



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTIMACIÓN DEL PELIGRO DE ERUPCIÓN
VOLCÁNICA EN MÉXICO: CASOS DEL VOLCÁN
POPOCATÉPETL, CITLALTÉPETL Y COLIMA**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

INGENIERA GEOFÍSICA

PRESENTA:

Diana Stephanie Ayala Rodríguez

Tutor:

Dr. Eduardo Reinoso Angulo

2011





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

En estas líneas quiero agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme dado la oportunidad de estudiar en esta que es una de las mejores Universidades, y más en específico a la Facultad de Ingeniería.

También quiero agradecer al Instituto de Ingeniería donde desarrollé habilidades complementarias y reforcé aquellas que aprendí durante la carrera, y en el que además pude colaborar de manera formal en un proyecto.

Por otro lado agradezco a mis amigos de la facultad y del Instituto los cuales siempre estuvieron apoyándome y dándome ánimos para concluir la carrera, me hicieron ver las cosas de una forma diferente y me dieron grandes momentos de diversión, más en especial agradezco al Ing. Ricardo Carlos Padilla una persona a la que quiero y admiro.

Por último doy gracias a mi familia que ha sido el sustento para realizar este logro y a mis profesores los cuales han dejado valiosas enseñanzas no solo en la vida profesional sino también en la personal y a ellos más que a nadie les debo lo que soy.

Contenido

Resumen	5
Introducción	6
Capítulo 1	
Antecedentes	
1.1 Marco Teórico	7
1.1.1 Tipos de Vulcanismo y Erupciones	7
1.1.2 Peligros Volcánicos	10
1.2 Trabajos Anteriores	11
1.2.1 Volcán Popocatepetl	11
1.2.2 Volcán Citlaltépetl	14
1.2.3 Volcán Colima	15
Capítulo 2	
Descripción de Eventos Ocurridos	
2.1 Descripción del Modelo	16
2.2 Caída de Ceniza	18
2.2.1 Volcán Popocatepetl	18
2.2.2 Volcán Citlaltépetl	24
2.2.3 Volcán Colima	30
2.2 Flujos Piroclásticos	38
2.2.1 Volcán Popocatepetl	38
2.2.2 Volcán Citlaltépetl	39
2.2.3 Volcán Colima	41
2.3 Flujo de Lava	44
2.3.1 Volcán Popocatepetl	44
2.3.2 Volcán Citlaltépetl	45
2.3.3 Volcán Colima	47
Capítulo 3	
Recopilación de Datos	
3.1 Patrones de Ocurrencia Eruptiva por Distribución de Poisson	49
3.2 Secuencia Eruptiva Poissoniana Dependiente del Tiempo	53
Capítulo 4	
Modelación del Peligro	
4.1 Caída de Ceniza	63
4.1.1 Volcán Popocatepetl	63
4.1.2 Volcán Citlaltépetl	65

4.1.3 Volcán Colima	67
4.2 Flujos Piroclásticos	69
4.2.1 Volcán Popocatepetl	69
4.2.2 Volcán Citlaltépetl	70
4.2.3 Volcán Colima	72
4.3 Flujo de Lava	73
4.3.1 Volcán Popocatepetl	73
4.3.2 Volcán Citlaltépetl	75
4.3.3 Volcán Colima	77
Capítulo 5	
Discusión y Conclusiones	79
Referencia	81

Resumen

A lo largo de la historia los volcanes han sido considerados como grandes amenazas para las personas que viven en las proximidades, a pesar de esto, poco ha sido lo que se ha descrito de los eventos que se han presentado. En nuestros días debido a la sobrepoblación el peligro de que suceda un evento eruptivo ha provocado que los investigadores fijen su atención a todo tipo de pérdidas que se lleguen a generar tanto humanas como materiales. Es por esto que en esta tesis se han generado escenarios de periodos de retorno de los volcanes Colima, Popocatepetl y Citlaltépetl, para determinar el área de afectación que podría suscitarse dependiendo del nivel de Índice de Explosividad Volcánica (VEI). En primer lugar se hace una comparación de los escenarios que se obtienen con el Programa ERN-Volcán diseñado por el Instituto de Ingeniería, con los generados por otros autores, tanto en caída de ceniza, flujos piroclásticos y flujos de lava, para comprobar la validez del programa y no tener duda sobre los resultados finales. Posteriormente se hace un análisis probabilístico en el que a partir de una distribución de Poisson se determinan los cambios en las tasas de ocurrencia y con lo cual se obtienen los periodos de retorno de cada volcán. Por último sabiendo cual es la probabilidad de que en un periodo de tiempo X suceda un evento de magnitud Y, se genera los posibles escenarios que delimitan las zonas de afectación.

Introducción

México se encuentra situado en una región con importante actividad volcánica. De los 3000 volcanes que aproximadamente tiene el país, 14 son considerados activos. Lo anterior hace evidente que existe un alto riesgo asociado, el cual irá aumentando con el continuo crecimiento de la población y de las áreas urbanas, particularmente aquellas ubicadas en la cercanía de volcanes activos. El país ha vivido experiencias recientes de volcanes que han presentado fases eruptivas importantes, algunas con consecuencias desastrosas (R. Quaas, 1995). Alguno de estos casos fueron: el Parícutín en 1943 y el Tacaná en 1986, por lo que de los volcanes más estudiados tenemos al Popocatepetl, Citlaltépetl y el Colima, el primero debido a su repentina actividad en el año 1994, en el cual pasó de su fase moderada a un estado de intensa actividad sísmica y fumarólica con grandes emisiones de gas y ceniza, el segundo debido a que en su historia eruptiva se han distinguido por grandes explosiones que provocan derrumbes gigantes con grandes zonas de afectación y el último por los varios episodios que ha tenido en los últimos años.

Las mejoras en las redes de monitoreo volcánico ha permitido realizar un mayor conocimiento de sus actividades, y con ello una mejor toma de decisiones para el manejo de emergencias producidas por la amenaza de erupción del Popocatepetl, Citlaltépetl (Pico de Orizaba) y el volcán de Colima.

En este trabajo, se usará el conocimiento que se tiene del comportamiento pasado de cada uno de los volcanes (estudios geológicos y registros históricos) para entender el funcionamiento actual. Dichos registros se utilizarán para la elaboración de mapas con los periodos de retorno de un evento a determinada magnitud, para los peligros volcánicos de caída de ceniza, los flujos piroclásticos y de lava, y así poder tener una visión de los diferentes escenarios y sus posibles zonas de afectación.

Capítulo 1

Antecedentes

1.1 Marco Teórico

1.1.1 Tipos de Vulcanismo y Erupciones

Un volcán se define como un sitio del cual sale material magmático o sus derivados, formando una acumulación que por lo general toma una forma casi cónica. Los volcanes tienen en su cumbre o en sus costados cavidades de forma aproximadamente circular llamadas cráteres.

Se dice que un volcán es activo, cuando existe magma fundido en su interior, o existe la posibilidad de recibir nuevas aportaciones de magma y por tanto mantiene el potencial de producir erupciones, pero generalmente se dice que un volcán está activo cuando presenta actividad eruptiva reciente.

Los volcanes de acuerdo a su tipo de vulcanismo pueden clasificarse en:

Monogénéticos: Es aquel en que la erupción ocurre durante una sola etapa, es decir, nacen, desarrollan una erupción que puede durar varios años, se extinguen y no vuelven a tener actividad.

Poligénéticos: Es aquel en el cual se forman edificios volcánicos por la acumulación de materiales emitidos por erupciones anteriores.

Es importante además mencionar que los volcanes dependiendo de a qué tipo pertenezcan nos proporcionan información sobre su actividad pasada. Estos tipos pueden ser:

Calderas: Depresiones circular o elíptica de 1 a 1000 km de diámetro, se forma cuando el magma se obtiene de un reservorio somero.

Cono Cinerítico: Es una montaña con laderas muy inclinadas y se forma debido a la acumulación de partículas y lava mezclada con gases. Tienen alturas entre 30 y 450m y generalmente son monogénéticos.

Maar: Son conos con cráteres muy grandes de bajo relieve que corta el nivel freático por lo que forma un lago en el fondo llamado "mare" y se forma por erupciones explosivas someras.

Volcán Escudo: es un volcán amplio con pendientes menores a 10° constituidas por erupciones de lava basáltica fluida.

Estratovolcán: Son volcanes con formas cónicas y pendientes pronunciadas, construidas a partir de erupciones de flujos de lava viscosa, flujos piroclásticos y tefra, generalmente estos volcanes tienen erupciones explosivas.

Domos: se forman por masas de lava relativamente pequeñas, presentan pendientes fuertes que tienden a derrumbarse y forman flujos de bloques y cenizas. También este tipo de volcán es característico de actividad explosiva y llegan a medir hasta 200m de diámetro y 500m de altura.

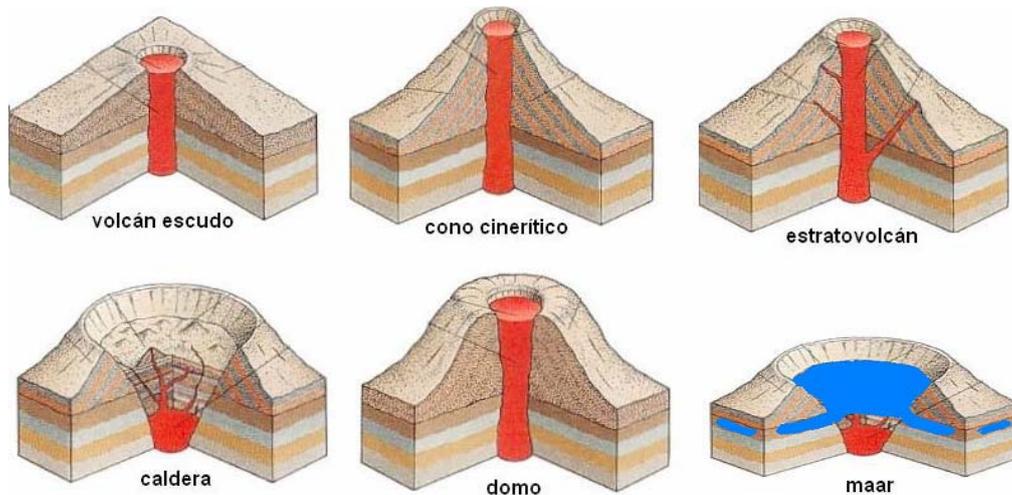


Figura 1.1 Tipos de volcanes (Tomado de la Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos, 2005)

Por otro lado los tipos de erupciones más conocidas son:

Erupción efusiva o Hawaiana: Es una erupción dominada por la salida continua de lava de baja viscosidad que puede formar flujos o ríos de lava. El gas se libera fácilmente. La extrusión puede durar minutos o días.

Erupción Estromboliana: Las erupciones estrombolianas están caracterizadas por una intermitente explosión o fuente de lava basáltica de viscosidad mayor a la Hawaiana, proviene de un solo cráter o fisura. Cada episodio de ésta obedece a la liberación de gases volcánicos, lo que ocurre, típicamente, cada varios minutos, algunas veces en forma rítmica y otras en forma irregular. Origina columnas eruptivas de hasta 10,000 m de altura.

Erupción Vulcaniana: La erupción vulcaniana es un tipo de erupción explosiva que lanza fragmentos de lava nueva que no toman una forma redondeada durante su viaje por el aire. Esto se debe a que la lava es muy viscosa o ya está solidificada. Producen columnas eruptivas de 10 a 20 km de altura, con velocidades iniciales de hasta 200 m/s.

Erupción Pliniana y Peleana: Las erupciones plinianas son grandes eventos explosivos que forman enormes columnas de tefra y gas que se elevan hasta la estratosfera (entre 20 y 45 km). Las emisiones son continuas y de magma viscoso.

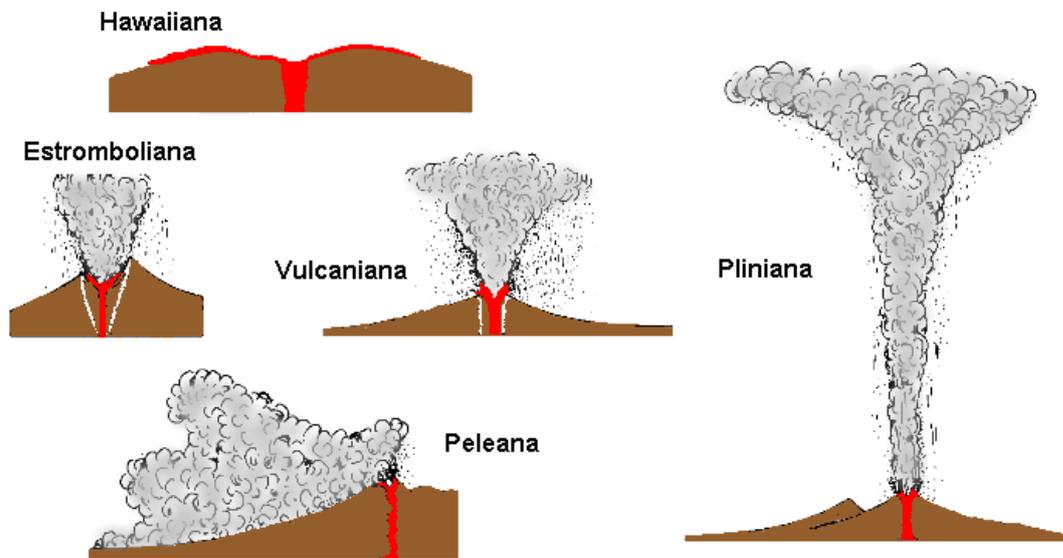


Figura 1.2 Tipos de erupciones

Actualmente, una de las formas más aceptadas de cuantificar las erupciones explosivas (forma que no es válida para las erupciones efusivas) es la escala del Índice de Explosividad Volcánica (VEI, por sus siglas en inglés). Esta escala fue definida por Newhall y Self en 1982, y es una escala compuesta en la que se toman en cuenta diversas características de una erupción.

Tabla 1.1 Índice de Explosividad Volcánica. Esquema de clasificación de Newhall y Self (1982). El catálogo de volcanes activos que se menciona es el de Simkin et al. (1981).

VEI	Descrip. Erupción	Vol. Pirocl.	h col. (km)	Clasificación					Duración (hr. expl. cont.)				Iny. Tropa.	Iny. Estra.
				Estro.	Plin.	Haw.	Vulc.	Ultra-Plin	<1	>12	1-6	6-12		
0	no explosiva	$<10^4$	$<0,1$			*			*				despreciable	no
1	pequeña	10^4-10^6	0,1-1	*		*			*				menor	no
2	moderada	10^6-10^7	1-5	*			*		*	*			moderada	no
3	moderada-grande	10^7-10^8	3-15		*		*		*	*	*		substantial	posible
4	grande	10^8-10^9	10-25		*		*		*	*	*		----	definitiva
5	muy grande	10^9-10^{10}	>25		*			*	*	*	*		----	significativa
6	-----	$10^{10}-10^{11}$	----		*			*	*	*	*		----	----
7	-----	$10^{11}-10^{12}$	----		*			*	*	*	*		----	----
8	-----	$>10^{12}$	----		*			*	*	*	*		----	----

1.1.2 Peligros Volcánicos

Los principales peligros volcánicos asociados a los volcanes pueden ser agrupados en las siguientes categorías (Macías, 1995):

1. *Peligros por eventos que involucran el flujo de materiales volcánicos.*

Lavas

Son flujos de material fundido e incandescente que siguen la morfología del terreno, avanzan a velocidades bajas y rara vez representan un peligro para la vida humana como son:

- a) Derrames de lavas
- b) Domos de lava

Flujos piroclásticos de densidad

Se refiere a flujos de materiales volcánicos generados por erupciones de tipo explosivo los cuales están compuestos por gases tóxicos y fragmentos de roca. Estos flujos viajan a grandes velocidades (200-300 km/hr) y por sus altas temperaturas destruyen y queman todo a su paso, su alcance está en función de la pendiente del volcán y generalmente es menor a 10-15 km. Se definen como:

- a) Flujos piroclásticos
- b) Oleadas piroclásticas “surges”
- c) Explosiones dirigidas “blast”

Flujos de lodo y sus transformaciones (lahares)

Un lahar es una mezcla de agua y una alta concentración de partículas que produce un flujo capaz de acarrear materiales de gran tamaño por grandes distancias, por ejemplo el Nevado del Ruiz, Colombia en 1985, el cual alcanzó 60 km.

Derrumbes gigantes (avalanchas de escombros)

Es el derrumbe de una parte del edificio volcánico debido a la intrusión de magma debajo del aparato volcánico o a la actividad sísmica intensa.

2. *Peligros por eventos de caída libre.*

Caída de Material Piroclástico y proyectiles balísticos

Son los materiales de caída libre, compuestos por fragmentos de lava vesicular, cristales y roca preexistente, son emitidos del cráter por erupciones de tipo explosivo ya sea de manera balística o verticalmente en la atmósfera para formar columnas de material volcánico que puede alcanzar varios kilómetros de altura.

1.2 Trabajos Anteriores

1.2.1 Volcán Popocatepetl

El volcán Popocatepetl es uno de los volcanes que ha registrado mayor actividad en los últimos años. A partir de 1993 las fumarolas que emitía fueron más sobresalientes que en años anteriores por los que varios científicos de la Universidad Nacional Autónoma de México crearon un Comité Científico Técnico para coordinar y dirigir las acciones de monitoreo y de instrumentación científica en el volcán. Dentro de este comité se reunieron especialistas en vulcanología y sismología los cuales para la crisis del 21 de diciembre de 1994 pudieron tener información más detallada del fenómeno eruptivo.

Uno de los trabajos más completos que se han llevado a cabo en cuanto a la actividad del volcán Popocatepetl y del periodo más activo, es: "Volcán Popocatepetl: estudios realizados durante la crisis de 1994-1995" realizado en conjunto por el Instituto de Geofísica y el CENAPRED. En este informe se tiene una recopilación de los antecedentes históricos, una descripción de la instrumentación empleada para el monitoreo y su ubicación, la zonificación de peligros volcánicos del Popocatepetl, aspectos geológicos, geofísicos, geoquímicos y de impacto atmosférico y aspectos de comunicación entre el grupo científico, las autoridades de protección civil y la población

Geología del Volcán Popocatepetl

El cono del Popocatepetl ha sido construido durante los últimos 23 000 años, tiene una elevación sobre el nivel del mar de 5472, una elevación con respecto a la topografía de la región de aproximadamente 3000 m.

Durante los últimos 20 000 años, la actividad explosiva del Popocatepetl ha sido caracterizada por cuatro eventos mayores, con producción de pómez de caída y flujos de ceniza (hace 14 000, 5000, 2150 y 1 100 años) y cuatro menos expuestos, ocurridos hace 11 000, 9 000, 7 000 y 1 800 años (Siebe et al., 1997; Siebe y Macías, 2004).

Los primeros estudiosos que reportan depósitos de avalancha en el Popocatepetl son Robin (1984) y Boudal (1987). Estos dos artículos se refieren casi en su totalidad a la última erupción del tipo Santa Elena en el Popocatepetl y mencionan la existencia de un último depósito que cubre amplias partes de la ladera sur del volcán. Estos autores no lograron obtener material orgánico que les permitiese fechar el depósito sin embargo lo estimaron entre 30 000 y 50 000 años atrás. Este depósito se calculó que tiene 300 km² y un volumen de 27.7 km³. El alcance máximo horizontal del depósito es de L=30 km. Estimaban una altura del volcán sobre el terreno de H=3,500m en un momento previo al derrumbe lo que da un coeficiente de fricción de H/L= 0.116 llegando a la conclusión de que este depósito debería ser catalogado como "gigante".

Estudios que se hicieron a partir de 1993 revelan que los resultados obtenidos por estos dos autores tienen que ser revaluados, puesto que algunos investigadores estiman que la distancia horizontal que alcanzó el depósito llega a L=75 km hacia el sur, y además de que no se trata de un solo depósito si no de al menos 4 depósitos de avalancha. Uno de ellos se encuentra en la ladera Este y cubre un área de aproximadamente 50 km² y alcanza espesores de más de 25 m en varios lugares. Desafortunadamente no hay muchos afloramientos de este depósito ya que la mayor parte

del mismo se encuentra cubierto por depósitos piroclásticos jóvenes provenientes del Popocatepetl.

Los mejores afloramientos que pueden verse están en los cortes de las carreteras federales que comunican Atlixco-Cholula y Atlixco-San Juan Tianguistengo. Este depósito tiene una edad de varios miles de años y probablemente se originó en el Iztaccihuatl. Ahí se puede observar un gran cráter en forma de herradura que forma las llamadas "Rodillas", un accidente topográfico en la parte sur del volcán. Este cráter tiene un diámetro de aproximadamente 1400 m y está abierto hacia el sureste, dirección hacia donde se encuentra el depósito de avalancha. Se piensa que el primer depósito pudo deberse a este cráter.

Los otros tres depósitos de avalancha relacionados son depósitos que se traslapan y cubren una superficie de al menos 600 km² y se encuentran en la vertiente sur del Popocatepetl. Muchos de los afloramientos están visibles en las barrancas que drenan el flanco sur y muestran dos o tres diferentes depósitos superpuestos, pero todos muy similares en su litología y estructura interna por lo cual son difíciles de distinguir. Estos depósitos alcanzaron un desplazamiento horizontal de más de L=70 km hacia el sur del volcán. Los científicos asumen que si la altura del cono es similar a la actual H=4 500 m se obtiene un coeficiente de fricción de H/L=0.0643, el cual es mucho menos que el valor promedio para este tipo de depósitos e implica que hubo una gran movilidad del material. De estos tres depósitos no es posible aun identificar los cráteres que los originaron pues han sido cubiertos por derrames gigantes de anteriores volcanes.

La estructura interna y textura de los depósitos por lo general son masivos con contactos inferiores bien definidos. Consisten de fragmentos de roca del antiguo edificio volcánico, incluyendo bloques de lava dacítica y andesítica, porciones de depósitos piroclásticos, y áreas alteradas hidrotermalmente. Los bloques que componen el depósito son más grandes en las porciones del depósito próximas al volcán, mientras que en las porciones distales son más pequeños. Los grandes bloques en las partes proximales muestran una típica estructura de "rompecabezas". (C. Siebe, M. Abrams y J. L. Macías, 1995)

El último derrumbe del Popocatepetl estuvo asociado a la erupción más violenta que se ha podido identificar en la historia del volcán. El derrumbe se llevo a cabo en el flanco sur, el cual generó un flujo turbulento o "blast" que produjo un depósito de varios metros de espesor a más de 10 km de distancia del cráter. El depósito cuenta con una alternancia de capas de gravas, arena y bloques de color rojizo a gris. Los fragmentos son angulares y las capas se caracterizan por tener estratificación cruzada y otras estructuras que indican emplazamiento por un flujo horizontal, turbulento y de poca densidad.

El 'blast' fue seguido por el emplazamiento de un depósito de pómez de caída el cual consta de fragmentos angulares de una pómez con fenocristales de biotita y alcanza espesores de varios metros. Por su distribución y dimensiones es el producto de la caída de fragmentos de una columna de tipo Pliniana. La erupción terminó con el emplazamiento de flujos de ceniza que se produjeron cuando la columna se colapsó y alcanzaron distancias de más de 30 km del volcán.

Geofísica del Volcán Popocatepetl

La cuantificación de los diferentes eventos sismo-volcánicos y sus cambios temporales tanto en número como en energía liberada se han utilizado para predecir erupciones volcánicas. A partir de la crisis que se generó debido a la reactivación del volcán Popocatepetl, durante el periodo del 21 de diciembre de 1994 al 30 de marzo de 1995, se clasificaron y cuantificaron los eventos sísmicos asociados, con el fin de determinar las diferentes variaciones de la actividad sísmica del volcán y para tratar de entender cuál fue el proceso que generó esta crisis y sus implicaciones al futuro (Valdés, 1995).

Con la instalación de 4 estaciones telemétricas PPC (Colibrí, Pue.), PPB (Bonzai, Pue.), LMVM (Loma del muerto, Méx) y SNPP (San Nicolás de los Ranchos, Pue.) y con la integración de las

estaciones PPM (Tlamacas, Méx.), PPA (Alzomoni, Méx.) y PPX (Chipiquixtle, Méx), se conformó La Red Sísmica del Volcán Popocatepetl, para monitorear de manera continua la actividad sísmica asociada al volcán. Con el análisis de los registros se logró clasificar los siguientes 4 tipos de eventos:

- **Tipo “A”:** Estos eventos son similares a los tectónicos con frecuencias típicas de 5 Hz y las fases de las ondas P y S son definidas con tiempos de fase S-P de 1.5 a 3 seg.; la duración de coda es menor a los 40 seg.

