de deposición promedio, columna eruptiva a 6500 msnm.

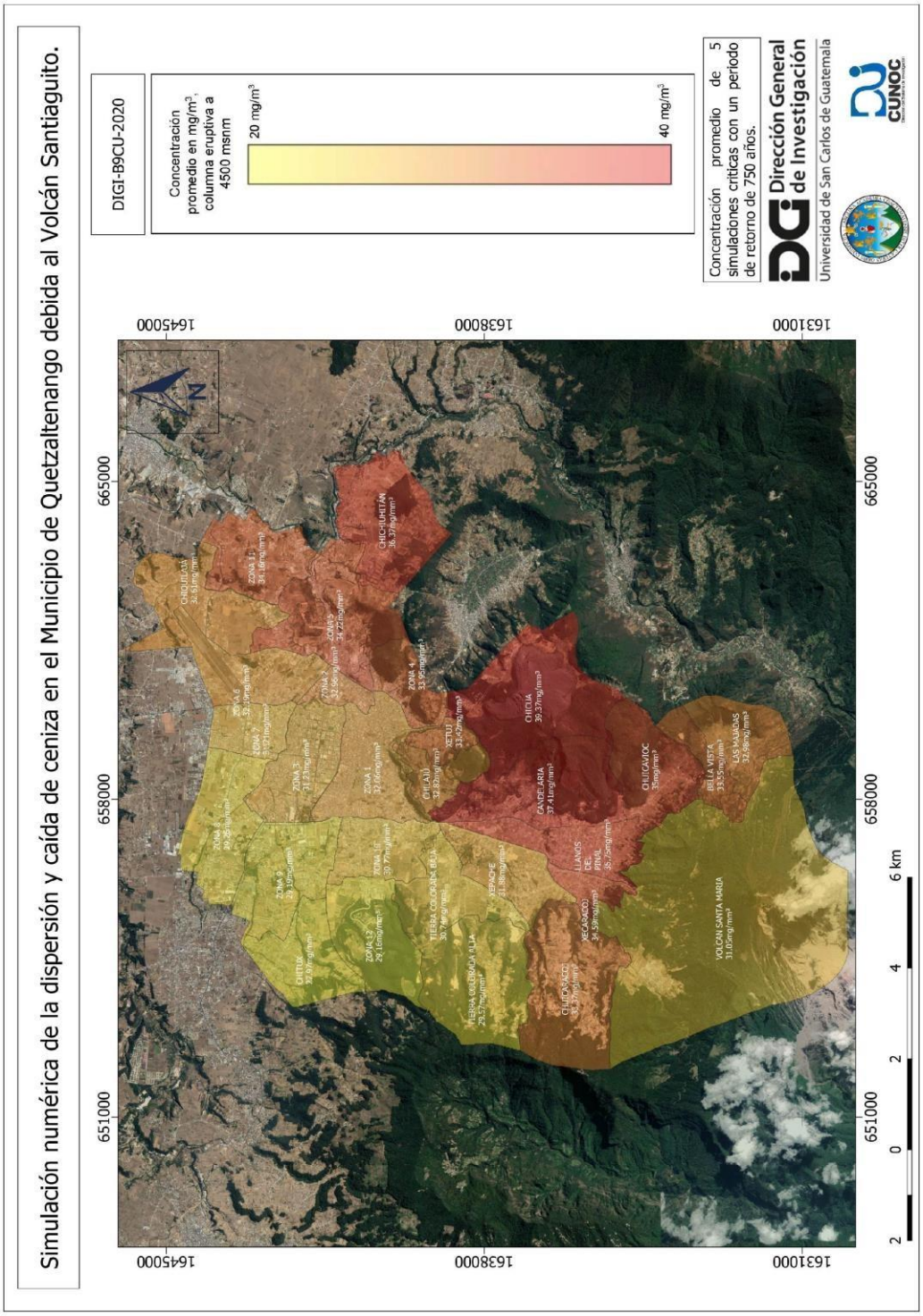


Mapa de deposición máxima, columna eruptiva a 6500 msnm.