Estos eventos representan fallamientos y fracturamientos de corte, similares a los que se producen en los eventos tectónicos.

- **Tipo “B”:** Los periodos característicos de estos eventos se encuentran en el rango de 0.8 a 1.6 seg. La fase de la onda P es emergente y no es posible identificar la fase de onda S; la duración de la coda es menor a los 125 seg.
- **Tipo “AB”:** Estos eventos se caracterizan por tener componentes de altas y bajas frecuencias. Las altas frecuencias incluyen fases impulsivas de ondas P y S, con un tiempo S-P de 1.5 a 2 seg.; la duración de esta componente es de 5.5 seg. aproximadamente y las amplitudes de las ondas P y S son más pequeñas que la de los eventos Tipo “A”. Los periodos característicos de la componente de baja frecuencia son de 0.8 a 1.1 seg. y la duración de la coda de todo evento es menor a los 150 seg.
- **Tremor:** Este tipo de señal sísmica se debe a la oscilación o vibración continua de elementos del aparato volcánico. El tremor es comúnmente asociado a los eventos del periodo largo o Tipo “B” ya que los espectros de ambas señales son consistentes.

A partir de la crisis de 1994 se inicia la localización de los eventos que contenían primeros arribos claros en al menos tres de las estaciones que se instalaron en el volcán. Un total de 56 sismos fueron localizados usando sismogramas digitales para leer sus fases con una precisión de hasta 0.01 seg., aunque no en todas los eventos los arribos fueron tan claros como para permitir estas precisiones.

La magnitud de los sismos estudiados, fueron calculadas usando la formula $M_c = -0.09 + 1.85 \log(\tau) + 0.0004 \Delta$ en donde la duración de la señal en segundos y la distancia epicentral en kilómetros. Las magnitudes calculadas se encuentran entre 1.4 y 3.4 grados, con magnitud promedio de 2.36.

Las localizaciones hipocentrales (Figura 1.3) vistas en corte con orientación Oeste-Este muestran que la mayoría de los sismos se encuentran localizados en un volumen de 3.5 km de diámetro con un conducto cilíndrico de 1 km de diámetro y que conecta al volumen con el cráter. Los hipocentros de los eventos que definen este volumen son los que presentan errores menores en su localización, con excepción de los 3 sismos superficiales registrados.

Este volumen sugiere una cámara magmática con un techo a la cota del nivel del mar y un conducto angosto que comunica con el cráter. Proyectando los hipocentros en un corte Norte-Sur se observa que los sismos definen un volumen y un conducto similar al mencionado.

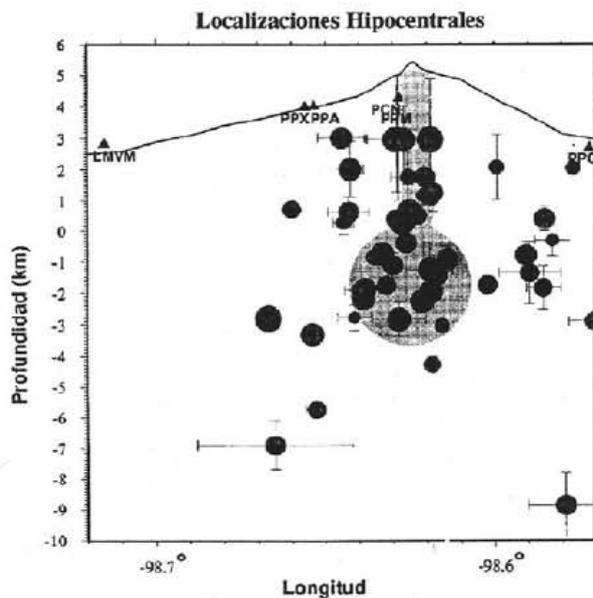


Figura 1.3 Sección Oeste-Este con las localizaciones hipocentrales (círculos oscuros). Las barras verticales y horizontales corresponden a los errores de localización. Las localizaciones sugieren una cámara magmática de 3 km de diámetro y un conducto de 4 km de largo (Tomada de Valdés, 1995).

En conclusión con los datos que se obtuvieron durante el periodo de estudio de los sismos se pudo establecer que el comportamiento sísmico es importante previo a una fase crítica del volcán Popocatepetl. Destacando la necesidad de mantener un monitoreo continuo de la actividad sísmica del volcán, para entender si su comportamiento es estable o si representa el preámbulo de un comportamiento de tipo eruptivo. Además de que ahora se considera importante el mantener operando continuamente las estaciones sismológicas.

1.2.2 Volcán Citlaltépetl

El Citlaltépetl o Pico de Orizaba es un estratovolcán cuenta con una elevación de 5675 metros sobre el nivel del mar.

El Pico de Orizaba es un estratovolcán cuaternario, que ha sido construido sobre rocas calizas y lutitas de edad Cretácica (Yañez-García y García-Duran, 1982). Según algunos autores el edificio volcánico del Pico de Orizaba ha sido construido y destruido en varias ocasiones pues se tienen indicios de la existencia de diversos eventos, los cuales sugieren que el volcán ha sido construido por lo menos en 3 etapas eruptivas diferentes (Carrasco-Núñez, 2000).

De acuerdo a este autor (Carrasco-Núñez, 2000), las etapas de evolución del volcán fueron nombradas de la etapa más antigua a la más reciente como:

- 1) El cono de Torrecillas: Inició su formación hace 0.65 ± 0.71 Ma. con la emisión de lavas andesíticas y dacíticas, formando un gran estratovolcán resultado de una fase predominantemente efusiva.
- 2) El cono Espolón de Oro: Se formó hace 0.21 Ma. con la expulsión de flujos de lava andesítica alta en sílice y dacítica, las cuales formaron la base del cono sobre los restos de Torrecillas, y la parte media y la cima del cono presentaron una alternancia de depósitos de ceniza, brechas y flujos de lava andesítica.

- 3) Cono Citlaltépetl: Se empezó a formar hace ~16 500 años con episodios efusivos de gran viscosidad, el cono se formó de lavas dacíticas y andesíticas con altas cantidades de sílice construyendo la mayoría del cono actual del Citlaltépetl. Ha tenido episodios efusivos alternados con repetitivas erupciones explosivas, las más importantes de estas explosiones ocurrieron hace 8500-9000 años (Carrasco-Núñez y Rose, 1995) y hace 4100 años (Siebe et al., 1993; Carrasco-Núñez, 1999). Durante los últimos 4000 años el volcán ha expulsado principalmente lavas dacíticas, con eventos explosivos moderados. (Carrasco-Núñez y Rose, 1993).

1.2.3 Volcán Colima

El volcán de Colima o Fuego de Colima tiene una elevación sobre el nivel del mar de 3 860 m, por lo que representa la octava cima más alta del país. Los primeros estudios geológicos sobre el volcán de Colima fueron hechos por Waitz (1906, 1915, 1935) quien realizó observaciones generales y describió la formación de flujos piroclásticos durante la erupción de 1913.

Al mismo tiempo que las últimas etapas de actividad del Nevado de Colima se construyó el cono ancestral del volcán de Colima, conocido como Paleofuego (Robin y Boudal, 1987).

Después del último colapso del volcán Paleofuego ocurrido hace aproximadamente 2 500 años, la actividad volcánica migró hacia el sur y se instauró dentro de la caldera del Paleofuego. Esta actividad ha dado origen al actual volcán de Colima. Este estratovolcán está compuesto por una alternancia de derrames andesíticos, depósitos de flujos piroclásticos y de caída. Una de las características del volcán de Colima ha sido la generación de flujos piroclásticos que han alcanzado hasta 15 km del cráter; los más notables son aquellos formados durante la erupción de 1913.

Durante los últimos 400 años, el volcán de Colima ha presentado alrededor de 43 erupciones que lo colocan como el volcán más activo de Norteamérica (De-la Cruz-Reyna, 1993; Saucedo et al., 2004b). Como resultado de su gran actividad, el volcán de Colima cuenta con el registro histórico más completo de los volcanes mexicanos.

La erupción explosiva mejor documentada del volcán de Colima fue la ocurrida en 1913. Antes de la erupción la cima del volcán tenía un cráter cubierto por un domo de lava. La erupción comenzó el 17 de enero de 1913 (Ortiz- Santos, 1944) con una serie de explosiones que generaron densas nubes de vapor y ceniza. El 20 de enero la erupción continuó con la formación de una columna pliniana que alcanzó 21 km de altura (Saucedo-Girón, 1997). El volumen total de la erupción de 1913 fue estimado en 0.9 km^3 (Saucedo-Girón, 1997). Durante la erupción también se produjeron flujos piroclásticos, los cuales fluyeron 15 km por el flanco sur del volcán, dejando depósitos de ceniza y rocas de 40 m de espesor (Waitz, 1915). Como resultado de esta explosión, la morfología de la cima del volcán cambió drásticamente, el edificio perdió 100 m de altura y se formó un cráter con un diámetro cercano a 400 m y profundidad desconocida (Macías, 2005).

Para 1958, el cráter estaba casi completamente ocupado por un tapón de lava en bloques (Mooser, 1961) que, entre 1961 y 1962, comenzó a derramarse por la ladera norte del volcán de Colima formando una lengua de lava que llegó hasta la base norte del volcán, en el sitio denominado El Playón. En 1975-1976 comenzó la generación de varios flujos de lava acompañados por primera vez de flujos piroclásticos, los cuales fueron documentados por Thorpe et al. (1977). Esta clase de actividad consistió en la intrusión de un cuerpo de magma que empujó el domo o tapón central y eventualmente generó derrames andesíticos como el de 1982 (Luhr y Carmichael, 1990b) y/o flujos piroclásticos producidos por el colapso gravitacional de las partes externas del domo, como el de 1991 (Rodríguez-Elizarrarás et al., 1991), también de la parte frontal de los flujos de lava, como en 1998 (Saucedo et al., 2002), y de manera más violenta, durante los primeros meses del año 2005 (Macías, 2005).

Capítulo 2

Descripción de Eventos Ocurridos

Introducción

El conocimiento del comportamiento pasado de un volcán (estudios geológicos y registros históricos) es fundamental para entender el funcionamiento actual y es la base para elaborar mapas de peligros volcánicos. Ésta información en conjunto con un adecuado sistema de monitoreo permite hacer inferencias sobre la actividad futura del volcán y disminuir los efectos dañinos de una erupción (Macías, 1995).

La rapidez con que se hacen las modificaciones de los mapas se deben a varios factores:

- 1) La consistente actividad sísmica y fumarólica observada.
- 2) La incertidumbre existente en cuanto al tipo, intensidad y el momento en que podría presentarse un evento eruptivo de mayor magnitud, y
- 3) El grado de alarma ocasionado en los poblados cercanos al volcán.

La evaluación del riesgo volcánico está basada en el conocimiento de la historia eruptiva del volcán, así pues se deben considerar todos los estudios que se han hecho hasta el momento con el propósito de tener una mejor idea sobre la magnitud y frecuencia de las erupciones.

En este capítulo se trata de simular conforme a la historia eruptiva de los Volcanes Popocatepetl, Citlaltépetl y Colima, los posibles escenarios que se pudieron generar en sus erupciones pasadas, tratando de hacer una comparación de los mapas publicados por algunos autores como J.L. Macías, G. Carrasco, S. R. Rodríguez-Elizarrarás, R. Saucedo y el CENAPRED con los obtenidos con un programa diseñado por el Instituto de Ingeniería llamado ERN-Volcán con el propósito de hacer notar la validez de este último para el caso de la caída de ceniza, flujos piroclásticos y flujos de lava.

2.1 Descripción del Modelo

El modelo que utiliza el programa ERN-Volcán está basado principalmente en dos artículos el primero es el titulado "Application of Computer –Assisted Mapping to Volcanic Hazard Evaluation of Surge Eruptions: Vulcao, Lipari and Vesuvius" cuyos autores son Michael F. Sheridan y Michael C. Malin, y el segundo lleva el título de "A Numerical Model for Simulation of Tephra Transport and Deposition: Applications to May 18, 1980, Mount St. Helens Eruption" escrito por P. Armienti y G. Macedonio

Este programa utiliza como parámetros de entrada para el caso de los flujos piroclásticos: la localización de la cima del volcán, la elevación del volcán, el ángulo de depresión del cono y la topografía. La computadora calcula el Δh para cada punto y despliega los resultados en el monitor. Todas las imágenes son mostradas como arreglos de imagen.

La localización de la cima del cono es crítica por que sobre el flanco del cono volcánico se puede tener el efecto aparente de "direccionalidad" resultado de una inclinación con mayor gradiente. En muchos casos la localización de esta cima del volcán es dada adecuadamente por la actividad del

cráter, en otros casos se determina con datos de límites estructurales. Para las erupciones pasadas la geometría de los depósitos puede ser usada para encontrar la localización de la cima por un reajuste en los mapas digitales de las isopacas.

El ángulo de depresión central del cono es supuesto para describir una línea de energía apropiada para la erupción en cuestión. Los límites distales del depósito dan uno o más puntos fijos para el establecimiento de la inclinación de la línea de energía.

La altura de la pluma de erupción (observada o teórica) proviene de otro punto fijo de la inclinación.

La elevación de la cima del cono de energía sobre las ventilas están en función de la energía de las oleadas piroclásticas de la erupción. Para erupciones recientes como en Monte St. Helens este valor puede ser determinado por las observaciones. Para erupciones antiguas la altura de la cima y la inclinación del cono de energía pueden ajustarse a los datos geológicos.

La información de las erupciones históricas provee de mejores datos para el establecimiento de rangos de inclinación del cono para varias clases de erupciones. los valores de estas inclinaciones son para el volcán Popocatepetl 11.3°, para el volcán Citlaltépetl de 12.50° y para el volcán de Colima de 14.57° y 22.34°.

La cantidad de datos disponibles presenta muchas limitaciones sobre el uso de este modelo. En general los límites de devastación para erupciones pasadas pueden ser algunas veces desconocidos y solo se puede trazar una línea lateral hasta donde el espesor solo llega a pocos centímetros. Otros factores que reducen la calidad de los datos geológicos incluyen el removimiento local por erosión debida al viento o al agua, alteración hidrotermal, el cubrimiento por depósitos más jóvenes o el deterioro debido a la vegetación.

Sin embargo puede generarse una aproximación por prueba y error a partir de un ajuste en la base de datos para así obtener un modelo del cono de energía para las observaciones.

La topografía para los eventos antiguos también no es fácil obtenerla. Por ejemplo para construcciones volcánicas, fallas tectónicas, o colapso de las calderas la topografía se ve drásticamente alterada. Las correcciones son necesarias para reconstruir la topografía para el tiempo en que se suscitó la erupción. Varias propiedades cinemáticas incluyendo aceleración, velocidad y distancia en varios tiempos pueden ser calculadas dada la configuración de la superficie topográfica y el cono de energía. El factor más crítico en el modelo para flujos piroclásticos es la distancia vertical (Δh) entre la superficie del suelo y el cono de energía. Este factor limita la velocidad máxima (V_{max}) de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$V_{max}=(2*g*\Delta h)^{1/2}$$

El límite final de la destrucción, según las estimaciones para el espesor de los depósitos pasados es la principal preocupación de la evaluación del riesgo volcánico. El límite de destrucción en el modelo de cono de energía esta dado por la intersección del cono de energía con la superficie topográfica (es decir, donde $\Delta h=0$).

Una característica atractiva del modelo de cono de energía para la evaluación del riesgo volcánico es la implementación del tiempo real. Siempre que los datos de la topografía digital esten en la computadora, el modelo se puede generar en pocos minutos. Así en tiempo de crisis del volcán pueden generarse varios tipos de erupciones para uno o más sitios usando o cambiando los datos geológicos, geofísicos y geoquímicos. Si las zonas de peligro potencial fueron movidas se pueden generar modelos rápidos indicando el cambio en las áreas de mas peligro probable.

Para la difusión de la tefra el modelo se basa en la suposición de que el transporte local del material es proporcional al gradiente local de la concentración. El coeficiente de proporcionalidad está referido a la difusividad. El flujo de las partículas Γ , a través de una superficie fija está dada por:

$$\Gamma = -K(\delta C/\delta n)$$

Donde C es la concentración de la difusividad de la ceniza, K es la difusividad y n es la coordenada normal a la superficie. Difusividad está estrictamente relacionada a las condiciones atmosféricas y puede variar en espacio y tiempo. En general se definen tres diferentes coeficientes de difusión para tomar en cuenta la anisotropía en las tres direcciones x, y, z ocasionadas por la gravedad.

Kz es la difusividad del transporte del material en dirección vertical y Kx = Ky los coeficientes para el transporte en dirección horizontal. El coeficiente de difusión vertical es cercano a cero a alturas de 500 m. Los coeficientes horizontales dependen de la escala del fenómeno.

Para la velocidad de deposición el flujo vertical de la caída de partículas, Γ es debido a la difusión vertical y la velocidad de asentamiento Vs:

$$\Gamma = -Kz(\delta C/\delta n) + VsC$$

Así pues introduciendo una velocidad de deposición Vg el perfil de velocidad queda de la siguiente manera:

$$u = (u^*/k) \log(z/z_0)$$

donde u^* es la velocidad de fricción, k es la constante de Karman ($k=0.417$) y z_0 es la longitud rugosa del suelo.

Para una suposición practica la velocidad de deposición se puede asumir igual a la solución de velocidad cuando la velocidad de fricción es menor que 0.7 m/s. si por ejemplo z_0 se supone igual a 0.1 m la condición de correspondencia a la velocidad del viento es menos que 10 m/s a pocos metros del suelo.

2.2 Caída de Ceniza

2.2.1 Volcán Popocatépetl

De acuerdo a la Guía Básica para la Elaboración de Mapas Estatales de Peligros y Riesgos publicado por CENAPRED, los escenarios de caída de ceniza volcánica en el Popocatépetl se hicieron con las siguientes características:

1. Altura de la columna eruptiva (20 km)
2. Duración de la erupción. (3 horas)
3. Velocidad del viento (60 km/h)
4. Dirección del viento con cuatro escenarios: Este, Norte Oeste y Sur

Las figuras 2.1 a 2.4 fueron tomadas de la pagina del CENAPRED y muestran los escenarios obtenidos para el depósito de ceniza volcánica con las características anteriormente mencionadas. En estos mapas se montaron además las capas de información hidrológica, vías de comunicación y poblaciones (Imágenes tomadas de la Guía Básica para la Elaboración de Mapas Estatales de Peligros y Riesgos del CENAPRED).

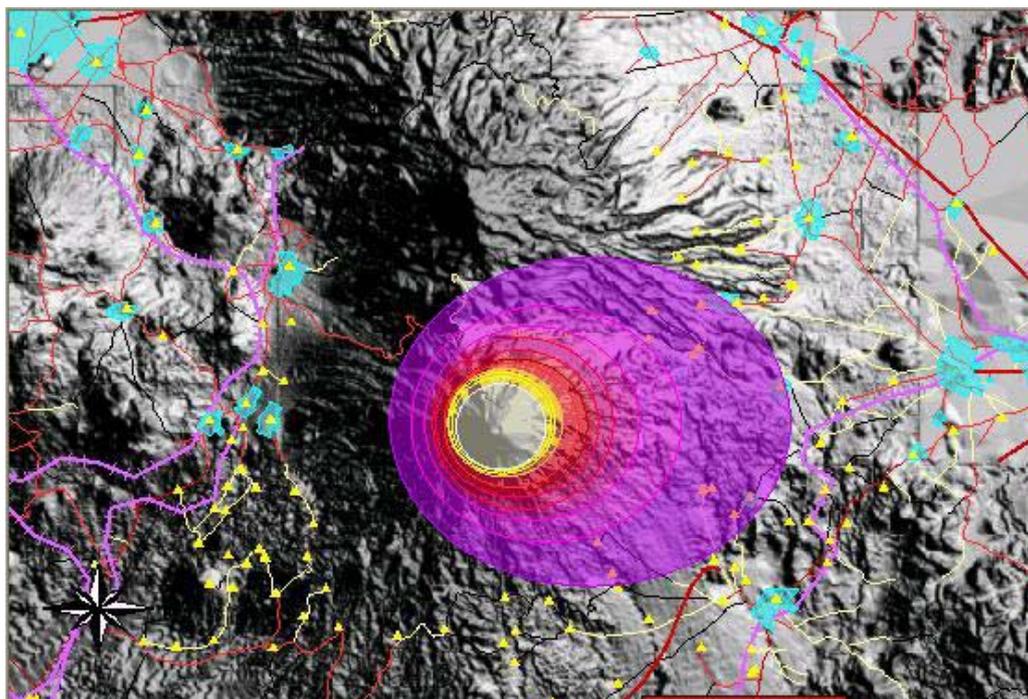


Figura 2.1 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Popocatepetl. Características del evento: altura de columna de 20 km y duración de 3 h con velocidad del viento 60 km/h en dirección al este (Imagen tomada del CENAPRED).

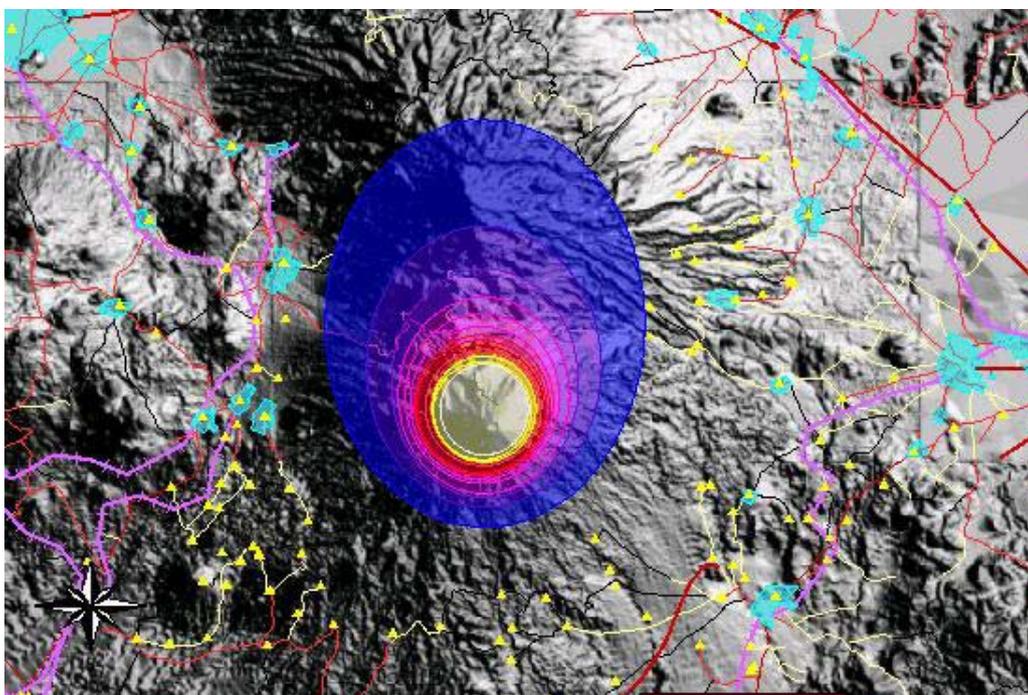


Figura 2.2 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Popocatepetl. Características del evento: altura de columna de 20 km y duración de 3 h. Con velocidad del viento 60 km/h en dirección al norte. (Imagen tomada del CENAPRED).

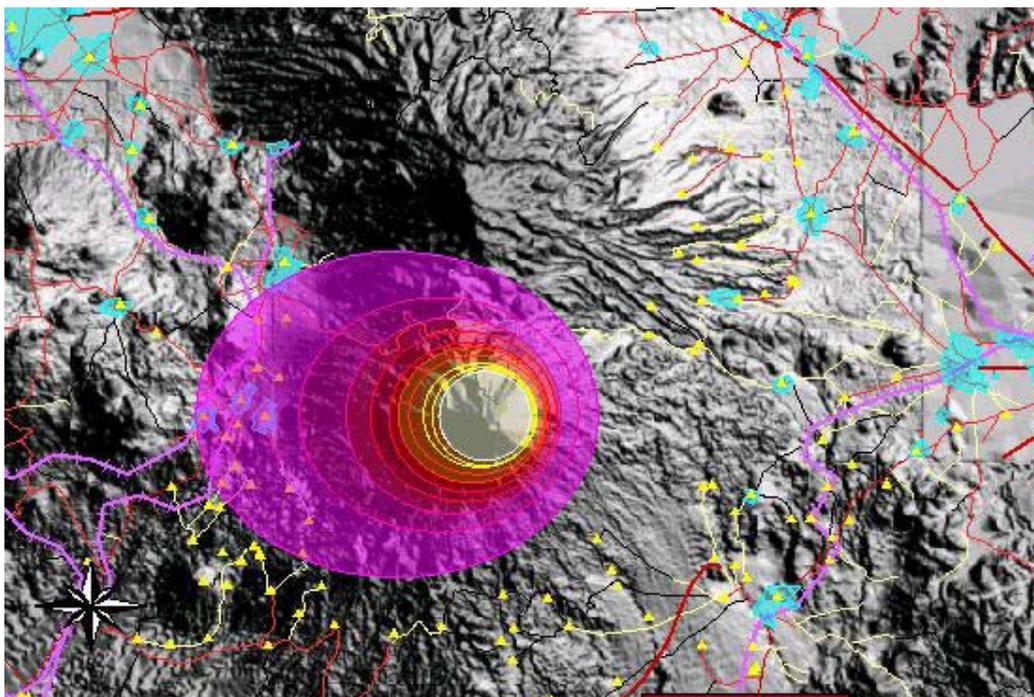


Figura 2.3 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Popocatepetl. Características del evento: altura de columna de 20 km y duración de 3 h. Con velocidad del viento 60 km/h en dirección al oeste. (Imagen tomada del CENAPRED).

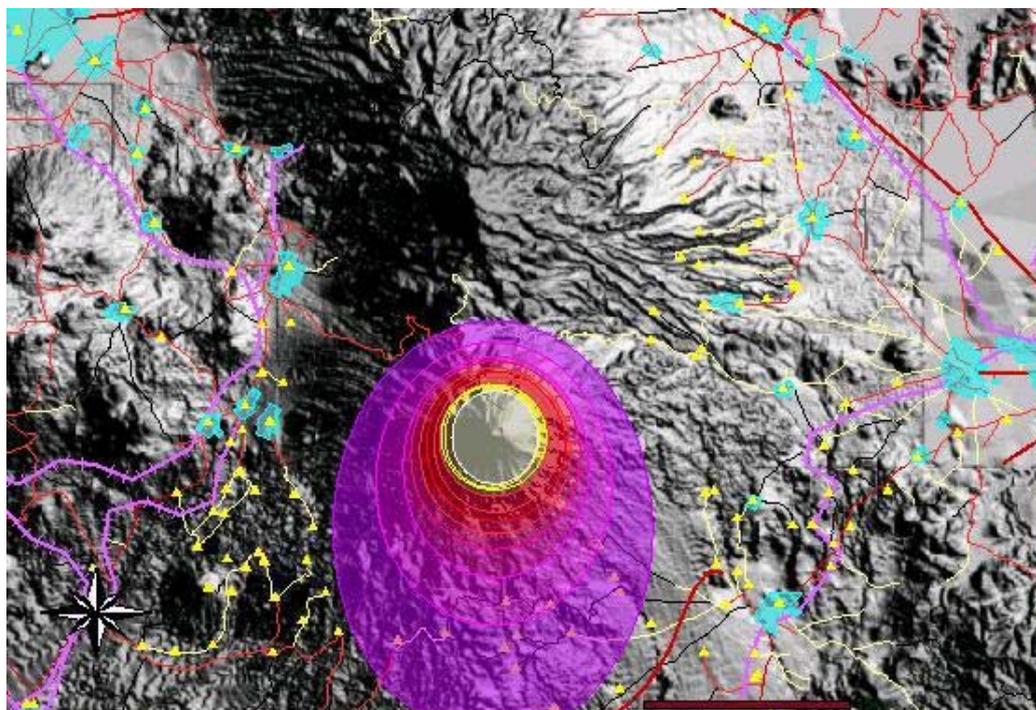


Figura 2.4 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Popocatepetl. Características del evento: altura de columna de 20 km y duración de 3 h. Con velocidad del viento 60 km/h en dirección al sur. (Imagen tomada del CENAPRED).

Así pues los parámetros que se toman en cuenta en nuestro programa y con los cuales se hará la comparación de los escenarios de caída de ceniza son:

1. Altura de la columna eruptiva (20 km)
2. Velocidad de caída (0.7 m/seg)
3. Dirección del viento con cuatro escenarios: Este, Norte, Oeste y Sur (0, 90, 180 y 270 grados respectivamente)
4. Volumen de ceniza ($10^6 m^3$)

En las figuras 2.5 a 2.8 se muestran los escenarios obtenidos con estas características. En estos mapas se montó la capa de poblaciones con la cual observamos los poblados afectados. Cabe mencionar que la geometría de la distribución de la ceniza es homogénea debido a que no se toma en cuenta la topografía para la generación del escenario, lo cual nos lleva a decir que lo que se muestra es la variación horizontal del espesor de la ceniza.

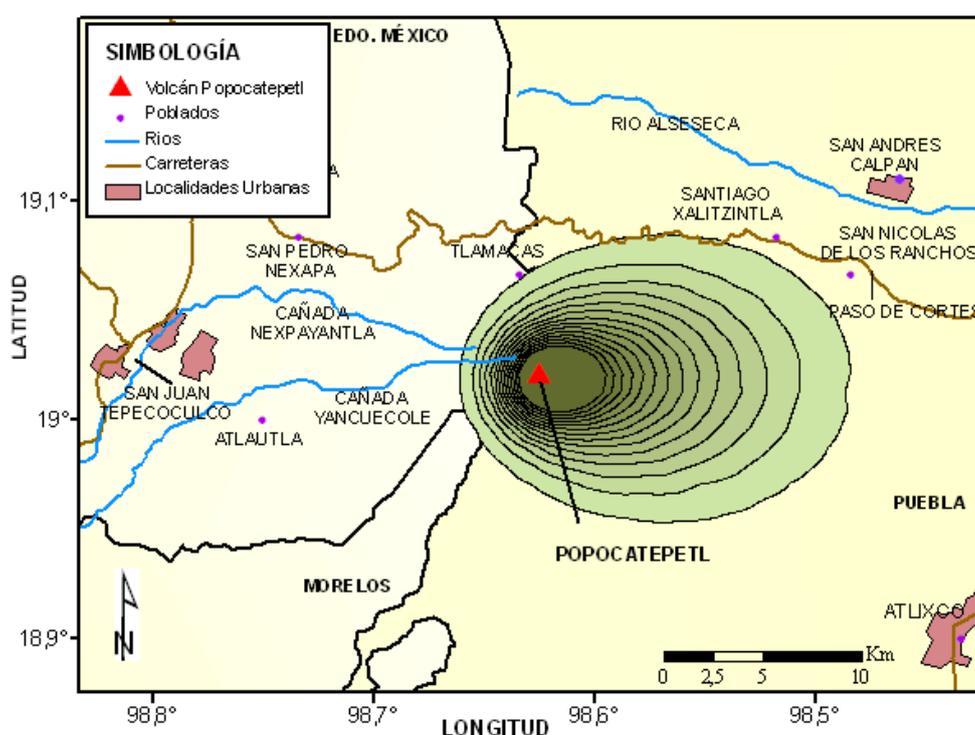


Figura 2.5 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Popocatepetl. Características del evento: altura de columna de 20 km, velocidad de caída 0.7 m/seg en dirección al este y volumen de $10^6 m^3$.

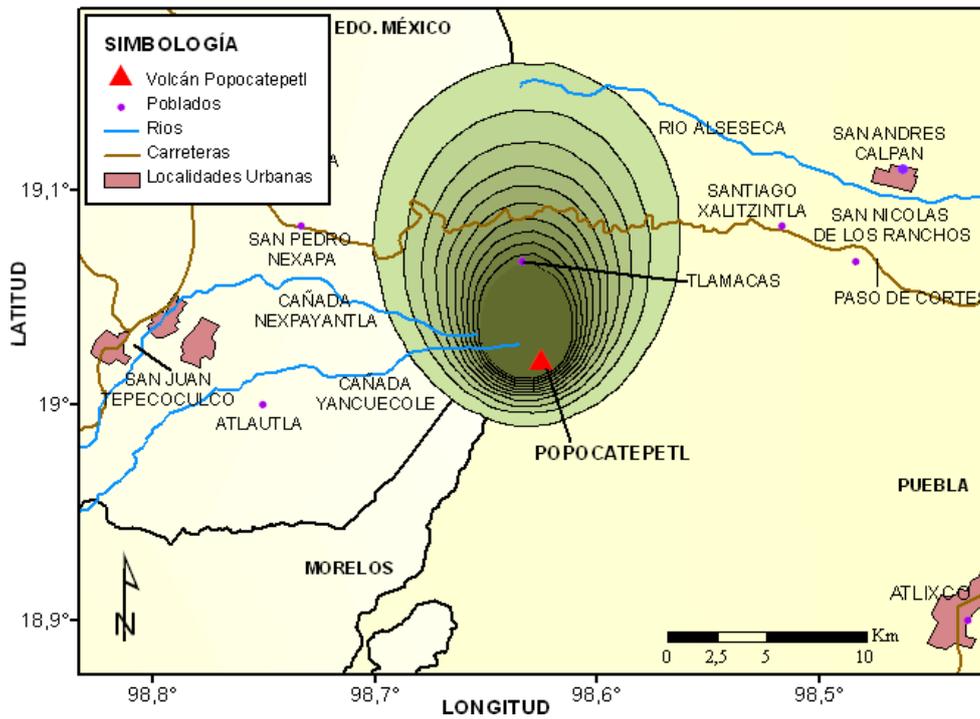


Figura.2.6 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Popocatepetl. Características del evento: altura de columna de 20 km, velocidad de caída 0.7 m/seg en dirección al norte y volumen de $10^6 m^3$.

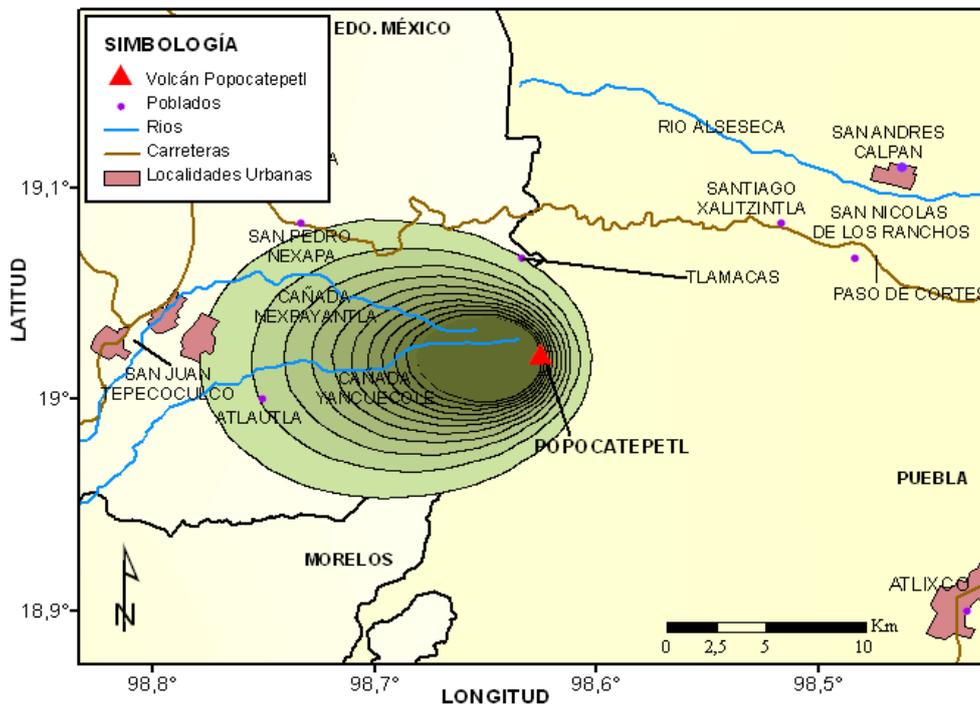


Figura 2.7 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Popocatepetl. Características del evento: altura de columna de 20 km, velocidad de caída 0.7 m/seg en dirección al oeste y volumen de $10^6 m^3$.

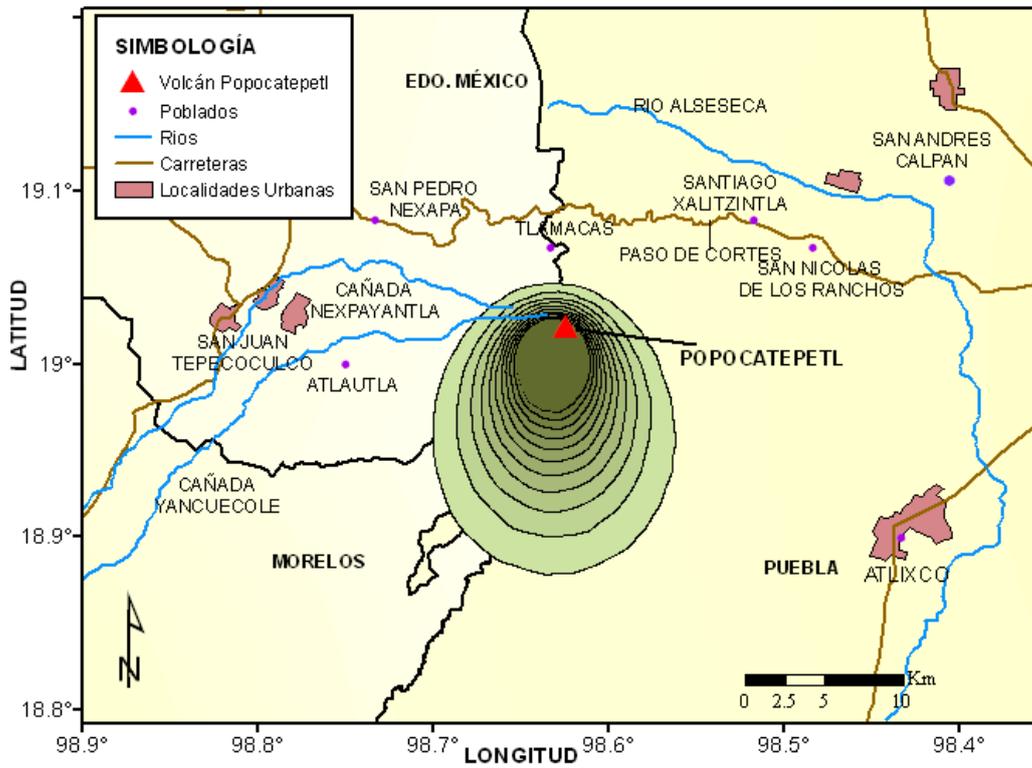


Figura 2.8 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Popocatepetl. Características del evento: altura de columna de 20 km, velocidad de caída 0.7 m/seg en dirección al sur y volumen de $10^6 m^3$.

Para obtener una mejor perspectiva de la similitud de los escenarios obtenidos se empalmaron como ejemplo las Figura 2.1 y 2.5 obteniendo lo siguiente:

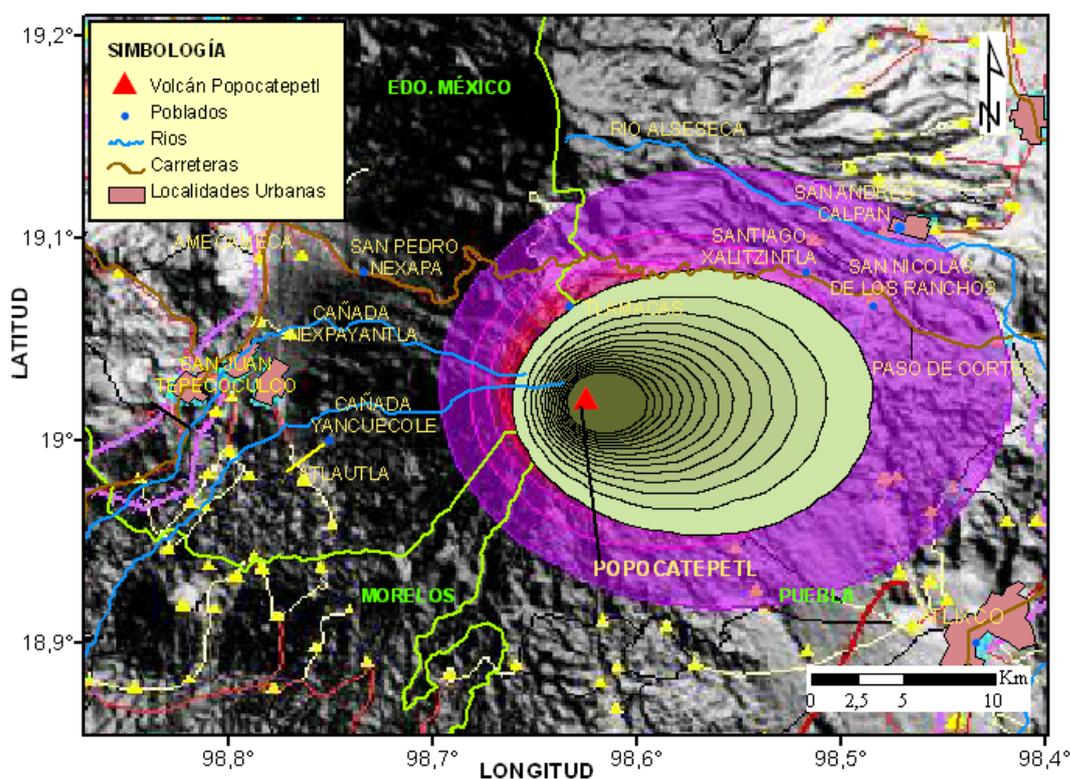


Figura 2.9 Comparación de los Escenarios de Caída de Ceniza del volcán Popocatepetl publicados por el CENAPRED con los obtenidos con el programa ERN-Volcán.

Como se puede observar en la Figura 2.9 los escenarios de caída de ceniza publicados por el CENAPRED con los obtenidos con el programa ERN-Volcán son muy similares entre ellos, presentando solo algunas variaciones en cuanto al alcance y espesor de la ceniza.

Estas variaciones podrían solucionarse utilizando un volumen de ceniza mayor o tomando en consideración el tamaño de las partículas expulsadas.

2.2.2 Volcán Citlaltépetl

Debido a que el Citlaltépetl también es un estratovolcán, los escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Citlaltépetl se hicieron con características similares a las del volcán Popocatepetl e igualmente se tomaron las figuras generadas por el CENAPRED para su comparación (Imágenes disponibles en la página del CENAPRED):

1. Altura de la columna eruptiva (20 km)
2. Duración de la erupción. (3 horas)
3. Velocidad del viento (60 km/h)
4. Dirección del viento con cuatro escenarios: Este, Norte Oeste y Sur.

Para el volcán Citlaltépetl las figuras 2.10 a 2.13 muestran los escenarios de caída de ceniza volcánica con las características anteriormente mencionadas. En estos mapas se montaron

también las capas de información hidrológica, vías de comunicación y poblaciones (Imágenes tomadas de la página del CENAPRED).

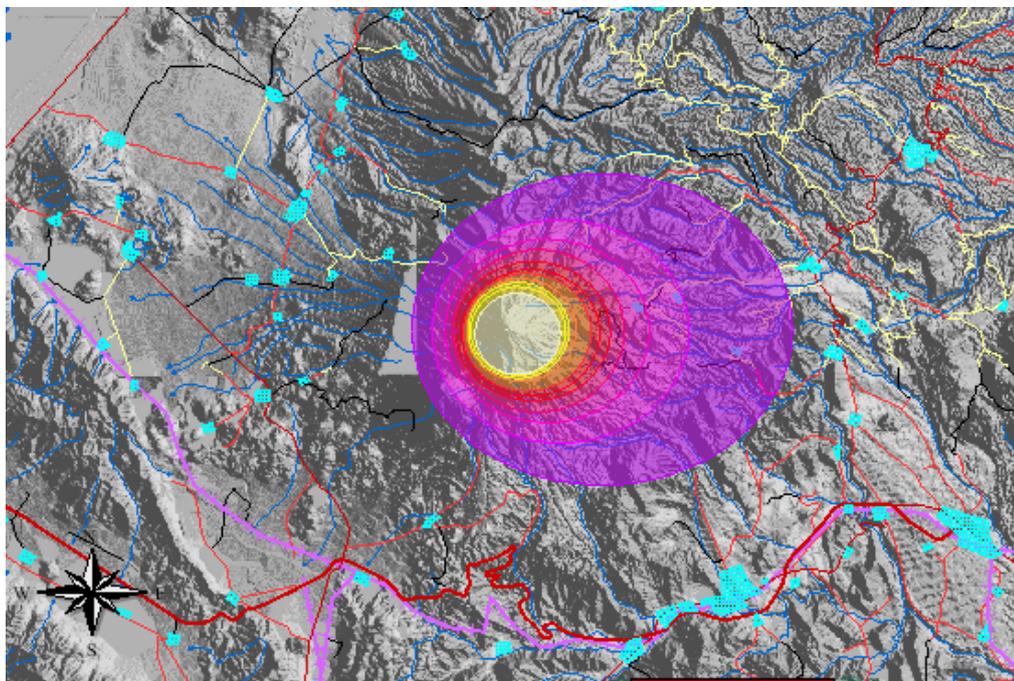


Figura 2.10 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Citlaltépetl. Características del evento: altura de columna de 20 km y duración de 3 h. Con velocidad del viento 60 km/h en dirección al este. (Imagen tomada del CENAPRED)

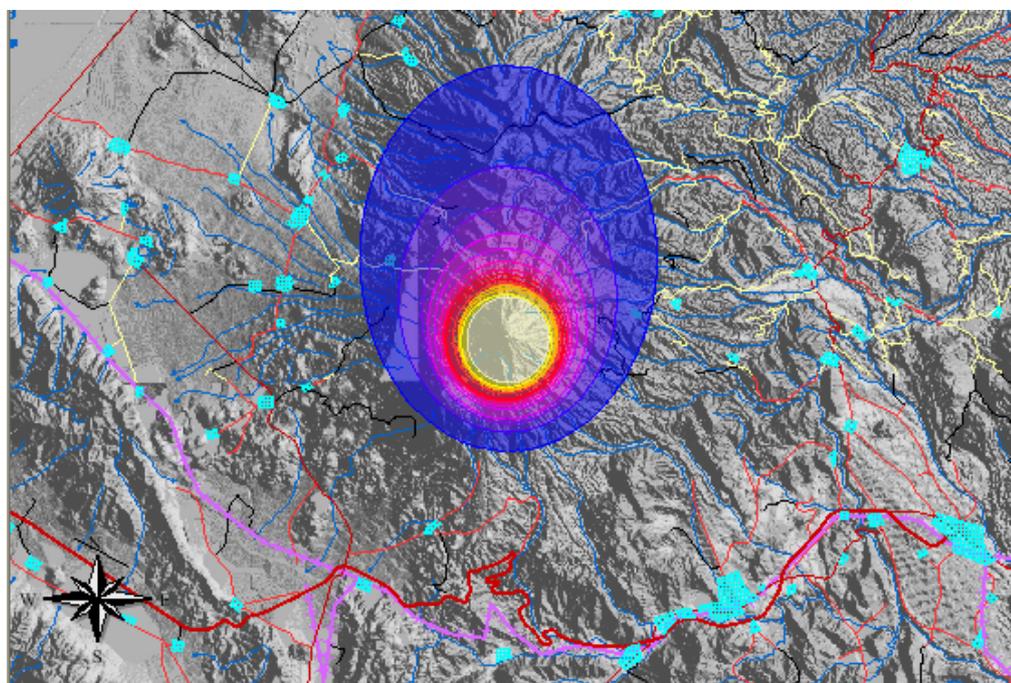


Figura 2.11 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Citlaltépetl. Características del evento: altura de columna de 20 km y duración de 3 h. Con velocidad del viento 60 km/h en dirección al norte. (Imagen tomada del CENAPRED)