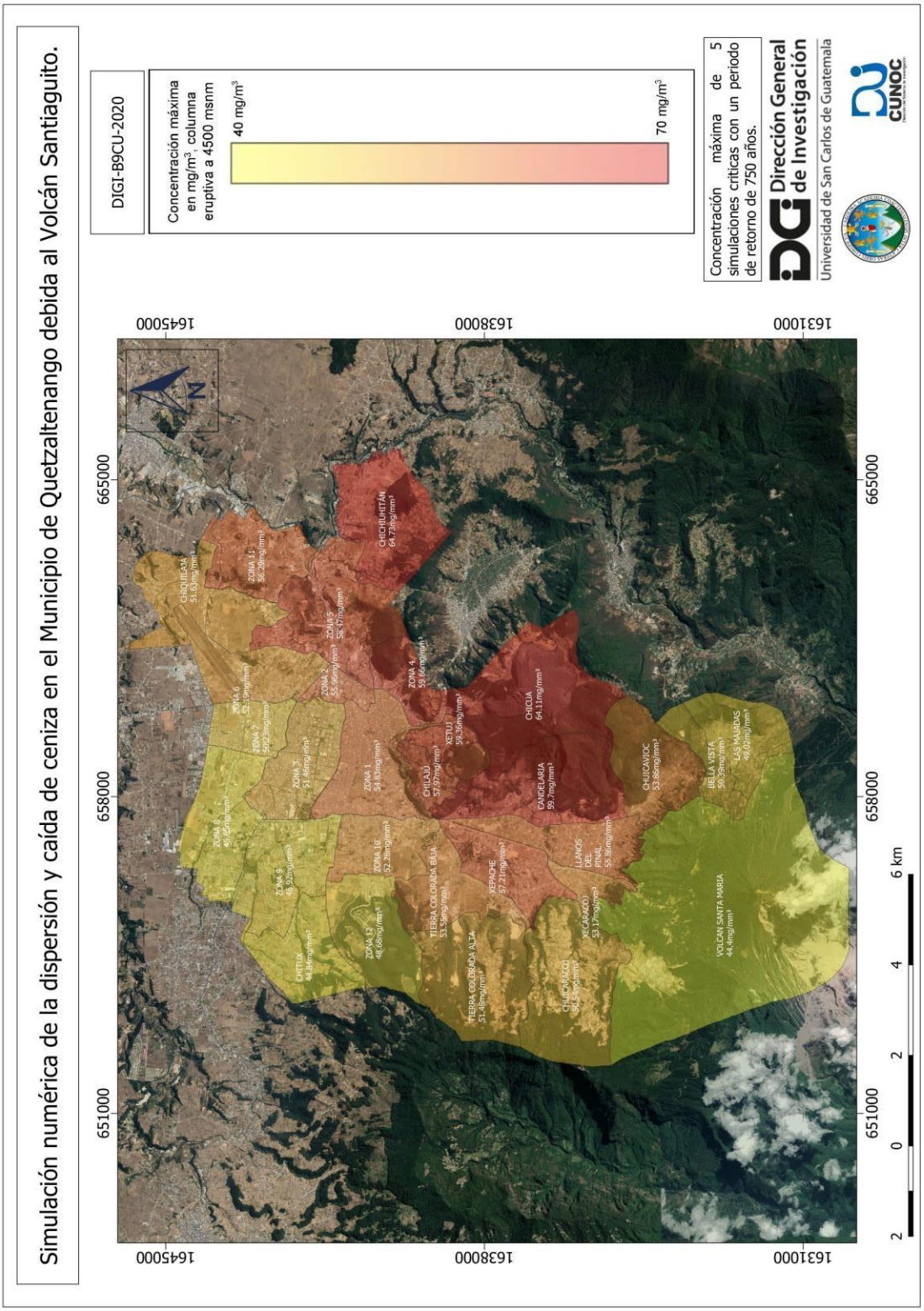


Apéndice B: Mapas de concentración promedio y máxima a una altura de columna eruptiva de 4500 msnm y 6500 msnm