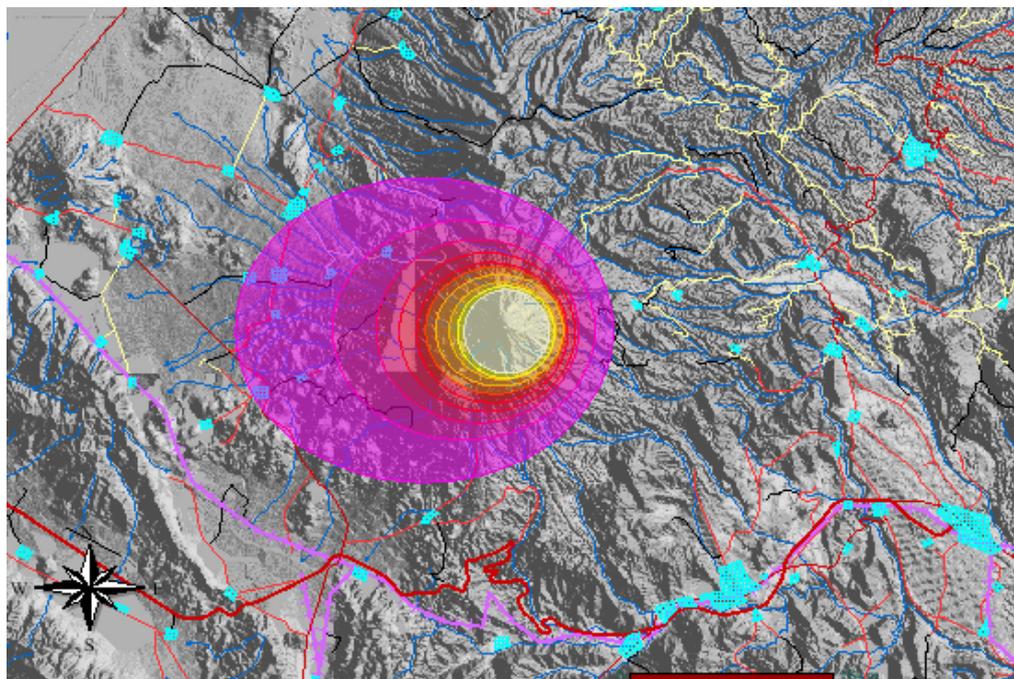


Figura 2.12 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Citlaltépetl. Características del evento: altura de columna de 20 km y duración de 3 h. Con velocidad del viento 60 km/h en dirección al oeste. (Imagen tomada del CENAPRED)

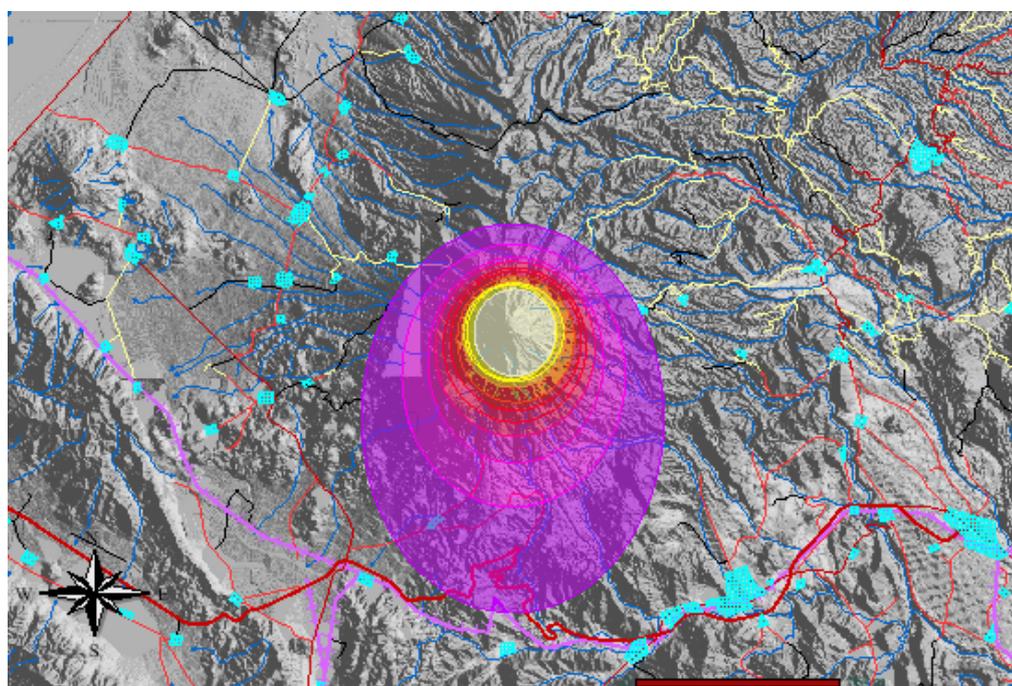


Figura 2.13 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Citlaltépetl. Características del evento: altura de columna de 20 km y duración de 3 h. Con velocidad del viento 60 km/h en dirección al sur. (Imagen tomada del CENAPRED)

Así pues los parámetros que se toman en cuenta en nuestro programa y con los cuales se hará la comparación de los escenarios de caída de ceniza para este volcán son:

1. Altura de la columna eruptiva (20 km)
2. Velocidad de caída (1 m/seg)
3. Dirección del viento con cuatro escenarios: Este, Norte, Oeste y Sur (0, 90, 180 y 270 grados respectivamente)
4. Volumen de ceniza (10^6m^3)

En las Figuras 2.14 a 2.17 se muestran los escenarios obtenidos con las características anteriores. En estos mapas se ubicaron las poblaciones más cercanas al volcán.

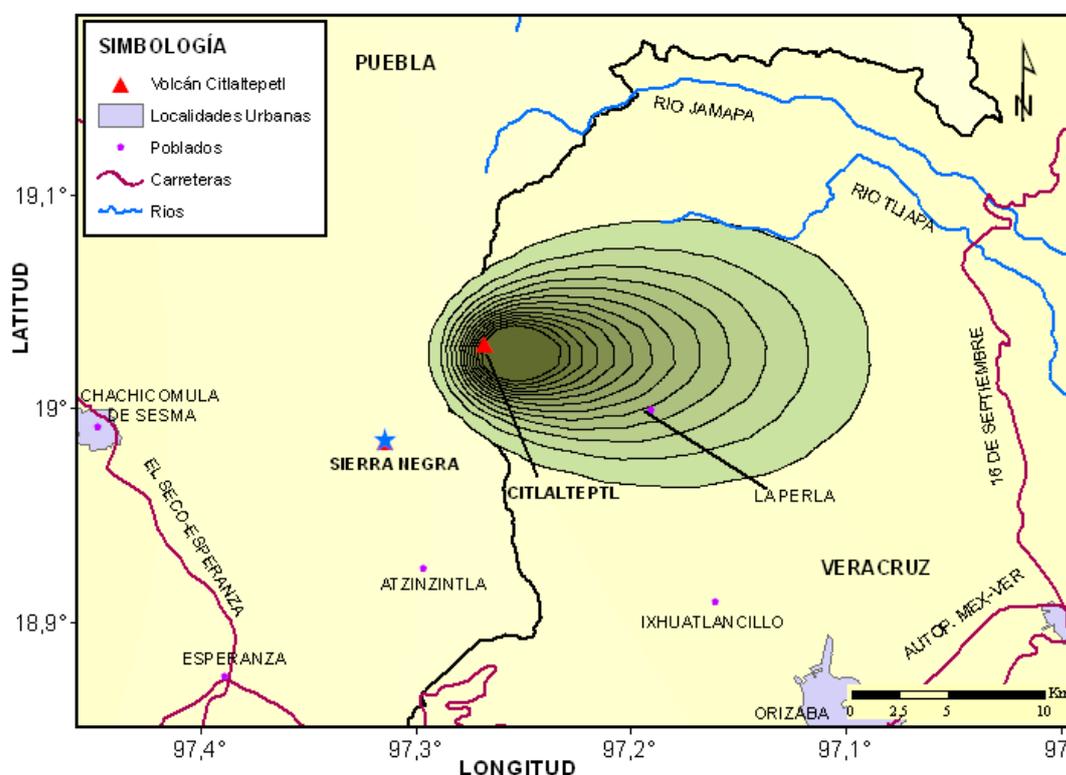


Figura 2.14 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Citlaltépetl. Características del evento: altura de columna de 20 km, con velocidad de depósito de 1 m/s en dirección al este.

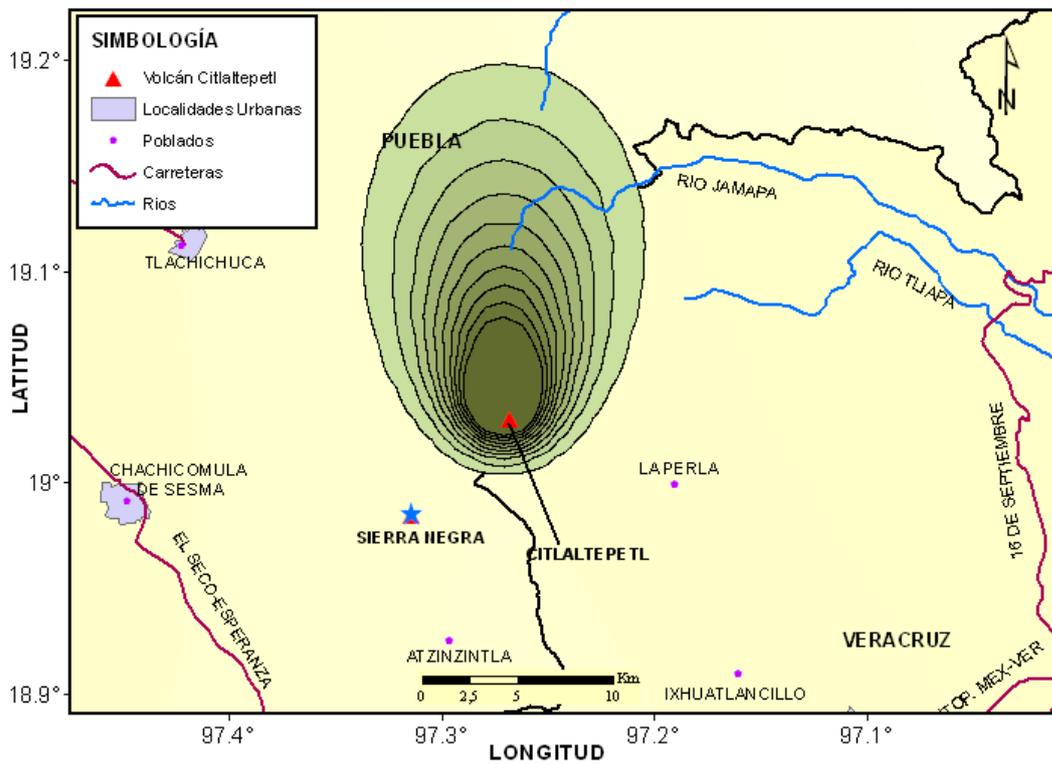


Figura 2.15 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Citlaltépetl. Características del evento: altura de columna de 20 km, con velocidad de depósito de 1 m/s en dirección al norte.

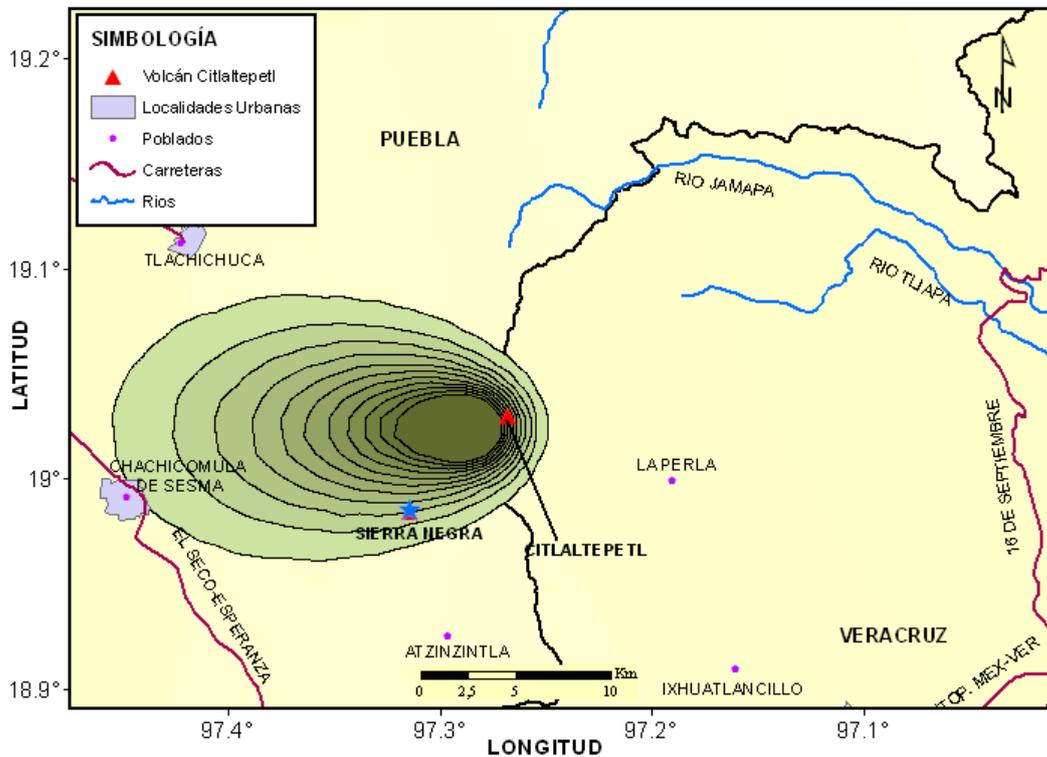


Figura 2.16 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Citlaltépetl. Características del evento: altura de columna de 20 km, con velocidad de depósito de 1 m/s en dirección al oeste.

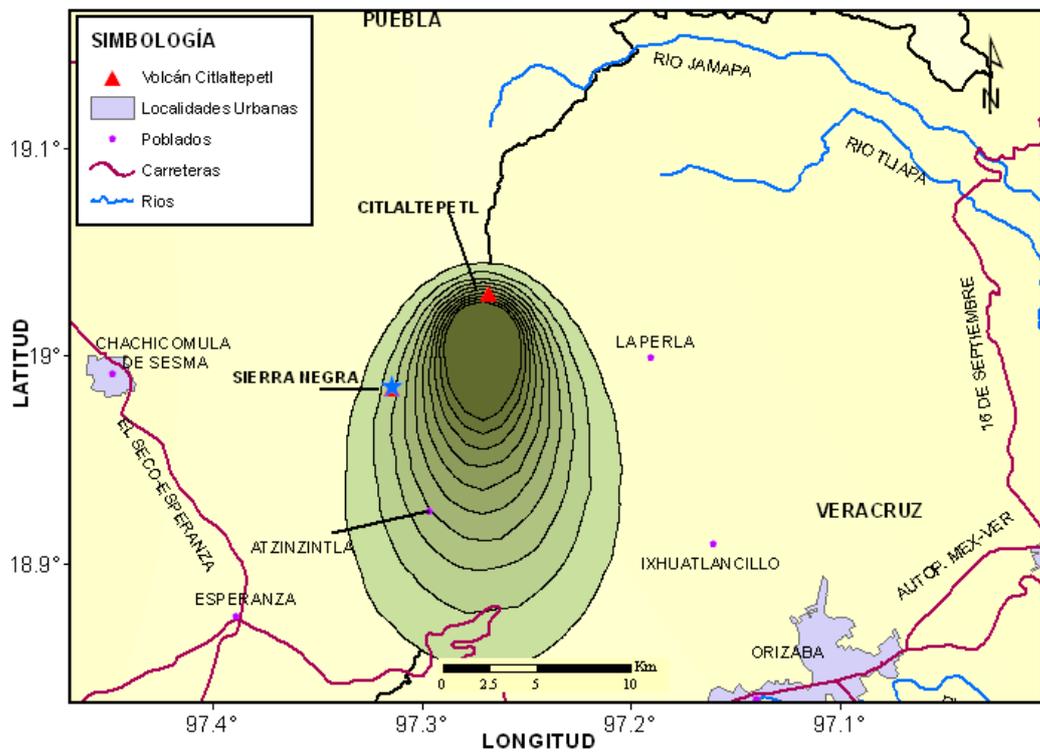


Figura 2.17 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Citlaltépetl. Características del evento: altura de columna de 20 km, con velocidad de depósito de 1 m/s en dirección al sur.

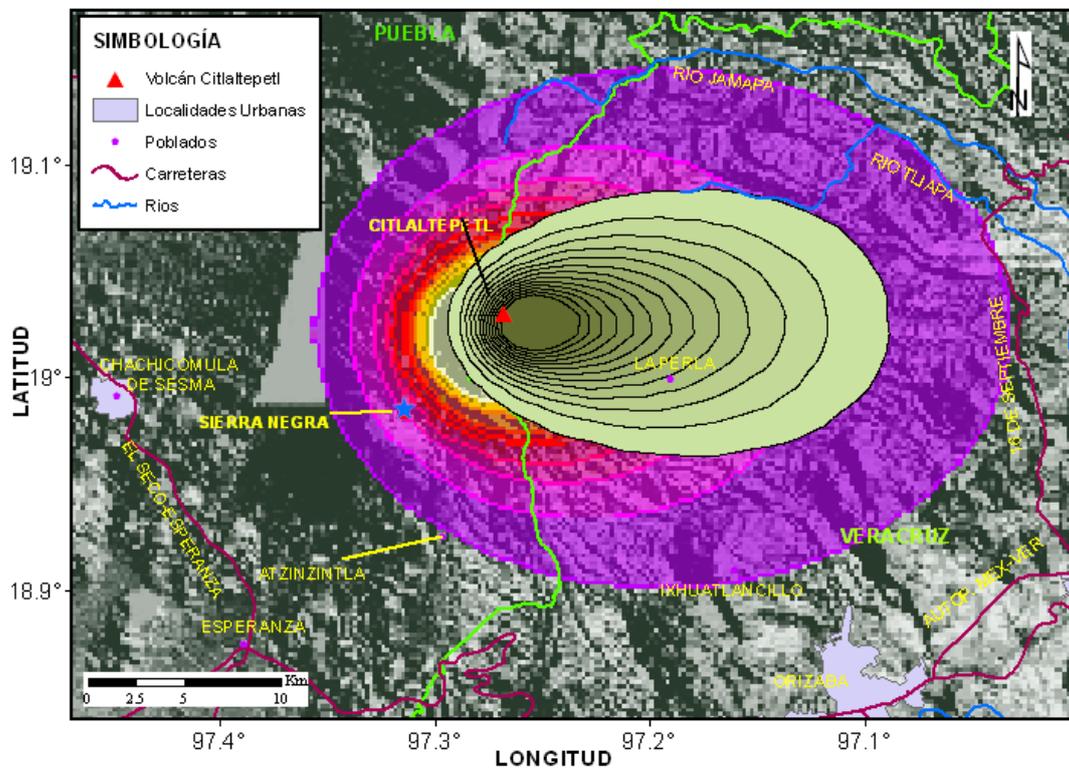


Figura 2.18 Comparación de los escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Citlaltépetl.

En la Figura 2.18 se puede observar la variación que existe entre los escenarios de depósito, esto se debe al volumen de ceniza utilizado en cada uno de los escenarios y al tamaño de las partículas que se están considerando.

2.2.3 Volcán Colima

Para los escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Colima se tomaron características un poco diferentes que en los dos volcanes anteriores debido a que en este se tiene un mejor registro de los eventos pasados, de acuerdo a la erupción de 1913 se pueden dividir los escenarios en tres fases y los resultados obtenidos de igual manera se compararon con los publicados en la pagina del CENAPRED (Imágenes disponibles en la página del CENAPRED).

Parámetros utilizados por el CENAPRED:

1. Altura de la columna eruptiva (20 km)
2. Duración de la erupción. (3 horas)
3. Velocidad del viento (60 km/h)
4. Dirección del viento con cuatro escenarios: Este, Norte Oeste y Sur.

Para el volcán Colima las Figuras 2.19 a 2.22 muestran los escenarios de caída de ceniza volcánica con las características mencionadas. Además se montaron las capas de información hidrológica, vías de comunicación, poblaciones y ciudades (Imágenes tomadas de la página del CENAPRED).

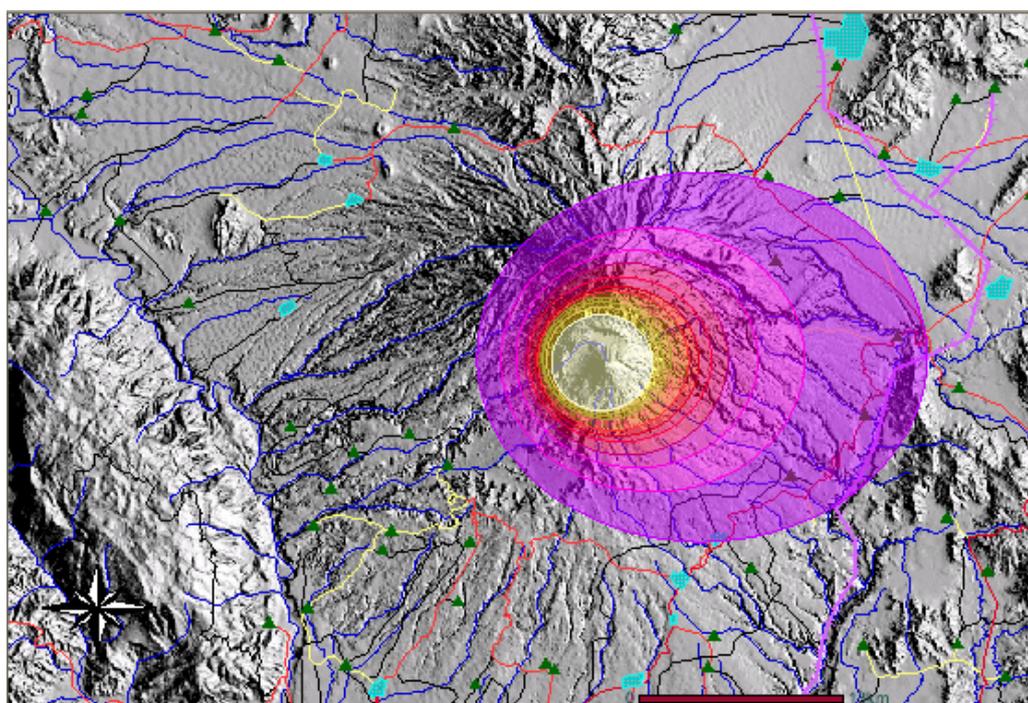


Figura 2.19 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Colima. Características del evento: altura de columna de 20 km y duración de 3 h. Con velocidad del viento 60 km/h en dirección al este. (Imagen tomada del CENAPRED).

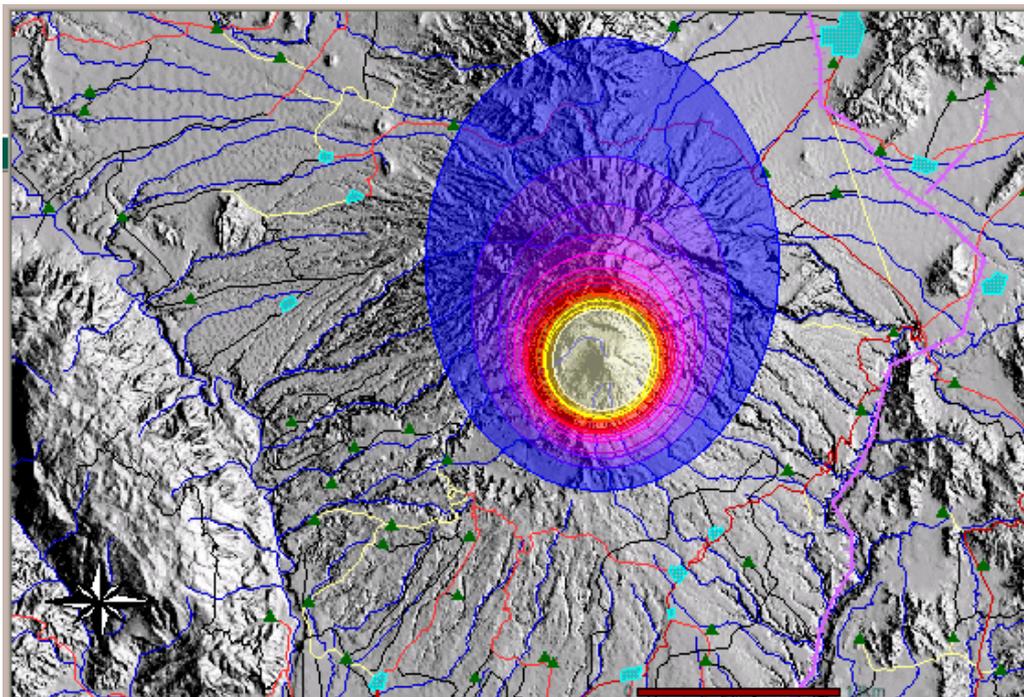


Figura 2.20 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Colima. Características del evento: altura de columna de 20 km y duración de 3 h. Con velocidad del viento 60 km/h en dirección al norte. (Imagen tomada del CENAPRED).