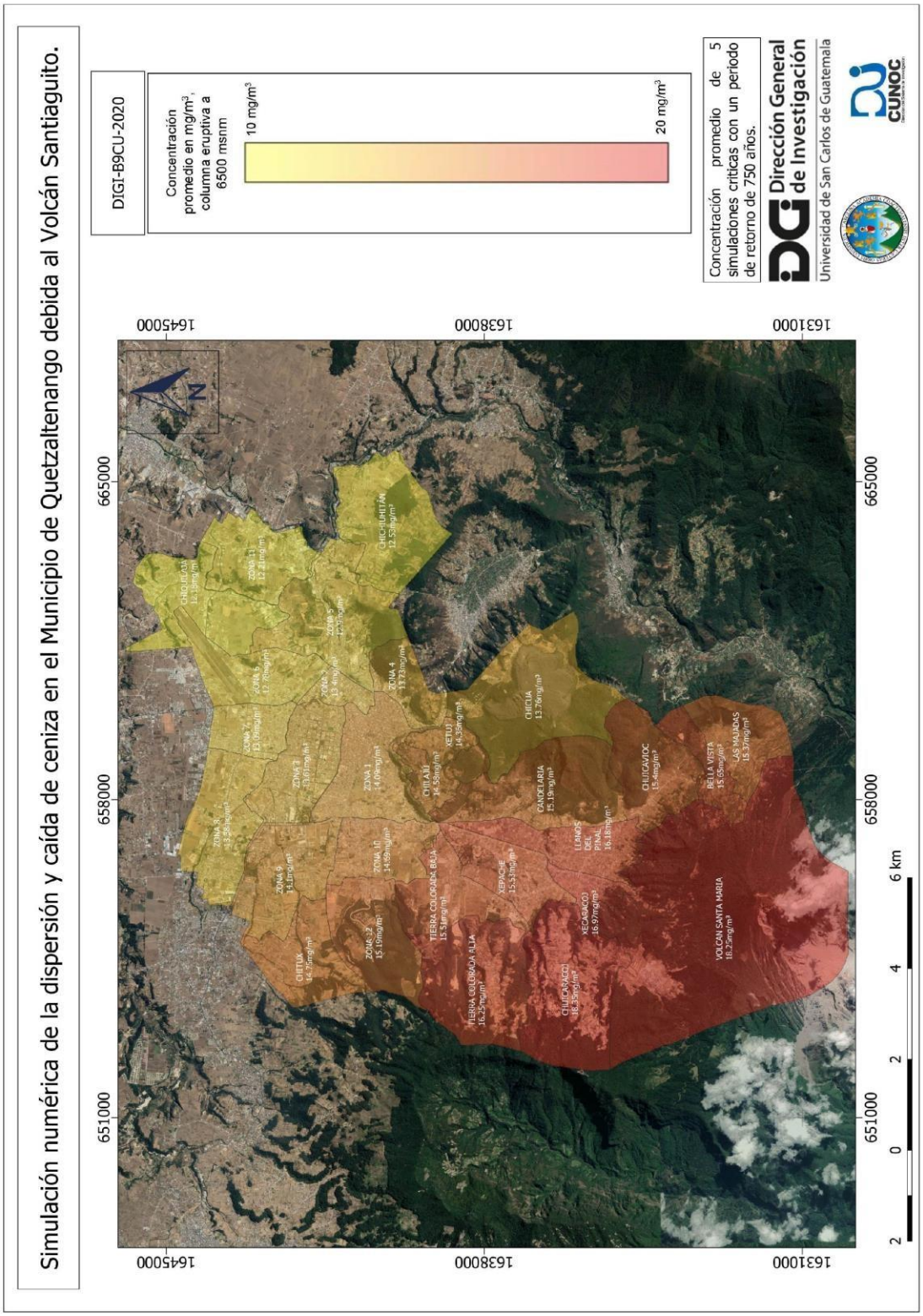
Mapa de concentración promedio, columna eruptiva a 4500 msnm.