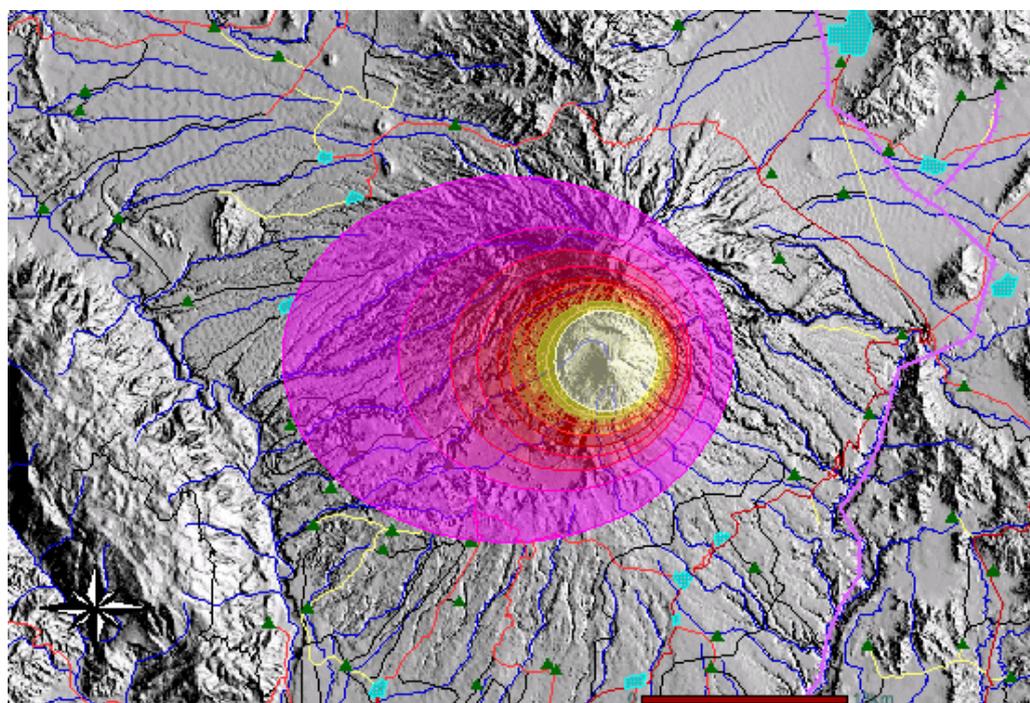


Figura 2.21 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Colima. Características del evento: altura de columna de 20 km y duración de 3 h. Con velocidad del viento 60 km/h en dirección al oeste. (Imagen tomada del CENAPRED)

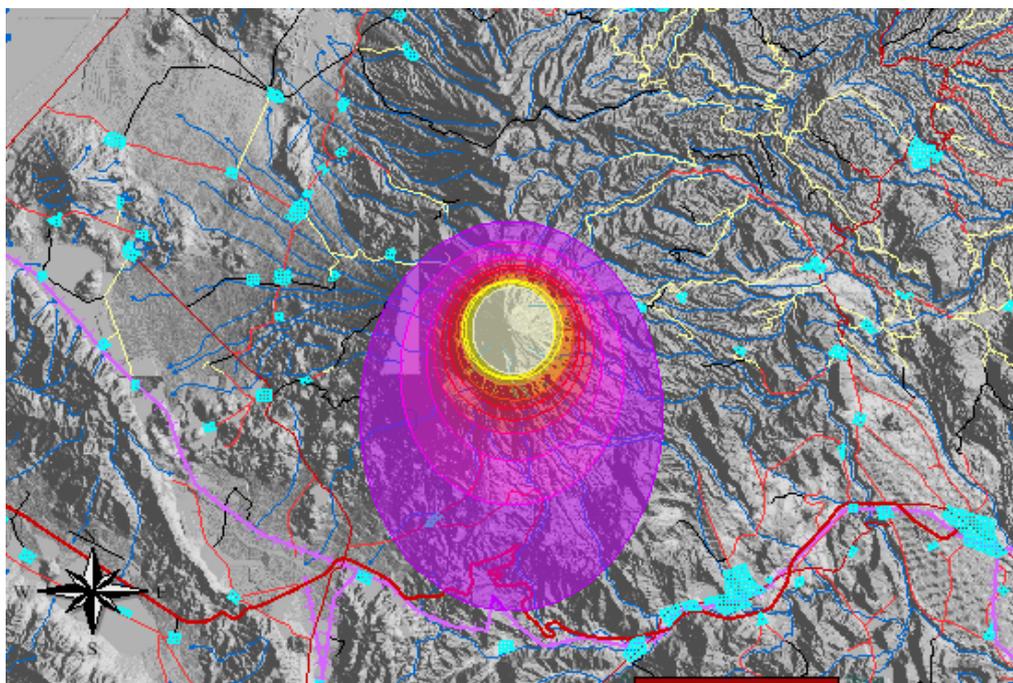


Figura 2.22 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Colima. Características del evento: altura de columna de 20 km y duración de 3 h. Con velocidad del viento 60 km/h en dirección al sur. (Imagen tomada del CENAPRED)

En nuestro caso como ya se mencionó basándonos en el registro de la erupción de 1913 los escenarios se dividieron en tres fases:

Fase I y II

1. Altura de la columna eruptiva (15 km)
2. Velocidad de caída (1 m/seg)
3. Dirección del viento con cuatro escenarios: Este, Norte, Oeste y Sur (0, 90, 180 y 270 grados respectivamente)
4. Volumen de ceniza ($10^6 m^3$)

En los escenarios de caída de ceniza para las Fases I y II se utilizaron los mismos valores de los parámetros por lo que solo se presenta un solo escenario para los dos (Figuras 2.23 a la 2.26).

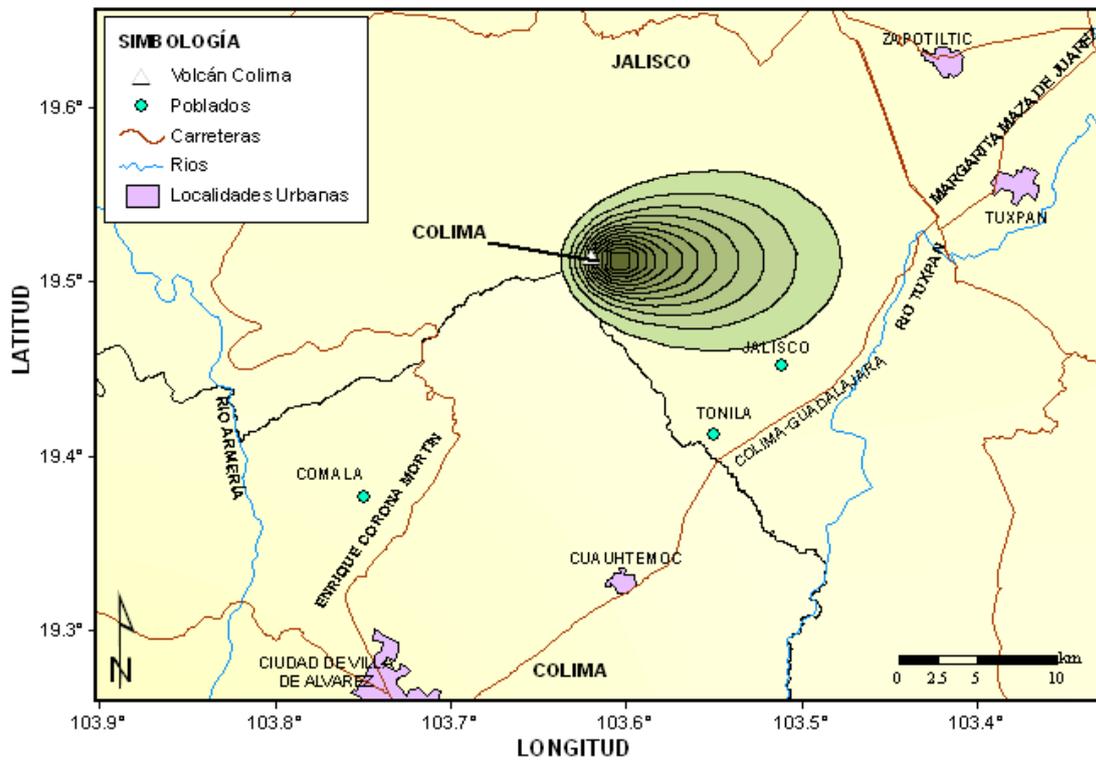


Figura 2.23 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Colima. Características del evento: altura de columna de 15 km, con velocidad de depósito de 1 m/s en dirección al este.

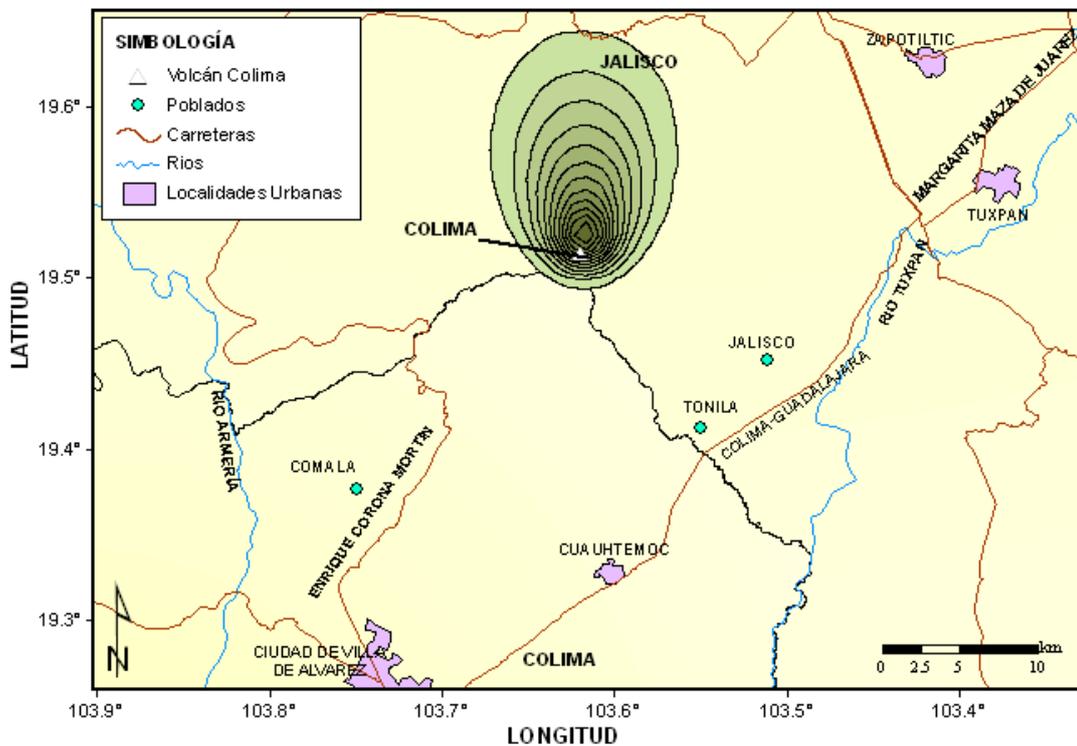


Figura 2.24 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Colima. Características del evento: altura de columna de 15 km, con velocidad de depósito de 1 m/s en dirección al norte.

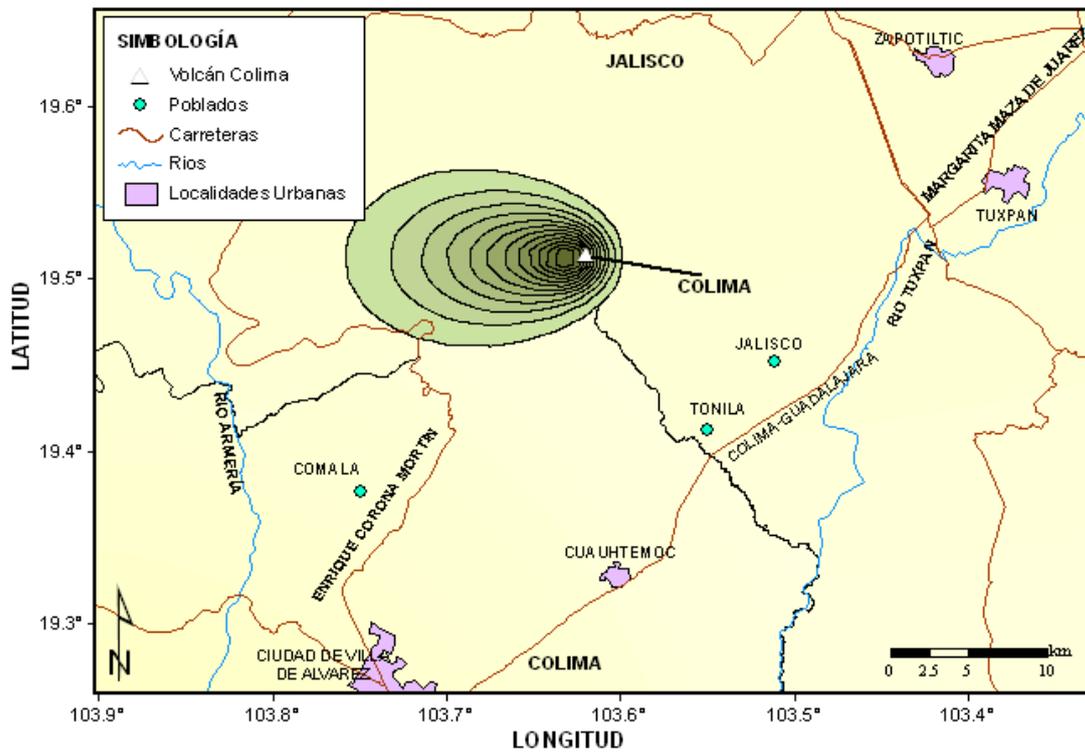


Figura 2.25 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Colima. Características del evento: altura de columna de 15 km, con velocidad de depósito de 1 m/s en dirección al oeste.

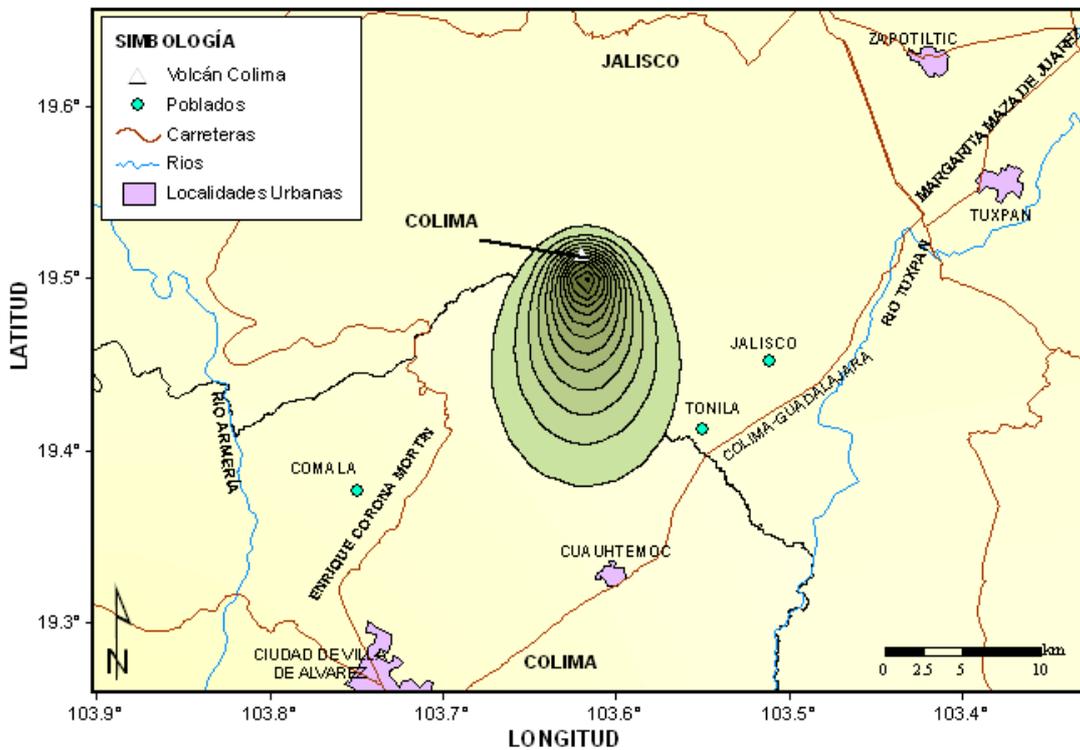


Figura 2.26 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Colima. Características del evento: altura de columna de 15 km, con velocidad de depósito de 1 m/s en dirección al sur.

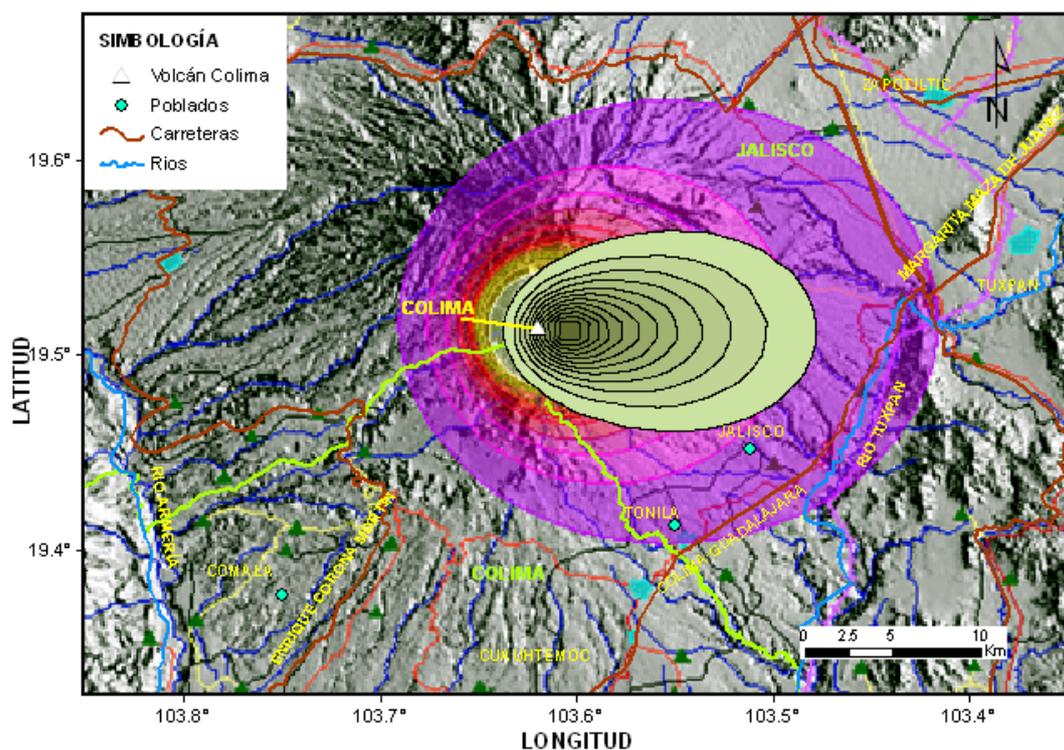


Figura 2.27 Comparación de los escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Citlaltépetl.

Para el caso de la Fase III y debido a que esta la consideran como una explosión más violenta los parámetros que se utilizan son los siguientes:

Fase III

1. Altura de la columna eruptiva (21 km)
2. Velocidad de caída (1 m/seg)
3. Dirección del viento con cuatro escenarios: Este, Norte, Oeste y Sur (0, 90, 180 y 270 grados respectivamente)
4. Volumen de ceniza ($(9 \times 10^8 \text{m}^3)$)

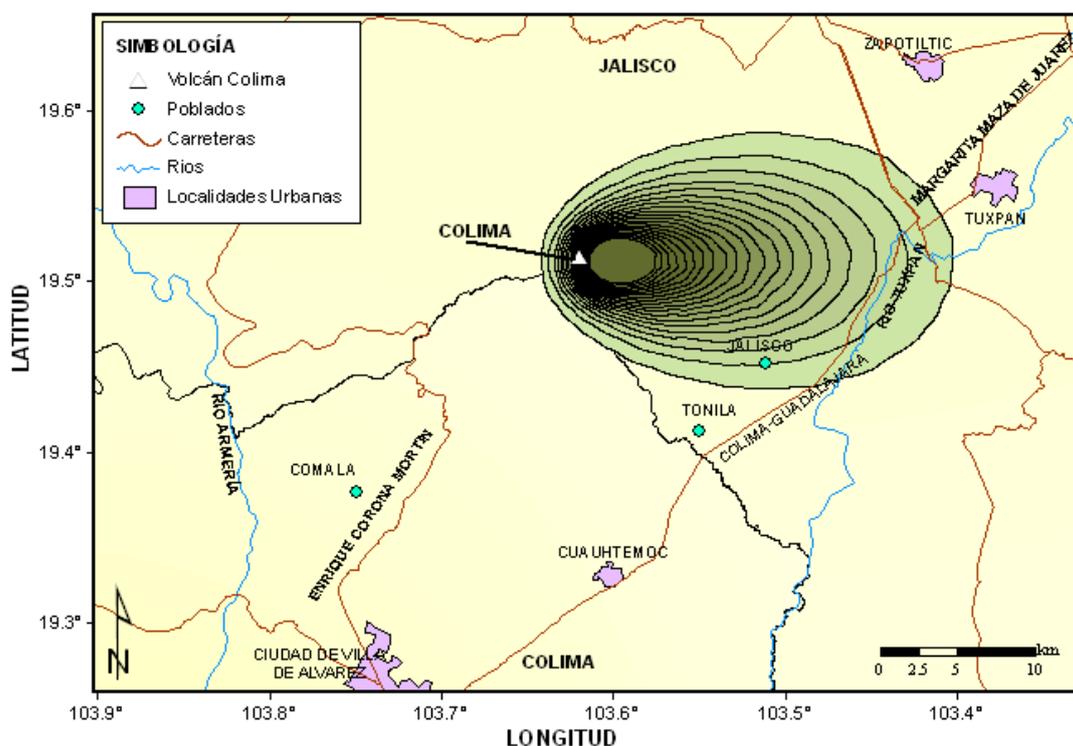


Figura 2.28 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Colima. Características del evento: altura de columna de 15 km, con velocidad de depósito de 1 m/s en dirección al este.

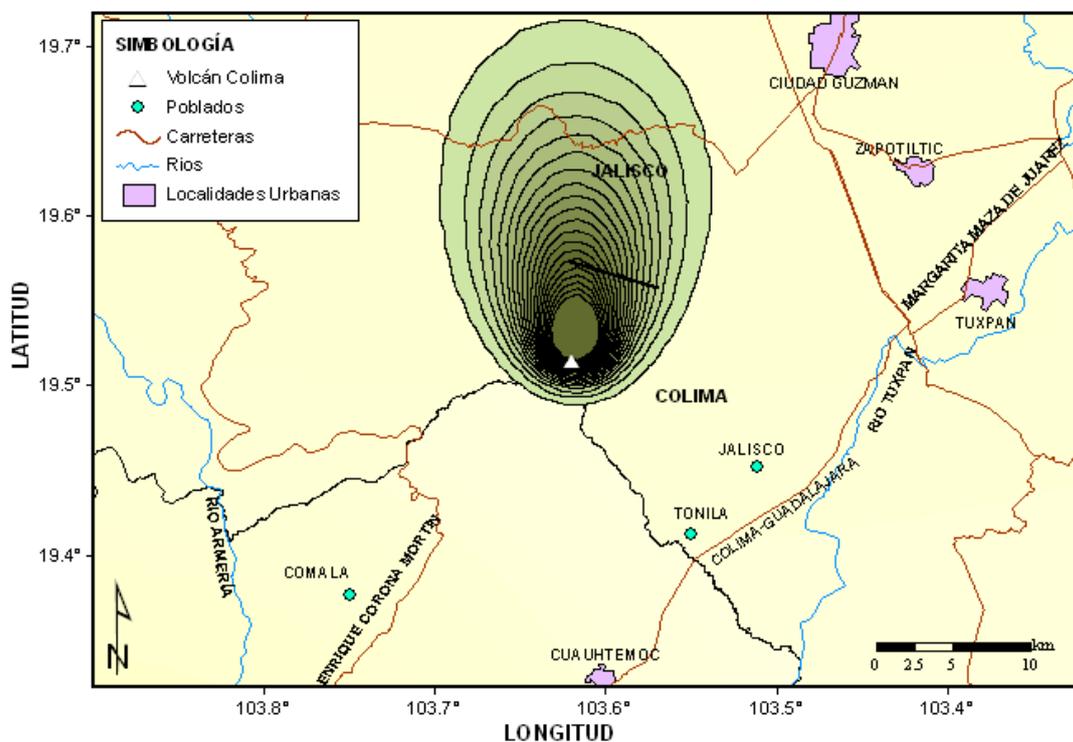


Figura 2.29 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Colima. Características del evento: altura de columna de 15 km, con velocidad de depósito de 1 m/s en dirección al norte.

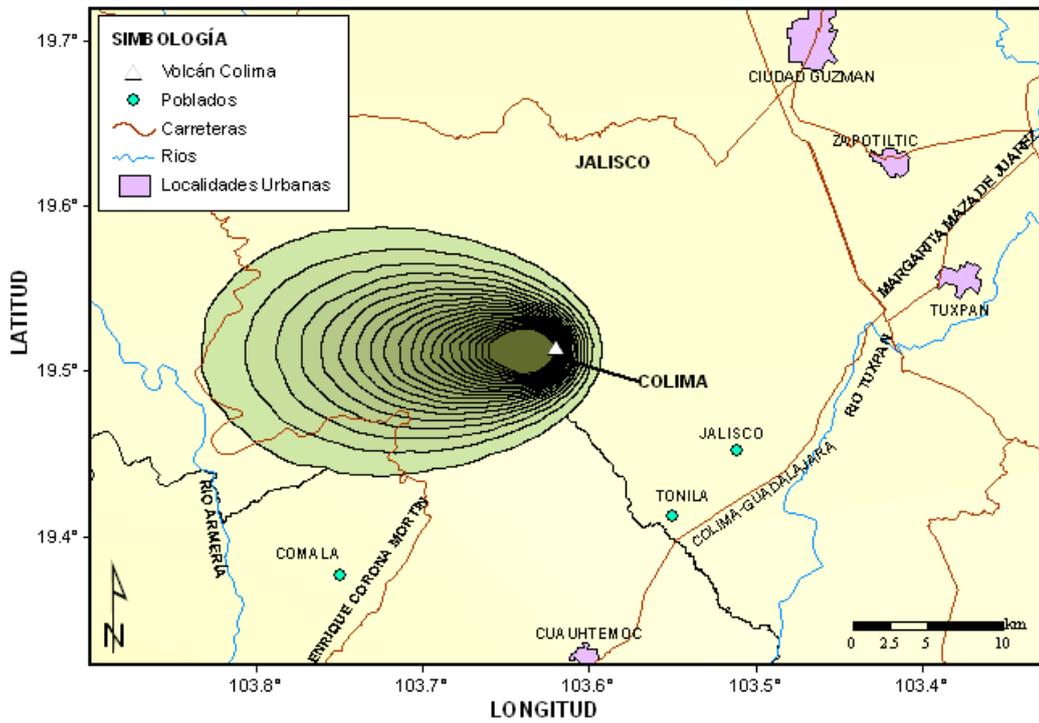


Figura 2.30 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Colima. Características del evento: altura de columna de 15 km, con velocidad de depósito de 1 m/s en dirección al oeste.

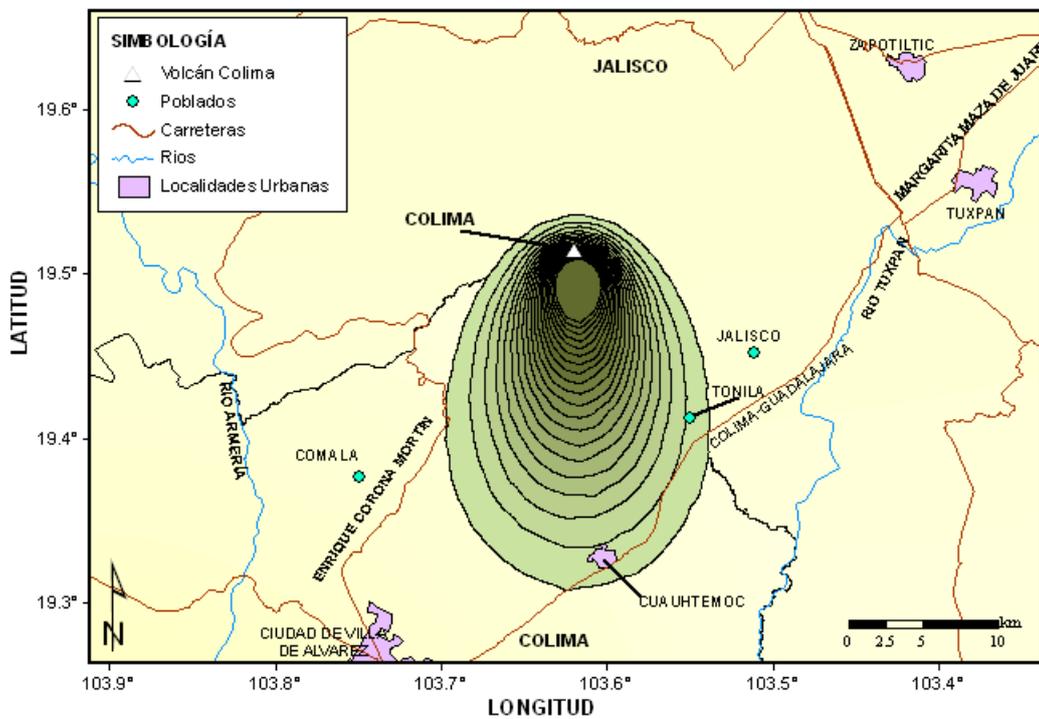


Figura 2.31 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Colima. Características del evento: altura de columna de 15 km, con velocidad de depósito de 1 m/s en dirección al sur.

2.3 Flujos Piroclásticos

2.3.1 Volcán Popocatepetl

Para los escenarios de flujos piroclásticos en el Popocatepetl se consideraron los siguientes parámetros:

1. El ángulo del cono de energía o conocido también como el ángulo tangente del coeficiente de fricción:

$$\text{atan} \frac{H}{L}$$

(1)

Donde H es la altura del volcán y L el alcance horizontal.

- a. Evento 1 (H/L=0.20)
- b. Evento 2 (H/L=0.116)

Estos parámetros se obtuvieron considerando un alcance horizontal de 17.5 km y 30 km (Robin y Boudal, 1987), y sabiendo que la altura del volcán respecto al entorno es 3.5 km (CENAPRED, 2005).

2. Altura de la columna eruptiva de 2 km

El mapa obtenido con estos valores es comparado con el Mapa de Peligros del volcán Popocatepetl elaborado por J. L. Macías (1995), Instituto de Geofísica, UNAM.

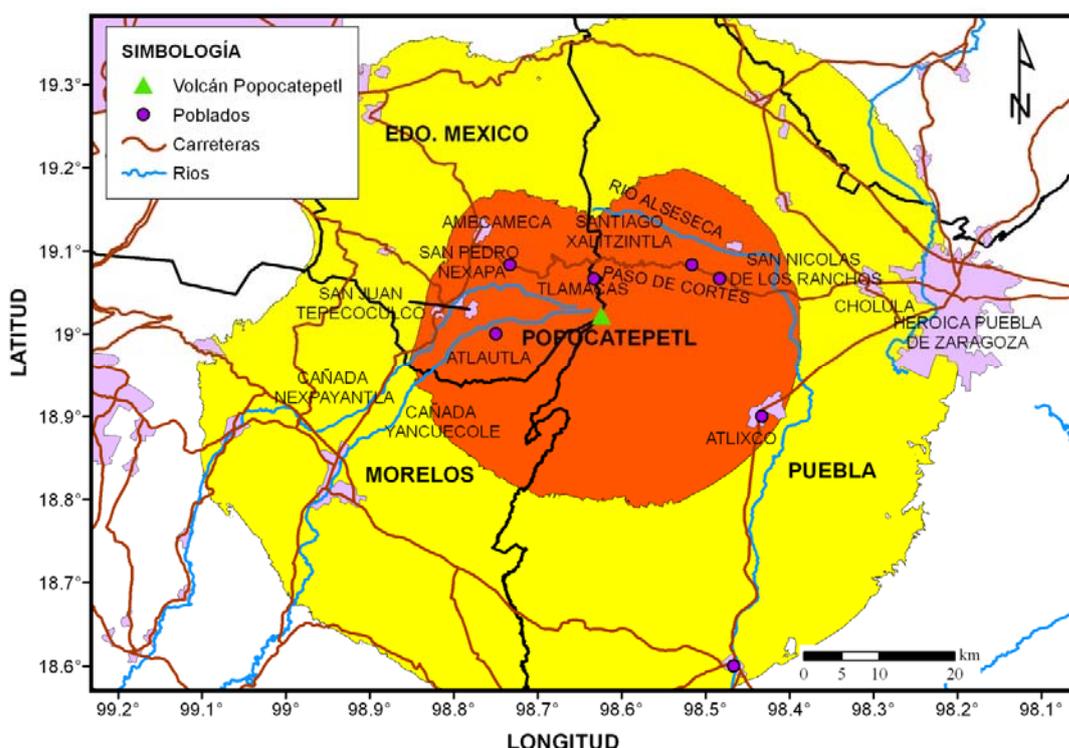


Figura 2.32 Mapa que delimita las áreas afectadas por los flujos piroclásticos para un alcance horizontal de 17.5 km y 30 km.

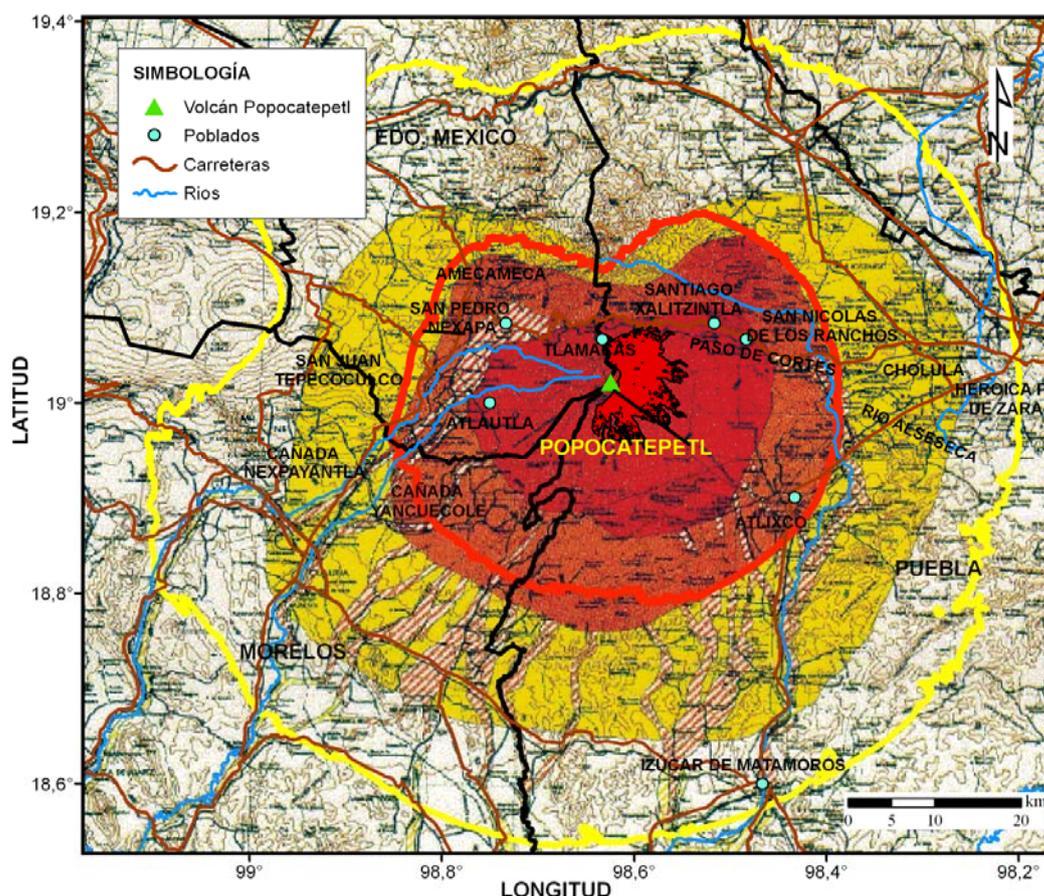


Figura 2.33 Comparación de los escenarios para flujos piroclásticos obtenidos con el programa ERN-Volcán con el mapa elaborado por Macías, et al.(1995) del volcán Popocatepetl.

Se pueden apreciar en las figuras 2.32 y 2.33 la coincidencia de las zonas de peligro generadas con el programa ERN-Volcán con el mapa elaborado por Macías et al.(1995) . En este mapa se observa que donde el flujo piroclástico alcanza mayor longitud horizontal es hacia el sur, puesto que al norte el flujo es menor por la obstrucción del paso por el Iztaccihuatl.

2.3.2 Volcán Citlaltépetl

Para los escenarios de flujos piroclásticos en el volcán Citlaltépetl se consideraron los parámetros:

1. El ángulo del cono de energía
 - a. Evento 1 ($H/L=0.14$)
 - b. Evento 2 ($H/L=0.2217$)

Estos parámetros se obtuvieron considerando un alcance horizontal de 20 km y 31 km aproximadamente, y sabiendo que la altura del volcán respecto al entorno es 4.4 km (Carrasco-Núñez, 1993).

2. Altura de la columna eruptiva de 2 km

El mapa obtenido con estos valores es comparado con el Mapa de Peligros del volcán Citlaltépetl elaborado por Sheridan et al. (2001), UNAM.

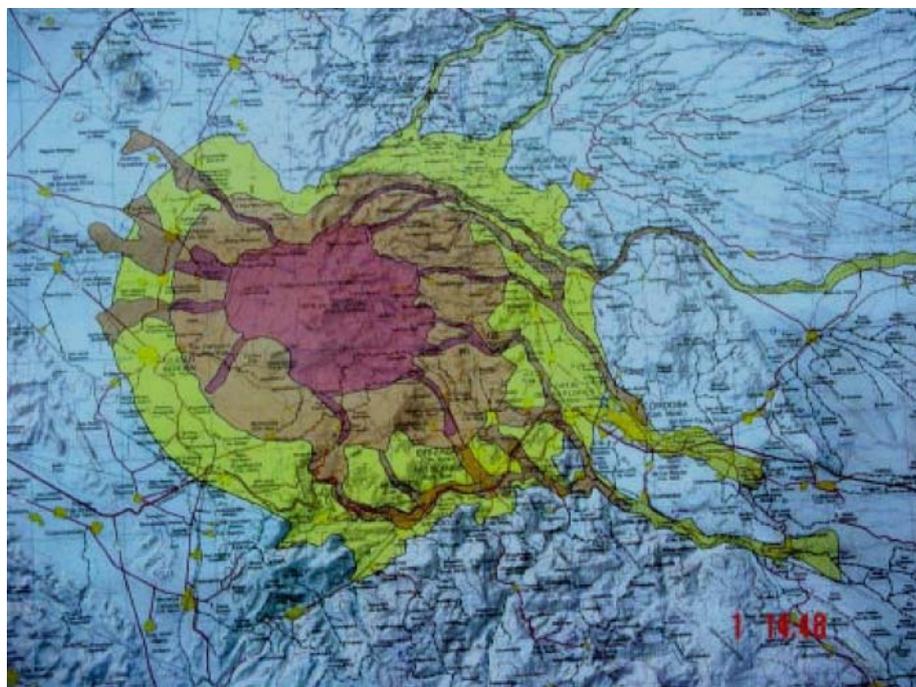


Figura 2.34 Mapa de Peligros del volcán Citlaltépetl (Pico de Orizaba). (Elaborado por: Sheridan et al., UNAM)

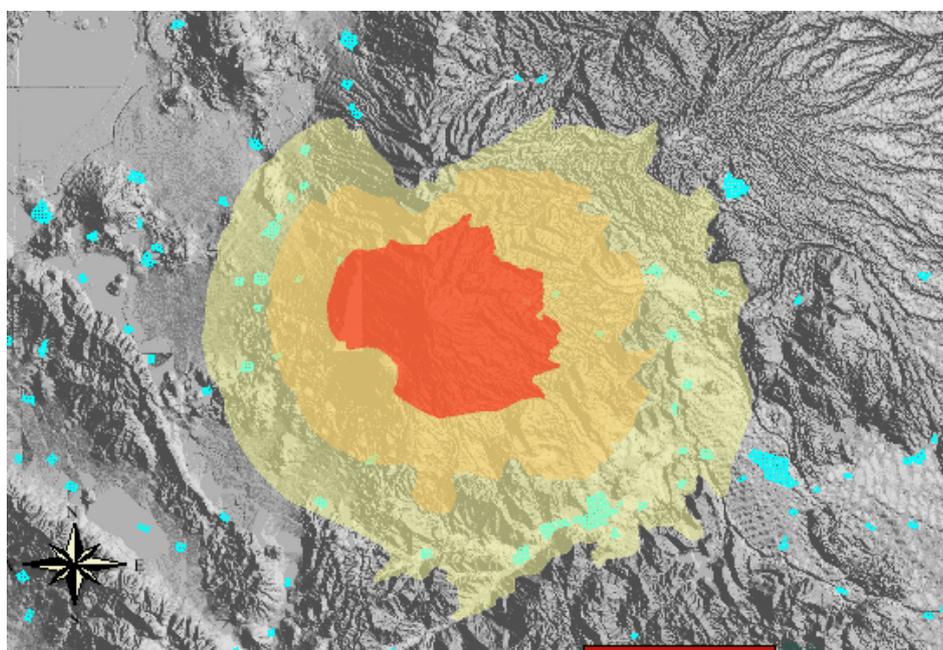


Figura 2.35 Mapa de peligros del volcán Citlaltépetl. (Elaborado por: CENAPRED).

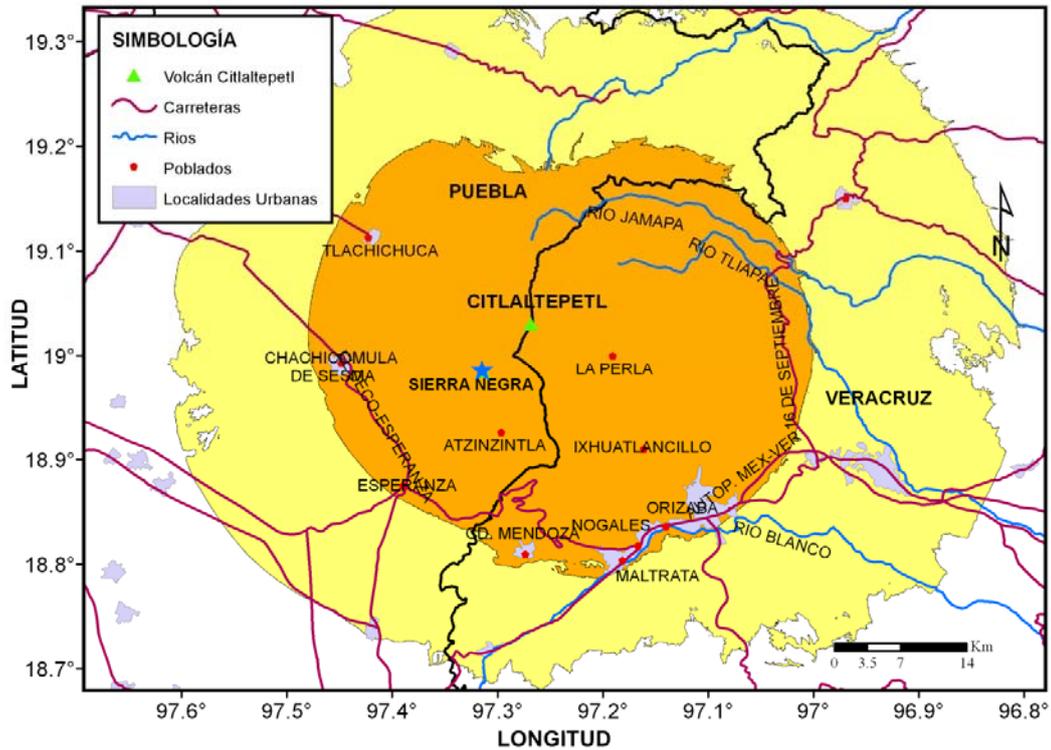


Figura 2.36 Mapa de flujos piroclásticos que delimita las áreas afectadas para un alcance horizontal de 20 km y 31 km aprox.

Podemos apreciar en estos mapas que las zonas de peligro potencial coinciden en forma y en algunos de los alcances que tendría el material dependiendo de la explosividad de la erupción que se presente.

2.3.3 Volcán Colima

Para los flujos piroclásticos en el volcán Colima se consideraron los siguientes parámetros:

1. El ángulo del cono de energía
 - a. Evento 1 ($H/L=0.41$) ---- Fase I
 - b. Evento 2 ($H/L=0.26$) ---- Fase II
 - c. Evento 3 ($H/L=0.17$) ---- Fase III

Estos parámetros se obtuvieron considerando un alcance horizontal de 9.39 km, 14.81 km y 22.65 km aproximadamente, y con una altura del volcán respecto al entorno es 3.85 km. Estos valores de los coeficientes de fricción se obtuvieron considerando el promedio de los valores estimados que se registraron históricamente.

2. Altura de la columna eruptiva de 1.4 km para la fase I y II, y 2.6 km para la fase III.

El mapa obtenido con estos valores es comparado con los Mapas de Peligros del volcán Colima elaborado por el CENAPRED y Saucedo et al. (2005).

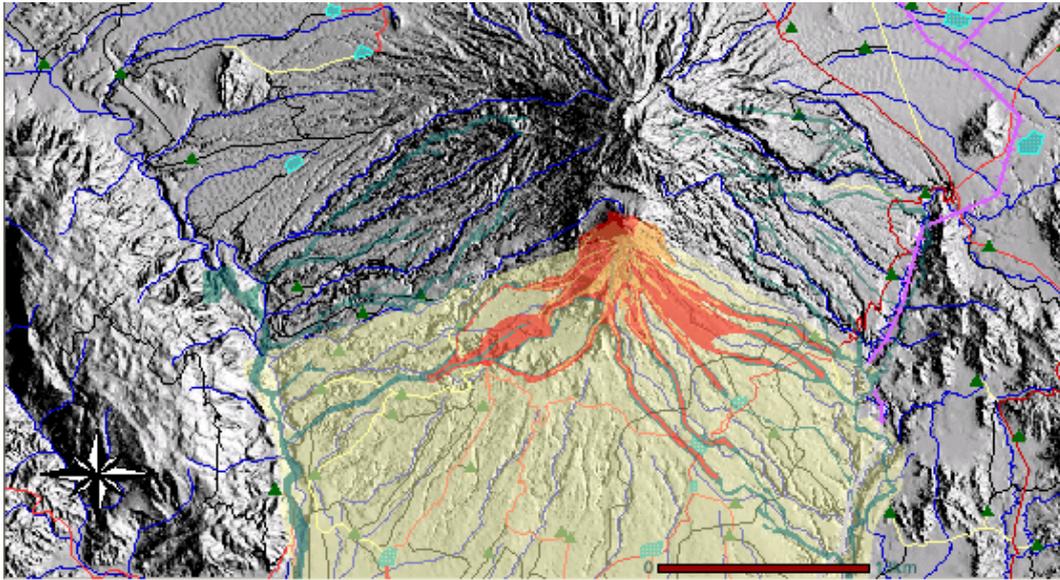


Figura 2.37 Delimita las áreas afectadas por lahares y zonas de inundación (>12 km), flujos de lava (hasta 8 km), flujos piroclásticos (alcance max.12 km) y avalancha de escombros volcánicos (>30 km). (Elaborado por: CENAPRED)

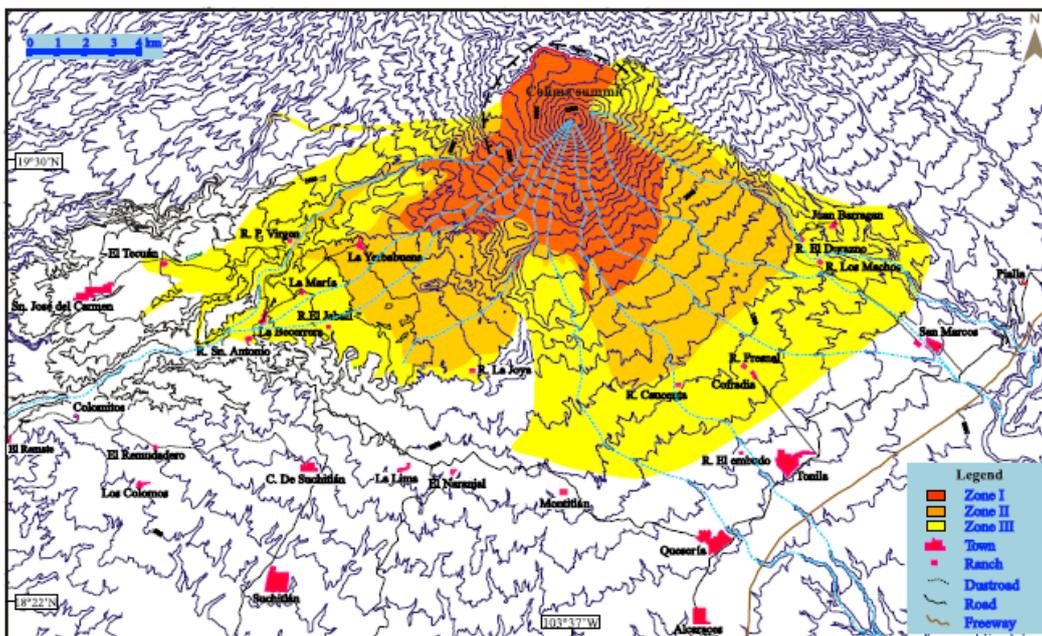


Figura 2.24 Mapa de peligro del Volcán Colima, muestra los escenarios para depósitos de flujos piroclásticos en 3 zonas: zona roja flujos piroclásticos de tipo Merapi, zona naranja flujos piroclásticos de tipo Soufriere y zona amarilla flujos piroclásticos por colapso de la columna eruptiva. (Elaborado por: Saucedo et. al., 2005)