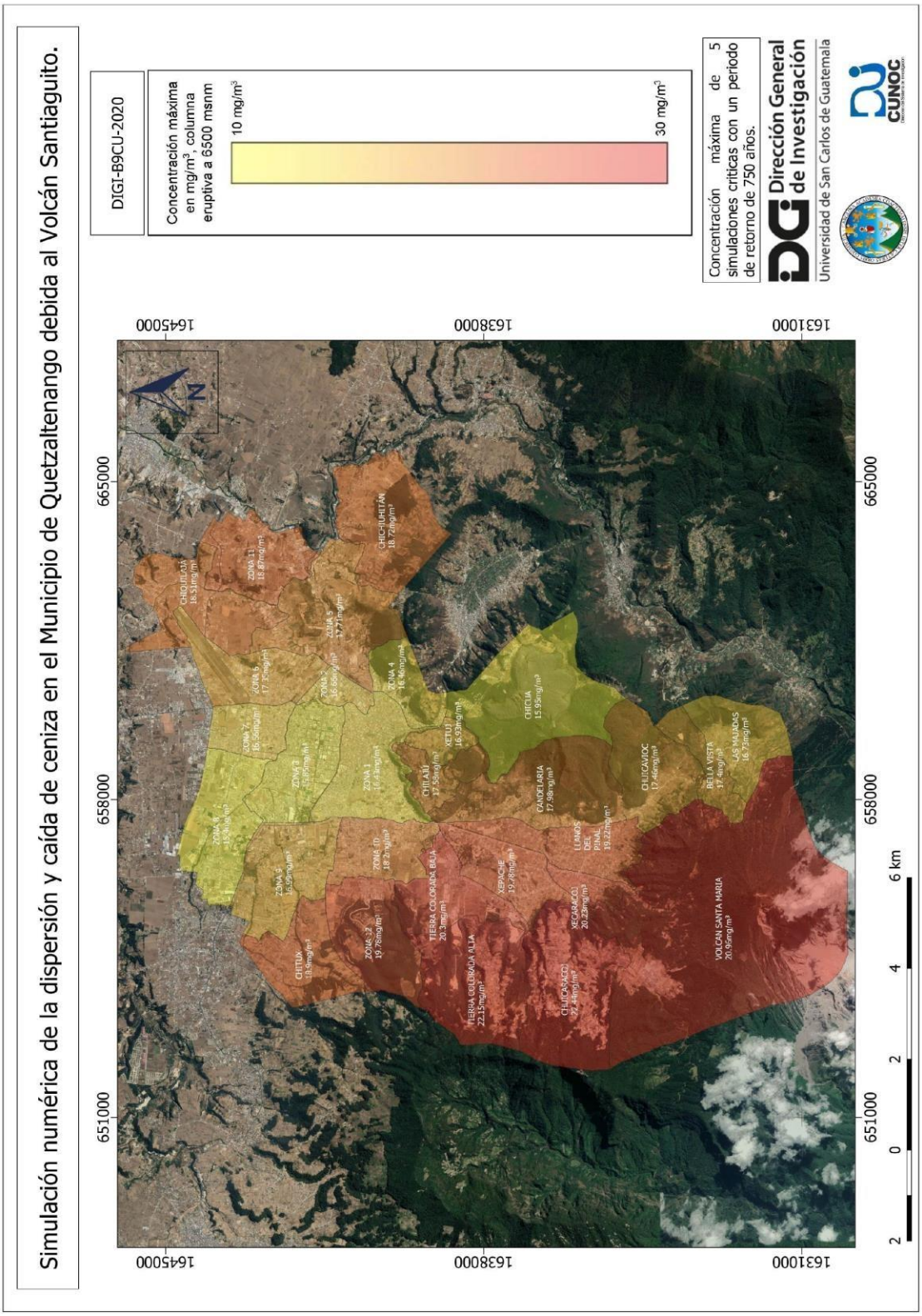
Mapa de concentración máxima, columna eruptiva a 4500 msnm.



Mapa de concentración promedio, columna eruptiva a 6500 msnm.