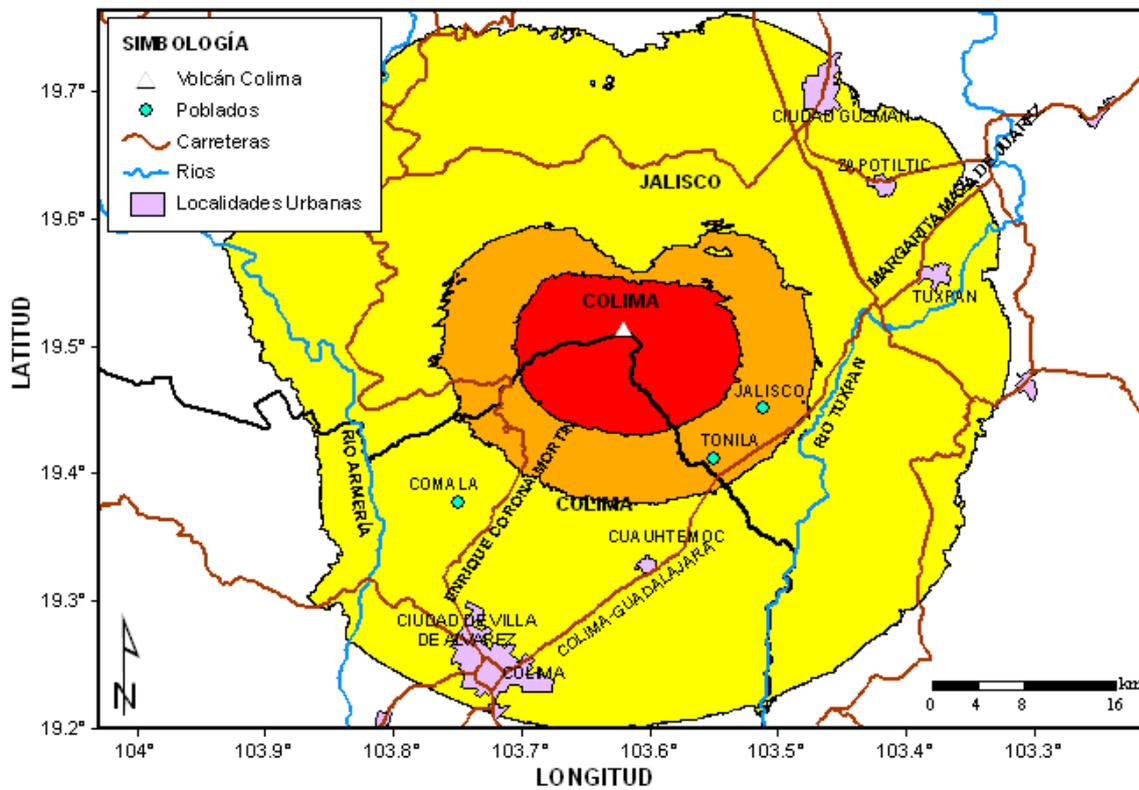


Figura 2.38 Mapa de flujos piroclásticos para el Volcán Colima, muestra los escenarios para los depósitos de cada una de las fases (fase I color rojo, fase II color anaranjado y fase III color amarillo).

2. 3 Flujos de Lava

2.3.1 Volcán Popocatépetl

Para el flujo de lava en el Popocatépetl solo se consideró un solo escenario con los siguientes parámetros:

1. Espesor del flujo de 1.5 metros.
2. Distancia máxima del flujo de 20,000 metros (aproximación obtenida de los escenarios del CENAPRED).

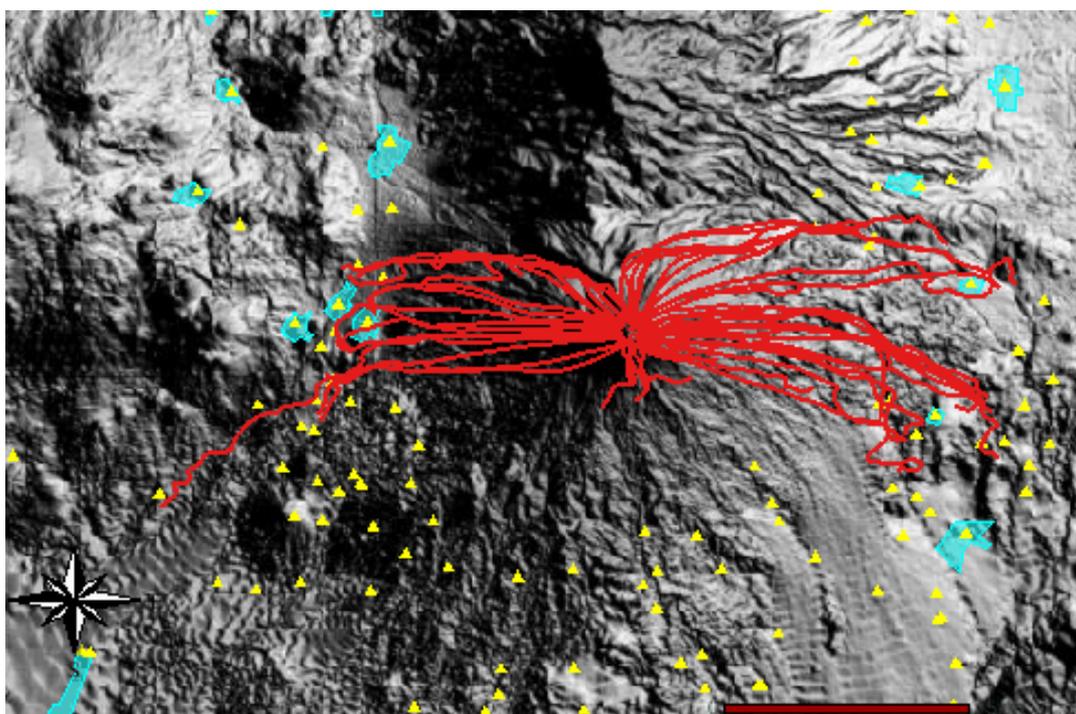


Figura 2.39 Escenario de lava con alta viscosidad (Imagen tomada del CENAPRED)

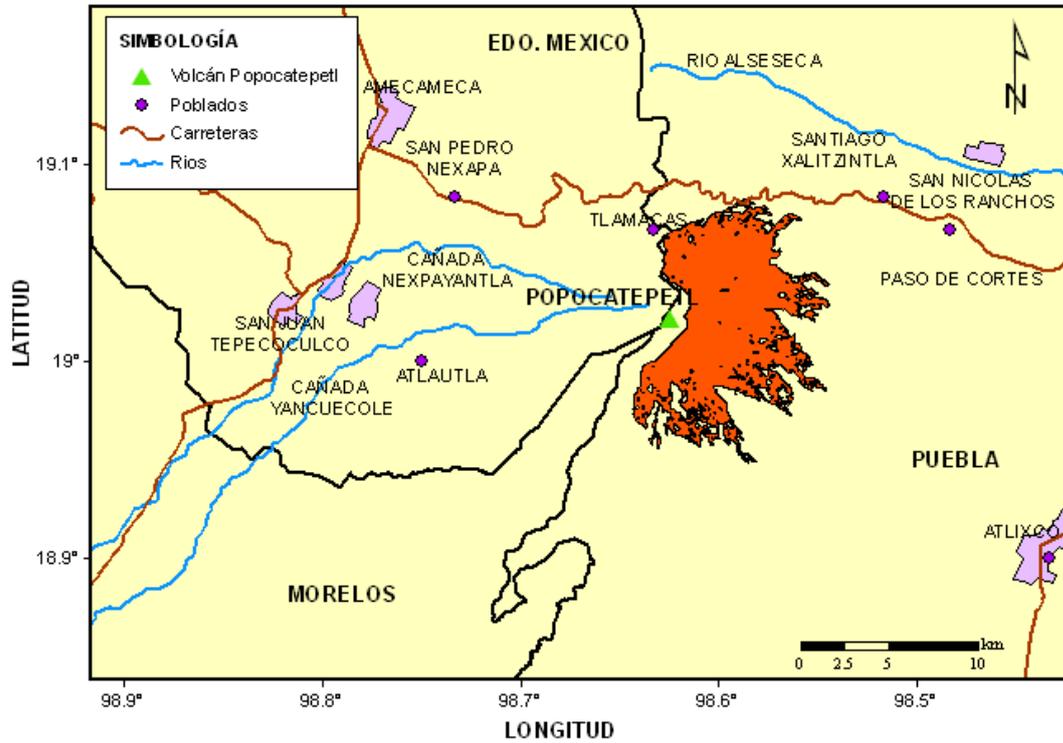


Figura 2.40 Áreas afectadas por el Flujo de Lavas

Las Figuras 2.39 y 2.40 se generaron además de los parámetros anteriormente mencionados, tomando en consideración una alta viscosidad de la lava, teniendo así resultados parecidos en la dirección del flujo de lava.

2.3.2 Volcán Citlaltépetl

Para el flujo de lava en el Citlaltépetl se hizo un solo escenario con los mismos parámetros que para el Popocatepetl:

1. Espesor del flujo de 1.5 metros.
2. Distancia máxima del flujo de 20,000 metros.(aproximadamente)

La Figura 2.41 es una imagen tomada de la página del CENAPRED la cual nos muestra el flujo de lava de alta viscosidad, así como los poblados cercanos que se verían afectados.

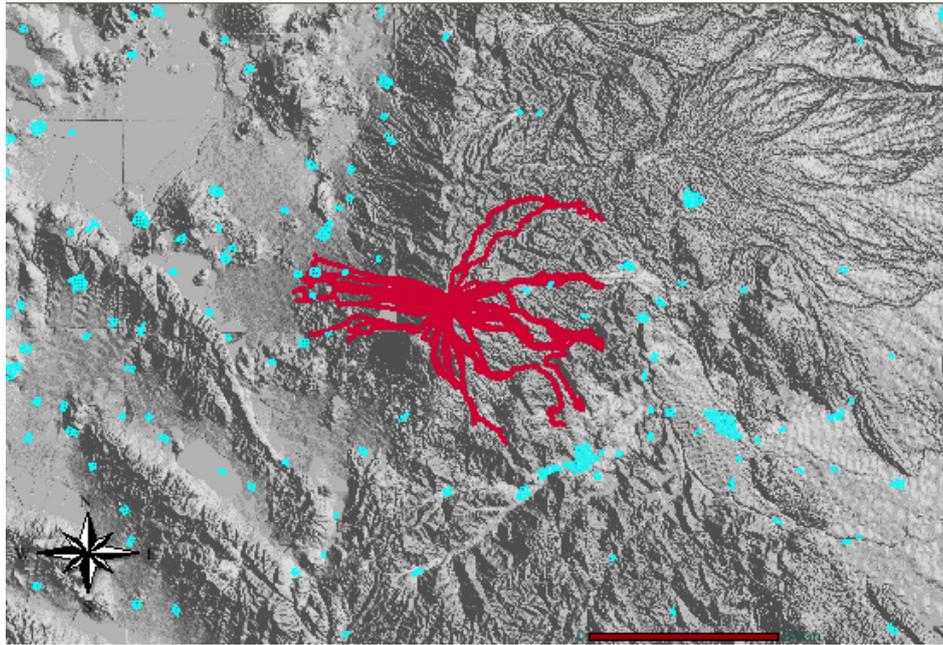


Figura 2.41 Escenario de lava con alta viscosidad (Imagen tomada del CENAPRED)

Por último en la Figura 2.42 se generó el mapa de flujos de lava considerando un tipo de lava con alta viscosidad y con alcance horizontal de 2 km, los cuales coinciden con los parámetros utilizados por el CENAPRED y los cuales nos permiten observar la dirección del flujo y las áreas afectadas.

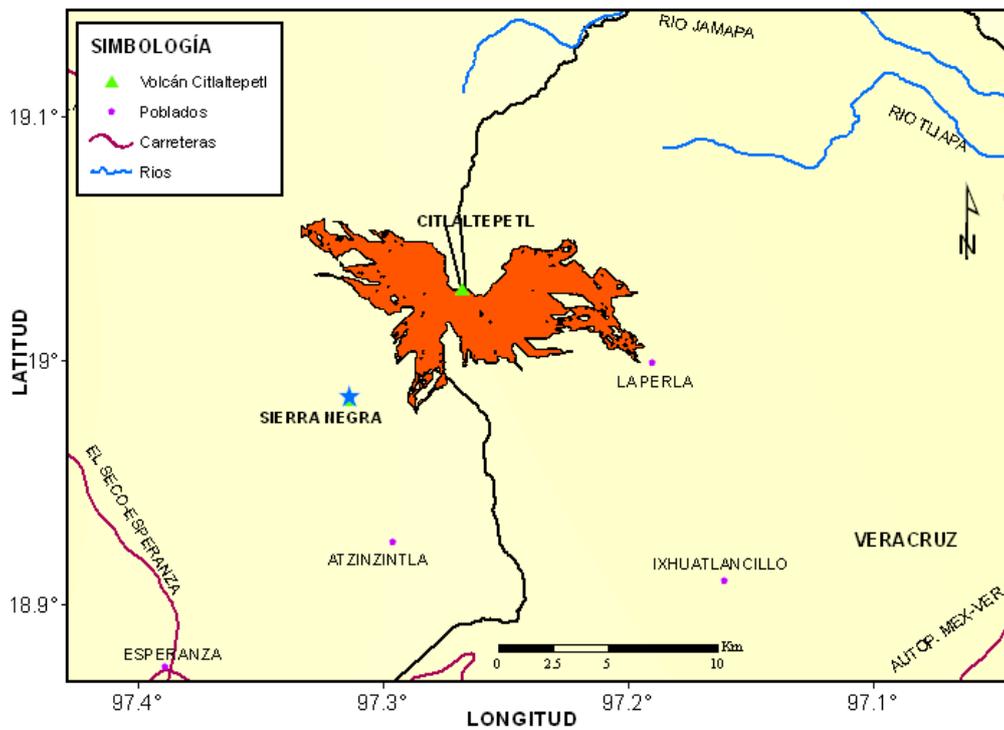


Figura 2.42 Áreas afectadas por el flujo de lavas

2.3.3 Volcán Colima

Para los flujos de lava en el volcán Colima de igual manera se hicieron en 3 Fases:

Fase I

1. Espesor del flujo de 0.19 metros.
2. Distancia máxima del flujo de 3,500 metros.(aproximadamente)

Fase II

1. Espesor del flujo de 4.35 metros.
2. Distancia máxima del flujo de 9,500 metros.(aproximadamente)

Fase III

1. Espesor del flujo de 15 metros.
2. Distancia máxima del flujo de 15,000 metros.(aproximadamente)

La Figura 2.43 es una imagen tomada de la página del CENAPRED la cual nos muestra el flujo de lava de alta viscosidad, así como los poblados cercanos que se verían afectados.

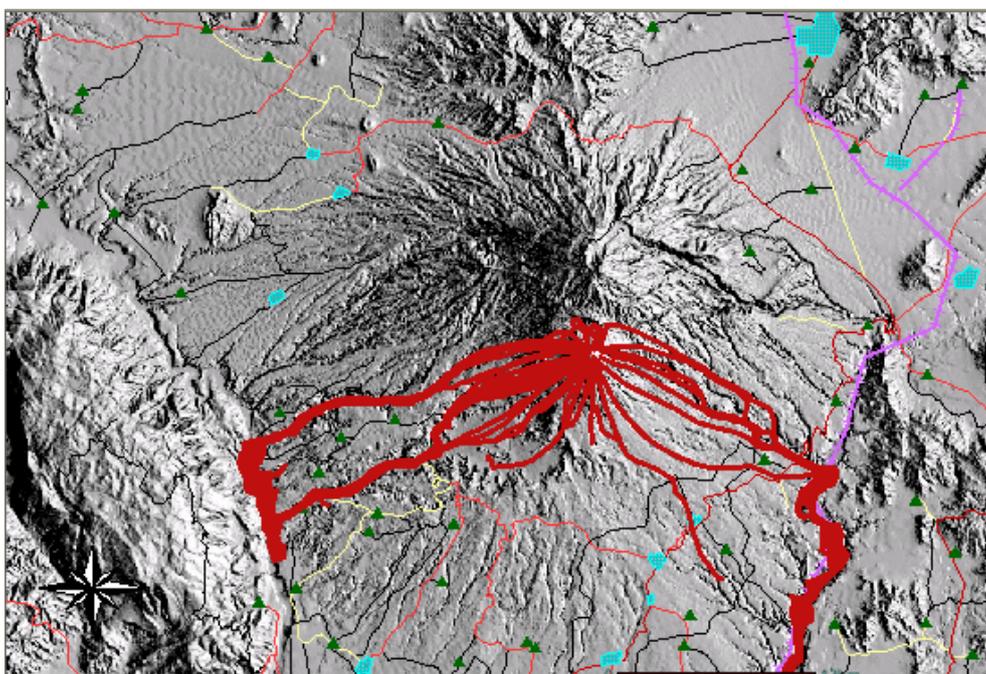


Figura 2.43 Escenario de Lava con alta viscosidad (Imagen tomada del CENAPRED).

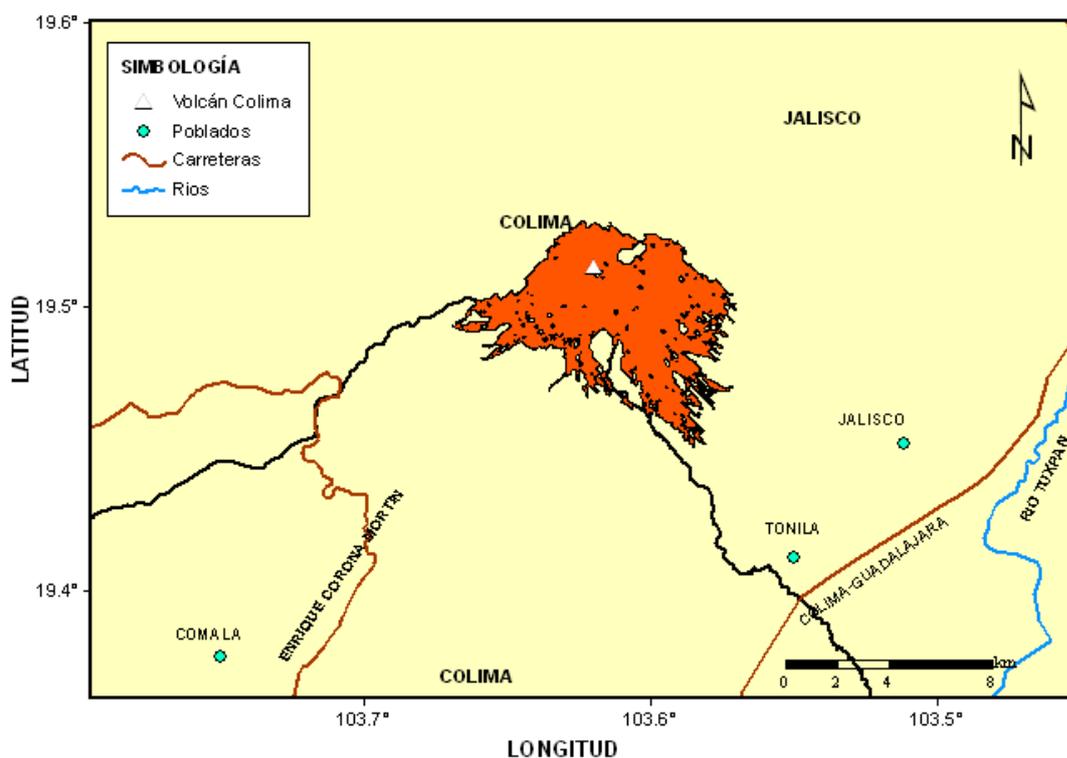


Figura 2.44 Áreas afectadas por el Flujo de Lavas

Los parámetros considerados para el caso del volcán Colima se propusieron tomando en cuenta la columna litoestratigráfica que presenta en su publicación Saucedo et. al. (2005), en la cual apreciamos que el mayor espesor en cuanto a los flujos piroclásticos es de 15 metros, además de esta columna se decidió relacionar estos datos con los que nos proporciona en la Tabla 2 de este mismo artículo, obteniendo así los tres distintos escenarios para cada una de las fases.

Como se puede observar en las imágenes obtenidas por el programa diseñado por el Instituto de Ingeniería (Figuras 2.40, 2.42 y 2.44) los escenarios para los flujos de lava están estrechamente ligados a la forma que tiene la topografía del lugar pues ya que dependiendo del ángulo de la pendiente puede la lava alcanzar una mayor o menor longitud horizontal, es decir, por ejemplo si tenemos una topografía que esté casi plana entonces el espesor de la lava puede ser mucho mas grande sin la necesidad de abarcar un área mayor, y por el contrario si la pendiente es muy pronunciada entonces el flujo será mas intenso hasta que choque con alguna estructura elevada la cual le impidiera el paso, pero esto puede ser a unos pocos metros de longitud o puede no presentarse dicha estructura elevada.

También se debe considerar que el programa utiliza puntos que considera los mas probables por los cuales puede fluir la lava es por esto que la forma del área que alcanzan los flujos no es simétrica y no varía la dirección hacia la cual se moverán estos flujos.

Así pues la modelación de los escenarios para cada una de las respectivas fases es el mismo pues además de los parámetros empleados habría que tomar en cuenta lo anteriormente explicado, así como la viscosidad de la lava, el volumen etc. Cabe recalcar que esto es válido no solo para el volcán Colima sino también para los volcanes Popocatepetl y Citlaltépetl.

Capítulo 3

Recopilación de Datos

3.1 Patrones de Ocurrencia Eruptiva por Distribución de Poisson

De la Cruz-Reina (1991) publicó que los patrones de ocurrencia eruptiva de la actividad volcánica de explosividad media a alta, (VEI mayor de 3) podían ser descritos por una distribución de Poisson de la forma:

$$p(x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!} \quad (2)$$

Donde λ es el rango promedio de ocurrencia de erupción por unidad de tiempo, es decir, el número total de erupciones en un valor de VEI dividido entre la duración total histórica, y $p(x)$ es la probabilidad de que x erupciones ocurran en un cierto intervalo de tiempo.

De la Cruz-Reyna (1993) toma la disponibilidad de los datos históricos del volcán para clasificar el tamaño de la erupción dependiendo del VEI. Estos datos muestran que si las erupciones se toman en cuenta sobre cierto nivel de VEI los eventos aleatorios asociados con los eventos eruptivos pueden ser representados por un proceso no estacionario de Poisson el cual puede ser reducido a un proceso homogéneo de Poisson a través de una transformación en el eje del tiempo. Cuando las erupciones se separan por valores de VEI los patrones de ocurrencia de cada magnitud pueden ser representados por la distribución de Poisson. El análisis de la tasa de ocurrencia de todas las erupciones con VEI mayor que 1 permite reconocer las etapas de actividad volcánica durante los años pasados.

Una buena recopilación de la información histórica y geológica disponible, es decir, una documentación completa de fechas con sus respectivos valores de VEI debería verse reflejada en una mejor definición de la distribución que describe la ocurrencia de las erupciones.

Es por esto que a partir de la historia eruptiva de los volcanes se genere una tabla en la cual se tengan fechadas la mayor cantidad de erupciones posibles con su respectivo VEI. A continuación se presentan el número de erupciones reportadas por categoría VEI, para el volcán Popocatepetl, Citlaltépetl y Colima:

Tabla 3.1 Historia eruptiva del volcán Popocatepetl.