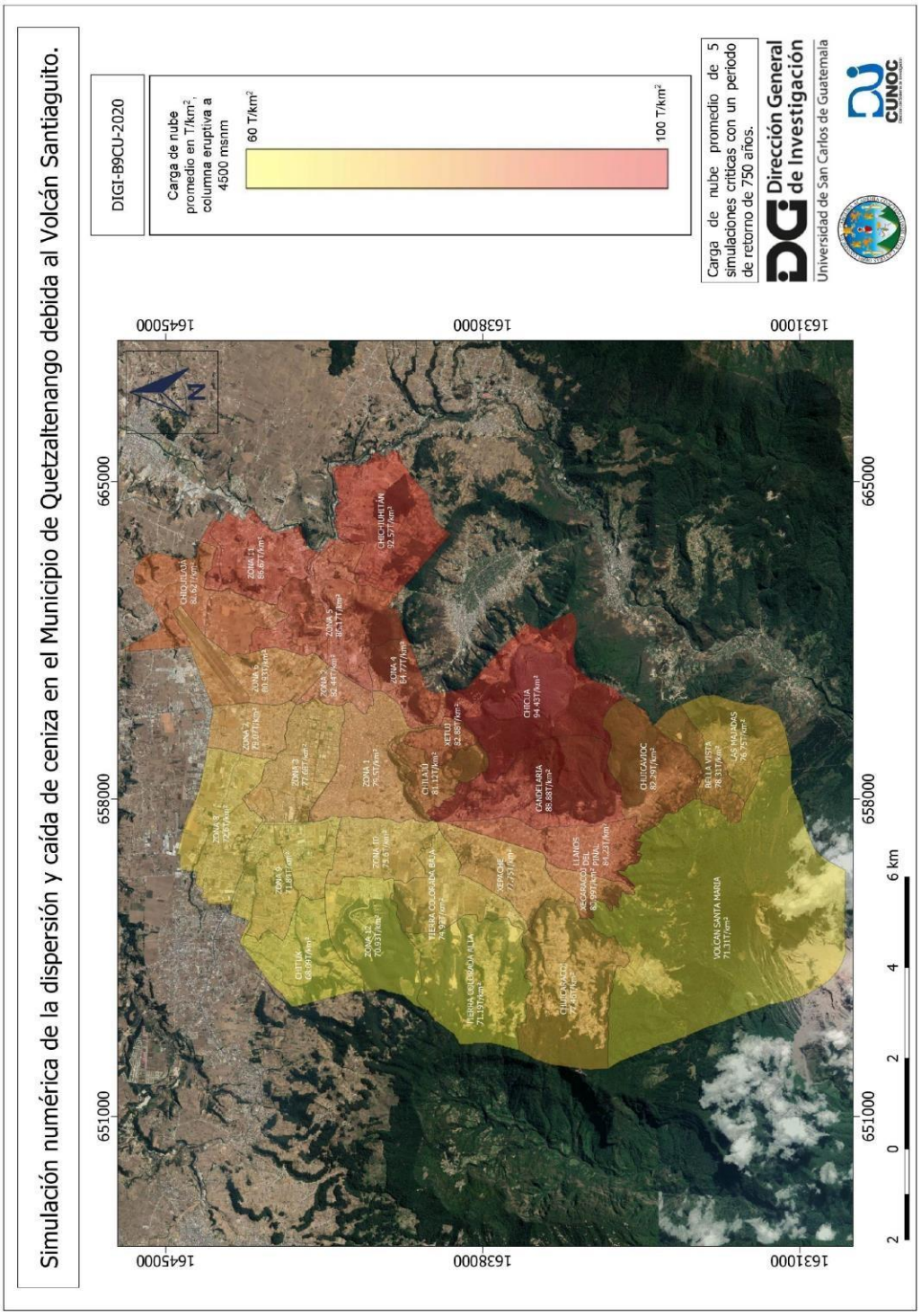


Mapa de concentración máxima, columna eruptiva a 6500 msnm.

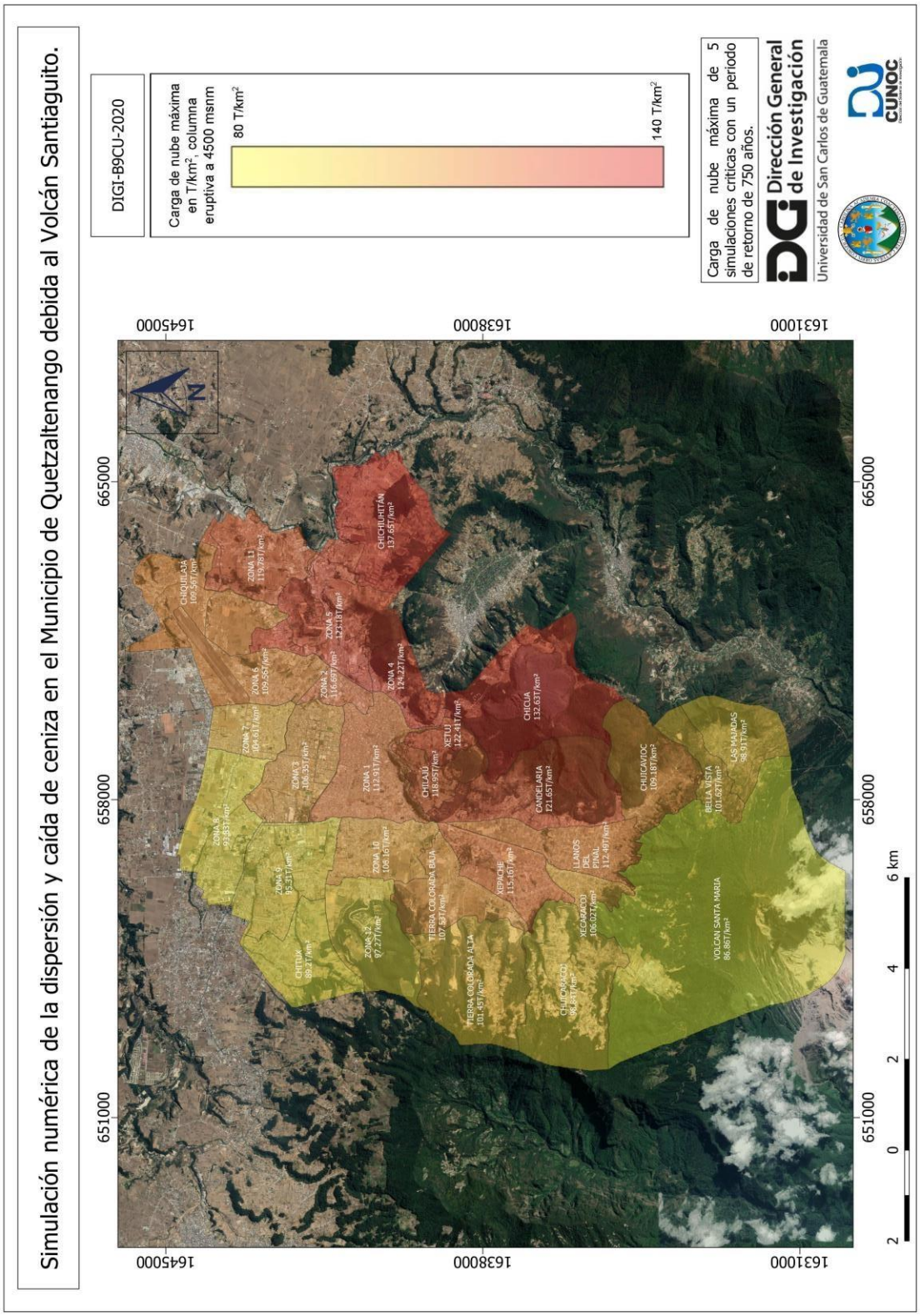


Apéndice C: Mapas de carga de nube promedio y máxima a una altura de columna eruptiva de 4500 msnm y 6500 msnm

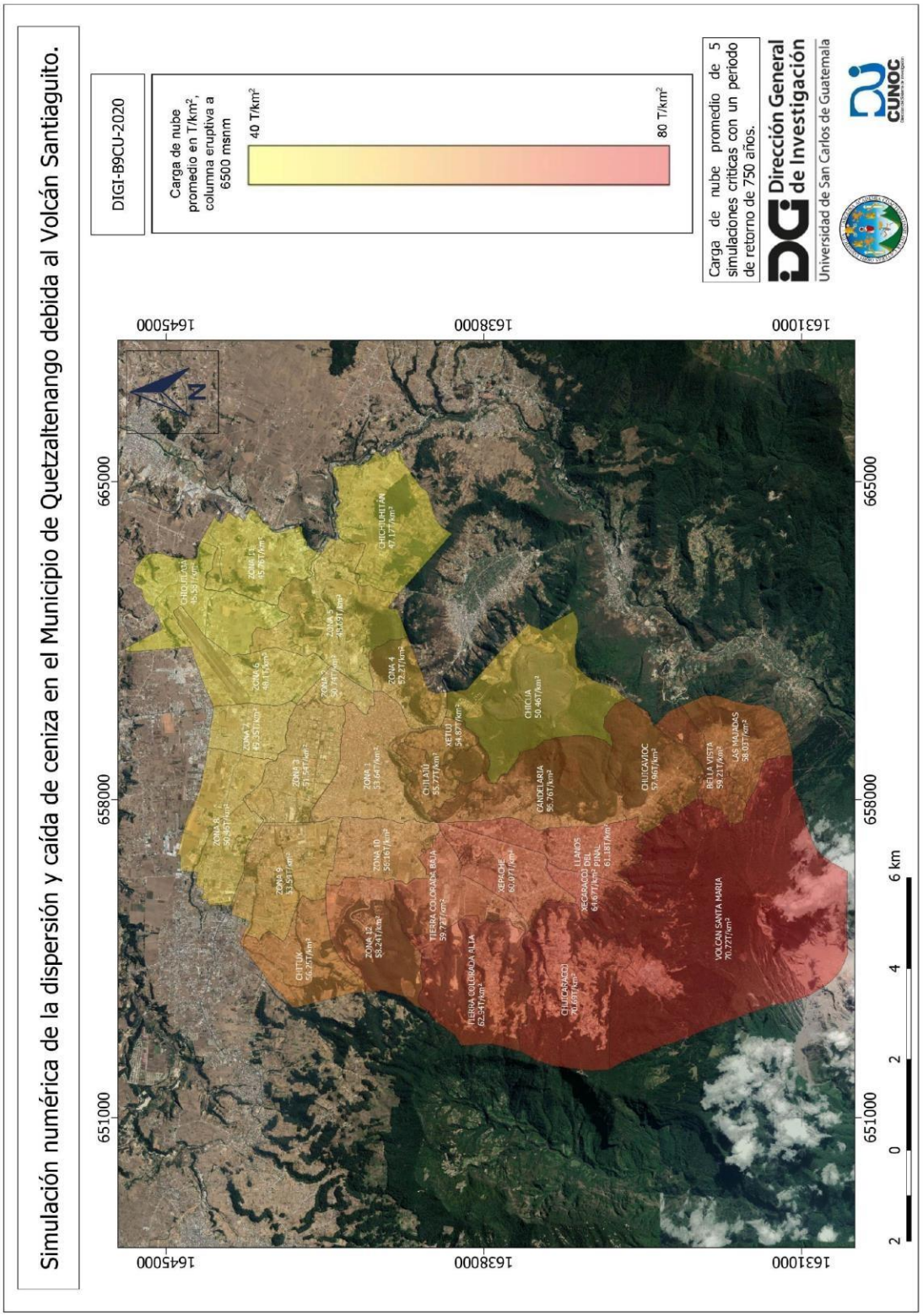
Mapa de carga de nube promedio, columna eruptiva a 4500 msnm.



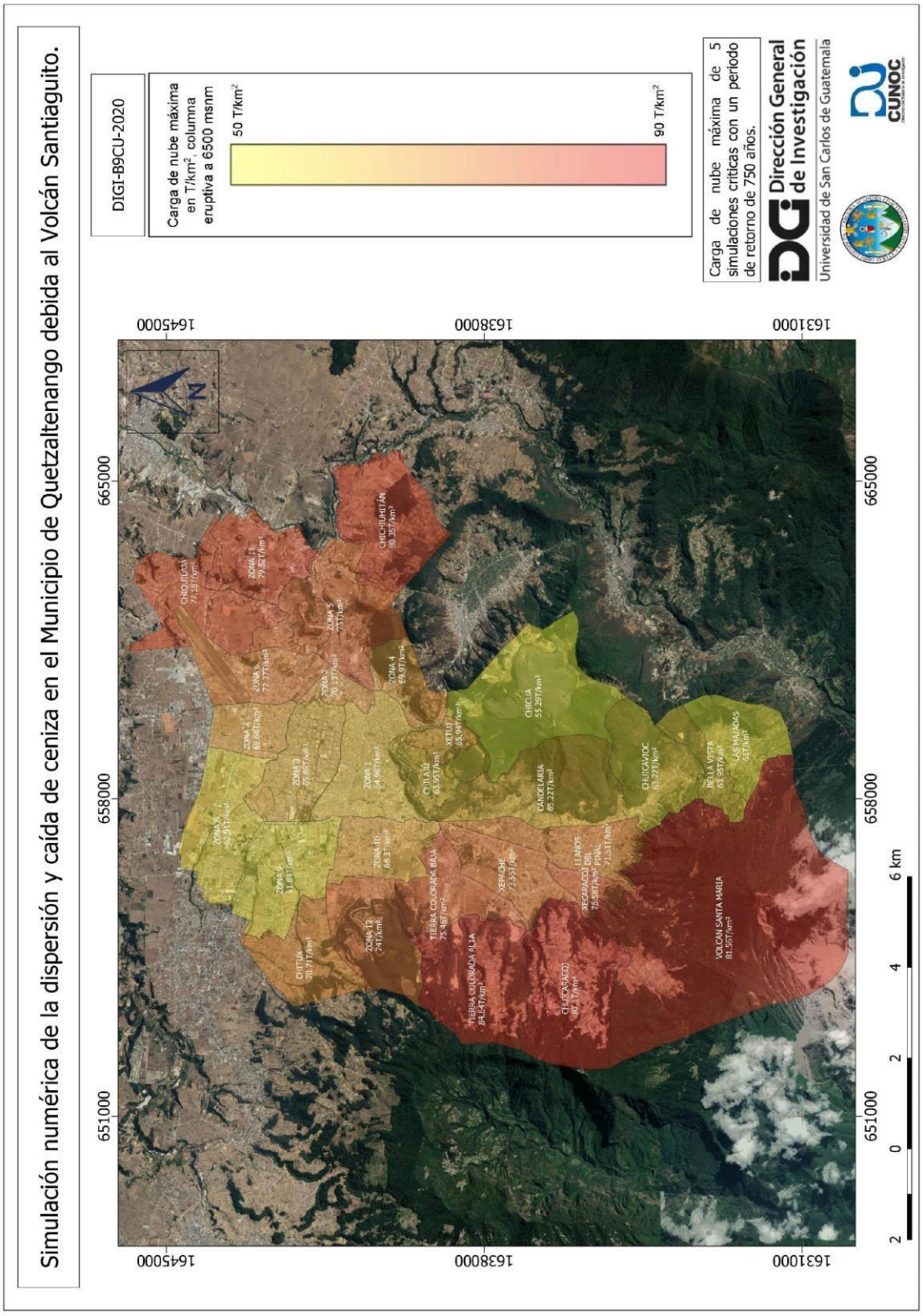
Mapa de carga de nube máxima, columna eruptiva a 4500 msnm.



Mapa de carga de nube promedio, columna eruptiva a 6500 msnm.



Mapa de carga de nube máxima, columna eruptiva a 6500 msnm.



Listado de los integrantes del equipo de investigación (en una sola hoja)

Contratados por contraparte y colaboradores

Nombre	Firma
Eddie Omar Flores Aceituno	

Contratados por la Dirección General de Investigación

Nombre	Categoría	Registro de Personal	Pago		Firma
			SI	NO	
Mario Luis Cifuentes Jacobs	Coordinador	20170184	X		
Melissa Liseth Villatoro Celada	Auxiliar I	20200790	X		
Juan Adolfo Orozco Coloma	Auxiliar I	20200750	X		
Cristian Alejandro Navarro Guitz	Auxiliar I	20180729	X		

Guatemala 30 de octubre de 2020.

Ing. Mario Luis Cifuentes Jacobs
Coordinador
Proyecto de Investigación

Lic. León Roberto Barrios Castillo
Coordinador
Programa Universitario en Educación

Ing. Agr. MARN Julio Rufino Salazar
Coordinador General de Programas

Guatemala, 30 de octubre de 2020

Señor Director
Dr. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera
Director General de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Director:

Adjunto a la presente el informe final "**Simulación numérica de la dispersión y caída de ceniza en el Municipio de Quetzaltenango debida al Volcán Santiaguito"** con partida presupuestal 4.8.12.1.0., coordinado por el Ing. Mario Luis Cifuentes Jacobs y avalado por la Dirección General de Sistema de Investigación del Centro Universitario de Occidente (DICUNOC) de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Este informe final fue elaborado con base en la guía de presentación de la Dirección General de Investigación, el cual fue revisado su contenido en función del protocolo aprobado, por lo que esta unidad de investigación da la aprobación y aval correspondiente.

Así mismo, el coordinador(a) del proyecto, se compromete a dar seguimiento y cumplir con el proceso de revisión y edición establecido por Digi del **informe final y del manuscrito científico.** El manuscrito científico debe enviarse, por el coordinador(a) del proyecto, para publicación al menos en una revista de acceso abierto (*Open Access*) indexada y arbitrada por expertos en el tema investigado.

Sin otro particular, suscribo atentamente.

"Id y enseñad a todos"

Ing. Mario Luis Cifuentes Jacobs
Coordinador(a) del proyecto de investigación

Msc. Inga. Mirna Carolina Montes Santiago
Directora
Sistema General de Investigación
Centro Universitario de Occidente