Evento	Fecha inicio	Fecha término	Año	VEI
1	09/01/2005	2010 cont	2005	2*
2	26/05/2004	26/05/2004	2004	2*
3	01/2001	-----	2001	3*
4	21/12/1994	05/10/1995	1994	2**
5	00/01/1947	00/02/1947	1947	1*
6	1942	1943	1942	1*
7	23/01/1933	-----	1933	1*
8	1925	1927	1925	2**
9	27/11/1927	07/03/1924	1927	1*
10	19/02/1919	1922	1919	1*
11	1852	-----	1852	1*
12	1834	-----	1834	1*
13	1827	-----	1827	1*
14	1802	-----	1802	1*
15	1720	-----	1720	1**
16	20/10/1627	-----	1627	1*
17	1666	1667	1666	2*
18	13/10/1663	19/10/1665	1663	3*
19	1642	-----	1642	2**
20	1592	1594	1592	2**
21	1590	-----	1590	2*
22	1580	-----	1580	2*
23	1571	-----	1571	2**
24	1548	-----	1548	2**
25	1542	-----	1542	2*
26	1539	-----	1539	2**
27	1530	-----	1530	2*
28	1528	-----	1528	2*
29	00/09/1519	1523	1519	3**
30	1518	-----	1518	2*
31	1512	-----	1512	2**
32	1509	-----	1509	-----
33	1504	-----	1504	2*
34	1488	-----	1488	2*
35	1363	-----	1363	2*
36	1354	-----	1354	2*
37	1345	1347	1345	2*
38	01/03/823 dC +/- 90 días	-----	823 dC	-----
39	250 dC	-----	250 dC	-----
40	200 aC +/- 300 años	-----	200 aC	-----
41	1890 aC +/- 75 años	-----	1890 aC	-----
42	2370 aC +/- 75 años	-----	2370 aC	-----
43	3010 aC +/- 200 años	-----	3010 aC	4**
44	5150 aC	-----	5150 aC	-----
45	6250 aC +/- 500 años	-----	6250 aC	-----
46	7150 aC	-----	7150 aC	-----

* Tomado de URL <http://www.volcano.si.edu>

**Tomado de De la Cruz-Reyna (2007)

Tabla 3.2 Historia eruptiva del volcán Citlaltépetl.

Evento	Fecha inicio	Fecha término	Año	VEI
1	1846	-----	1846	2**
2	1687	-----	1687	2**
3	1613	-----	1613	-----
4	1569	1589	1569	2**
5	1566	-----	1566	2*
6	1545	1555 +/- 10 años	1545	2**
7	1533	1539	1533	2**
8	1531	-----	1531	2*
9	1260 +/- 50 años	-----	1260	3
10	1187	-----	1187	2*
11	1175	-----	1175	3*
12	1157	-----	1157	2*
13	220 dC +/- 75 años	-----	220 dC	3*
14	140 dC +/- 50 años	-----	140 dC	3*
15	90 dC +/- 40 años	-----	90 dC	3*
16	40 dC +/- 40 años	-----	40 dC	3*
17	780 aC +/- 50 años	-----	780 aC	3*
18	1500 aC +/- 75 años	-----	1500 aC	3*
19	2110 aC +/- 100 años	-----	2110 aC	3*
20	2300 aC +/- 75 años	-----	2300 aC	4*
21	2500 aC +/- 75 años	-----	2500 aC	3*
22	2780 aC +/- 75 años	-----	2780 aC	3*
23	4690 aC +/- 300 años	-----	4690 aC	3*
24	6220 aC +/- 75 años	-----	6220 aC	3*
25	6710 aC +/- 150 años	-----	6710 aC	5*
26	7030 aC +/- 50 años	-----	7030 aC	4*
27	7530 aC +/- 40 años	-----	7530 aC	4*
28	hace 9000-8000	-----	-----	4**

* Tomado de URL <http://www.volcano.si.edu>

* Tomado de De la cruz-Reyna, Carrasco-Núñez (2002)

Tabla 3.3 Historia eruptiva del volcán Colima.

Evento	Fecha inicio	Fecha término	Año	VEI
1	22/11/1997	2010 cont	1997	3*
2	21/07/1994	21/07/1994	1994	1*
3	01/03/1991	00/10/1991	1991	2*
4	15/06/1988 +/- 180 días		1988	2*
5	02/07/1987	02/07/1987	1987	1**
6	1985	05/01/1986 +/- 4 días	1985	1*
7	11/02/1983	15/02/1983	1983	1*
8	00/12/1977	00/06/1982	1977	1
9	11/12/1975	20/06/1976	1975	2
10	30/01/1973	-----	1973	1
11	1963	1970	1963	1
12	1961	1/12/1966 +/- 30 días	1961	1
13	14/05/1957	1960	1957	1
14	15/04/1941	-----	1941	3
15	1926 +/- 4 años	1931	1962	1
16	17/01/1913	24/01/1913	1913	5
17	18/12/1908	01/07/1909 +/- 30 días	1908	3**
18	1904	1906	1904	1**
19	15/02/1903	00/08/1903	1903	3
20	04/12/1893	1902	1893	2
21	00/07/1891	00/06/1892	1891	2
22	18/11/1890	-----	1890	4**
23	09/08/1889	16/02/1890	1889	4
24	1887	-----	1887	-----
25	26/12/1885	00/10/1886	1895	3
26	1882	1884	1882	1
27	01/12/1880 +/- 30 días	12/04/1881	1880	2
28	23/12/1879	30/04/1880	1879	1**
29	1875	1878	1875	1

30	12/06/1874	-----	1874	1**
31	26/02/1872	27/03/1873	1872	3**
32	1870	1871	1870	----
33	12/06/1869	24/08/1869	1869	3**
34	04/03/1866	1868	-----	-----
35	1819	-----	1819	1
36	15/02/1818	16/02/1818	1818	4**
37	25/03/1806	1809	1806	2
38	1804	-----	1804	2**
39	00/03/1795	00/09/1795	1795	2**
40	00/08/1794	-----	1794	2
41	26/11/1780	-----	1780	2
42	1771	-----	1771	3
43	10/03/1770	12/03/1770	1770	3**
44	1769	-----	1769	2
45	1749	-----	1749	2**
46	1744	-----	1744	2
47	22/10/1743	-----	1743	2
48	1711	-----	1711	3
49	1690	-----	1690	3**
50	08/06/1622	09/06/1622	1622	4**
51	15/04/1611	1613	1611	3**
52	25/11/1606	13/12/1606	1606	4**
53	1602	-----	1602	2
54	14/01/1590	15/01/1590	1590	3**
55	10/01/1585	-----	1585	4**
56	1576	-----	1576	3**
57	1560	-----	1560	2**
58	1519	1523	1519	3
59	1110 +/- 200 años	-----	1110	-----
60	730 dC +/- 100 años	-----	730 dC	-----
61	540 dC +/- 150 años	-----	540 dC	-----
62	650 aC +/- 200 años	-----	650 dC	-----
63	1140 aC	-----	1140 aC	-----
64	1170 aC +/- 200 años	-----	1170 aC	-----
65	1320 aC	-----	1320 aC	-----
66	1450 aC +/- 100 años	-----	1450 aC	-----
67	1890 aC +/- 75 años	-----	1890 aC	-----
68	1940 aC +/- 300 años	-----	1940 aC	-----
69	2370 aC +/- 150 años	-----	2370 aC	4
70	2800 aC +/- 100 años	-----	2800 aC	-----
71	3030 aC +/- 50 años	-----	3030 aC	-----
72	3180 aC +/- 100 años	-----	3180 aC	-----
73	3270 aC	-----	3270 aC	-----
74	3350 aC +/- 300 años	-----	3350 aC	-----
75	3510 aC +/- 200 años	-----	3510 aC	-----
76	3600 aC +/- 200 años	-----	3600 aC	-----
77	4110 aC +/- 100 años	-----	4110 aC	-----
78	4430 aC +/- 300 años	-----	4430 aC	-----
79	4500 aC +/- 200 años	-----	4500 aC	-----
80	4960 aC +/- 200 años	-----	4960 aC	-----
81	5880 aC +/- 200 años	-----	5880 aC	-----
82	6320 aC +/- 200 años	-----	6320 aC	-----
83	7420 aC +/- 500 años	-----	7420 aC	-----
84	7690 aC +/- 500 años	-----	7690 aC	-----

* Tomado de URL <http://www.volcano.si.edu>

**Tomado de De la Cruz-Reyna(1993)

3.2 Secuencia eruptiva Poissoniana dependiente del tiempo.

Muestrear un volcán es más fácil cuando se cuenta con buena información histórica y/o geológica pues se puede obtener correctamente la fecha de las erupciones y su respectivo VEI, lo cual se refleja en un mejor ajuste en la distribución.

Las Tablas 3.4, 3.5 y 3.6 se construyeron a partir de la historia eruptiva de los volcanes (Tablas 3.1, 3.2 y 3.3) contando el numero de erupciones de cada volcán por década para cada valor de VEI en el rango de 2 y 3 para el caso del Popocatépetl y Citlaltépetl y de 2 a 4 para el caso del volcán de Colima.

Tabla 3.4 Número de erupciones registradas en el volcán Popocatépetl por valor de VEI (décadas).

(décadas)	VEI					Núm. Acumulativo	
	2	3	4	≥2	≥3	≥2	≥3
1340-49	1	0	0	1	0	1	0
1350-59	1	0	0	1	0	2	0
1360-69	1	0	0	1	0	3	0
1370-79	0	0	0	0	0	3	0
1380-89	0	0	0	0	0	3	0
1390-99	0	0	0	0	0	3	0
1400-09	0	0	0	0	0	3	0
1410-19	0	0	0	0	0	3	0
1420-29	0	0	0	0	0	3	0
1430-39	0	0	0	0	0	3	0
1440-49	0	0	0	0	0	3	0
1450-59	0	0	0	0	0	3	0
1460-69	0	0	0	0	0	3	0
1470-79	0	0	0	0	0	3	0
1480-89	1	0	0	1	0	4	0
1490-99	0	0	0	0	0	4	0
1500-09	1	0	0	1	0	5	0
1510-19	2	1	0	3	1	8	1
1520-29	1	0	0	1	0	9	1
1530-39	2	0	0	2	0	11	1
1540-49	2	0	0	2	0	13	1
1550-59	0	0	0	0	0	13	1
1560-69	0	0	0	0	0	13	1
1570-79	1	0	0	1	0	14	1
1580-89	1	0	0	1	0	15	1
1590-99	2	0	0	2	0	17	1
1600-09	0	0	0	0	0	17	1
1610-19	0	0	0	0	0	17	1
1620-29	0	0	0	0	0	17	1
1630-39	0	0	0	0	0	17	1
1640-49	1	0	0	1	0	18	1
1650-59	0	0	0	0	0	18	1
1660-69	1	1	0	2	1	20	2
1670-79	0	0	0	0	0	20	2
1680-89	0	0	0	0	0	20	2
1690-99	0	0	0	0	0	20	2
1700-09	0	0	0	0	0	20	2
1710-19	0	0	0	0	0	20	2
1720-29	0	0	0	0	0	20	2
1730-39	0	0	0	0	0	20	2
1740-49	0	0	0	0	0	20	2
1750-59	0	0	0	0	0	20	2
1760-69	0	0	0	0	0	20	2
1770-79	0	0	0	0	0	20	2
1780-89	0	0	0	0	0	20	2
1790-99	0	0	0	0	0	20	2
1800-09	0	0	0	0	0	20	2
1810-19	0	0	0	0	0	20	2
1820-29	0	0	0	0	0	20	2
1830-39	0	0	0	0	0	20	2
1840-49	0	0	0	0	0	20	2
1850-59	0	0	0	0	0	20	2
1860-69	0	0	0	0	0	20	2
1870-79	0	0	0	0	0	20	2
1880-89	0	0	0	0	0	20	2

1890-99	0	0	0	0	0	20	2
1900-09	0	0	0	0	0	20	2
1910-19	0	0	0	0	0	20	2
1920-29	1	0	0	1	0	21	2
1930-39	0	0	0	0	0	21	2
1940-49	0	0	0	0	0	21	2
1950-59	0	0	0	0	0	21	2
1960-69	0	0	0	0	0	21	2
1970-79	0	0	0	0	0	21	2
1980-89	0	0	0	0	0	21	2
1990-99	1	1	0	2	1	23	3
2000-09	2	0	0	2	0	25	3
Total=	22	3	0	25	3		

Tabla 3.5 Número de erupciones registradas en el volcán Citlaltépetl por valor de VEI (décadas).

(décadas)	VEI				Num. Acumulativo	
	2	3	≥2	≥3	≥2	≥3
1150-59	1	0	1	0	1	0
1160-69	0	0	0	0	1	0
1170-79	0	1	1	1	2	1
1180-89	1	0	1	0	3	1
1190-99	0	0	0	0	3	1
1200-09	0	0	0	0	3	1
1210-19	0	0	0	0	3	1
1220-29	0	0	0	0	3	1
1230-39	0	0	0	0	3	1
1240-49	0	0	0	0	3	1
1250-59	0	0	0	0	3	1
1260-69	0	1	1	1	4	2
1270-79	0	0	0	0	4	2
1280-89	0	0	0	0	4	2
1290-99	0	0	0	0	4	2
1300-09	0	0	0	0	4	2
1310-19	0	0	0	0	4	2
1320-29	0	0	0	0	4	2
1330-39	0	0	0	0	4	2
1340-49	0	0	0	0	4	2
1350-59	0	0	0	0	4	2
1360-69	0	0	0	0	4	2
1370-79	0	0	0	0	4	2
1380-89	0	0	0	0	4	2
1390-99	0	0	0	0	4	2
1400-09	0	0	0	0	4	2
1410-19	0	0	0	0	4	2
1420-29	0	0	0	0	4	2
1430-39	0	0	0	0	4	2
1440-49	0	0	0	0	4	2
1450-59	0	0	0	0	4	2
1460-69	0	0	0	0	4	2
1470-79	0	0	0	0	4	2
1480-89	0	0	0	0	4	2
1490-99	0	0	0	0	4	2
1500-09	0	0	0	0	4	2
1510-19	0	0	0	0	4	2
1520-29	0	0	0	0	4	2
1530-39	2	0	2	0	6	2
1540-49	1	0	1	0	7	2

1550-59	0	0	0	0	7	2
1560-69	2	0	2	0	9	2
1570-79	0	0	0	0	9	2
1580-89	0	0	0	0	9	2
1590-99	0	0	0	0	9	2
1600-09	0	0	0	0	9	2
1610-19	0	0	0	0	9	2
1620-29	0	0	0	0	9	2
1630-39	0	0	0	0	9	2
1640-49	0	0	0	0	9	2
1650-59	0	0	0	0	9	2
1660-69	0	0	0	0	9	2
1670-79	0	0	0	0	9	2
1680-89	1	0	1	0	10	2
1690-99	0	0	0	0	10	2
1700-09	0	0	0	0	10	2
1710-19	0	0	0	0	10	2
1720-29	0	0	0	0	10	2
1730-39	0	0	0	0	10	2
1740-49	0	0	0	0	10	2
1750-59	0	0	0	0	10	2
1760-69	0	0	0	0	10	2
1770-79	0	0	0	0	10	2
1780-89	0	0	0	0	10	2
1790-99	0	0	0	0	10	2
1800-09	0	0	0	0	10	2
1810-19	0	0	0	0	10	2
1820-29	0	0	0	0	10	2
1830-39	0	0	0	0	10	2
1840-49	1	0	1	0	11	2
1850-59	0	0	0	0	11	2
Total=	9	2	11	2		

Tabla 3.6 Número de erupciones registradas en el volcán Colima por valor de VEI (décadas).

(décadas)	VEI					Núm. Acumulativo		
	2	3	4	≥2	≥3	≥2	≥3	≥4
1560-69	1	0	0	1	0	1	0	0
1570-79	0	1	0	1	1	2	1	0
1580-89	0	0	1	1	1	3	2	1
1590-99	0	1	0	1	1	4	3	1
1600-09	0	0	1	1	1	5	4	2
1610-19	1	1	0	2	1	7	5	2
1620-29	0	0	1	1	1	8	6	3
1630-39	0	0	0	0	0	8	6	3
1640-49	0	0	0	0	0	8	6	3
1650-59	0	0	0	0	0	8	6	3
1660-69	0	0	0	0	0	8	6	3
1670-79	0	0	0	0	0	8	6	3
1680-89	0	0	0	0	0	8	6	3
1690-99	0	1	0	1	1	9	7	3
1700-09	0	0	0	0	0	9	7	3
1710-19	0	0	0	0	0	9	7	3
1720-29	0	0	0	0	0	9	7	3
1730-39	0	0	0	0	0	9	7	3
1740-49	1	0	0	1	0	10	7	3
1750-59	0	0	0	0	0	10	7	3
1760-69	0	0	0	0	0	10	7	3
1770-79	0	1	0	1	1	11	8	3
1780-89	0	0	0	0	0	11	8	3
1790-99	1	0	0	1	0	12	8	3
1800-09	1	0	0	1	0	13	8	3
1810-19	0	0	1	1	1	14	9	4
1820-29	0	0	0	0	0	14	9	4
1830-39	0	0	0	0	0	14	9	4
1840-49	0	0	0	0	0	14	9	4
1850-59	0	0	0	0	0	14	9	4
1860-69	0	1	0	1	1	15	10	4
1870-79	0	1	0	1	1	16	11	4
1880-89	1	2	0	3	2	19	13	4

1890-99	1	0	1	2	1	21	14	5
1900-09	1	2	0	3	2	24	16	5
1910-19	0	0	1	1	1	25	17	6
1920-29	0	0	0	0	0	25	17	6
1930-39	0	0	0	0	0	25	17	6
1940-49	0	0	0	0	0	25	17	6
1950-59	0	0	0	0	0	25	17	6
1960-69	0	0	0	0	0	25	17	6
1970-79	0	0	0	0	0	25	17	6
1980-89	0	0	0	0	0	25	17	6
Total=	8	11	6	25	17			

La construcción de una gráfica acumulativa de un volumen de magma expulsado en una serie de erupciones, proporciona importantes herramientas para el análisis de las tasas de producción volcánica. Es por esto que se considera que los patrones de las erupciones siguen una distribución de Poisson

El análisis de las gráficas de número acumulativo contra cada categoría de VEI revela que algunas variaciones en la pendiente de las curvas marcadas con líneas verticales, pueden ser interpretadas como cambios en la tasa de ocurrencia de erupciones. Si estas variaciones corresponden a diferente régimen de actividad eruptiva, y los volcanes Popocatépetl, Citlaltépetl y Colima se comportan como aleatorios no estacionarios entonces podemos considerar los eventos ocurridos en un periodo como una distribución de Poisson. Estas la línea de cada una de las graficas se ajusta al primer y último dato lo cual nos da la pendiente del comportamiento eruptivo.

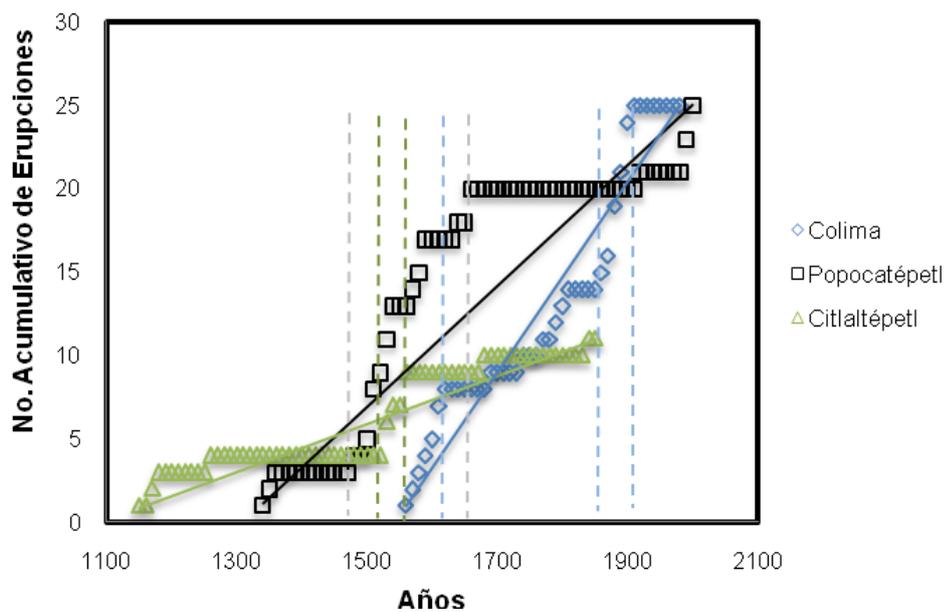


Figura 3.1 Número acumulativo de los volcanes Citlaltépetl, Popocatépetl y Colima para la categoría VEI \geq 2. La línea continua tiene una pendiente de 11/71 (negra), 25/67 (roja) y 25/43 (azul) respectivamente y corresponde a la tasa promedio de ocurrencia de las erupciones. Las líneas punteadas marcan el inicio y fin de las diferentes etapas en cada volcán.

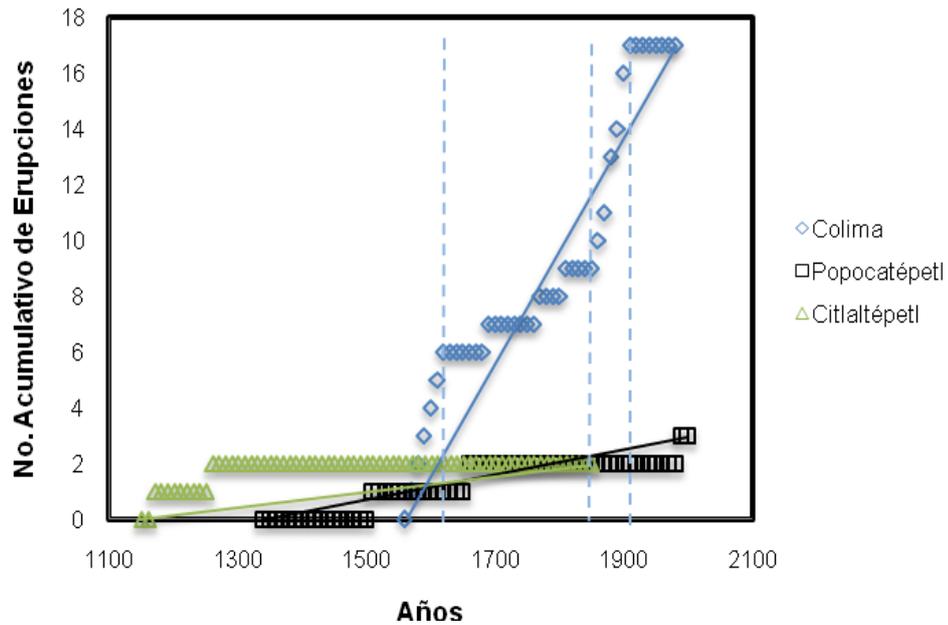


Figura 3.2 Número acumulado de los volcanes Citlaltépetl, Popocatépetl y Colima para la categoría VEI \geq 3. La línea continua tiene una pendiente de 2/71 (negra), 3/67 (roja) y 17/43 (azul) respectivamente y corresponde a la tasa promedio de ocurrencia de erupciones. Las líneas punteadas marcan el inicio y fin de las diferentes etapas.

La distribución de Poisson observada (de Tablas 3.4, 3.5 y 3.6) y calculada para VEI \geq 2 (Figura 3.1) muestra en el caso del volcán Popocatépetl dos cambios en la pendiente lo que sugiere 3 etapas eruptivas distintas durante todo el periodo que se tiene registrado; para el volcán Citlaltépetl se pueden observar también dos cambios de pendiente pero con una segunda etapa de corta duración y para el volcán de Colima tenemos tres cambios en la pendiente de la curva lo cual nos revela 4 periodos distintos con diferentes tasas de ocurrencia. Para un VEI \geq 3 (Figura 3.2) que en este caso es la erupción más explosiva que se ha registrado en estos volcanes, no muestra en ambos volcanes (Citlaltépetl y Popocatépetl), la variación en la pendiente tan marcada, como la que se observa en el caso del volcán de Colima donde se muestra claramente los cambios para las 4 etapas eruptivas durante todo el periodo datado.

El comportamiento cíclico de las graficas para los volcanes Colima y Popocatépetl junto con los datos petrológicos y la disponibilidad de la información histórica podría ser revisado en términos de ciclos eruptivos pero como los cambios en las tasas de ocurrencia son pocos, no se puede determinar el comportamiento que siguen las erupciones, aunque no se descarta la posibilidad de que este comportamiento pueda ser expresado con una función que en un momento dado represente la secuencia eruptiva que siguen estos volcanes.

Para el cálculo de las tasas de ocurrencia se toma en cuenta la información histórica disponible de cada volcán para obtener el número de eventos ocurridos de una determinada magnitud de VEI en cierto intervalo de tiempo. Así pues se obtiene para los tres volcanes su curva de tasa de ocurrencia eruptiva. (Figura 3.3)

Tabla 3.7 Tasa de Ocurrencia

Tasas de ocurrencia			
VEI	Popocatépetl	Citlaltépetl	Colima
2	0,0333	0,0127	0,0377
3	0,0045	0,0022	0,0314
4	0,0020	0,0002	0,0105
5	0,0007	0,0001	0,0021

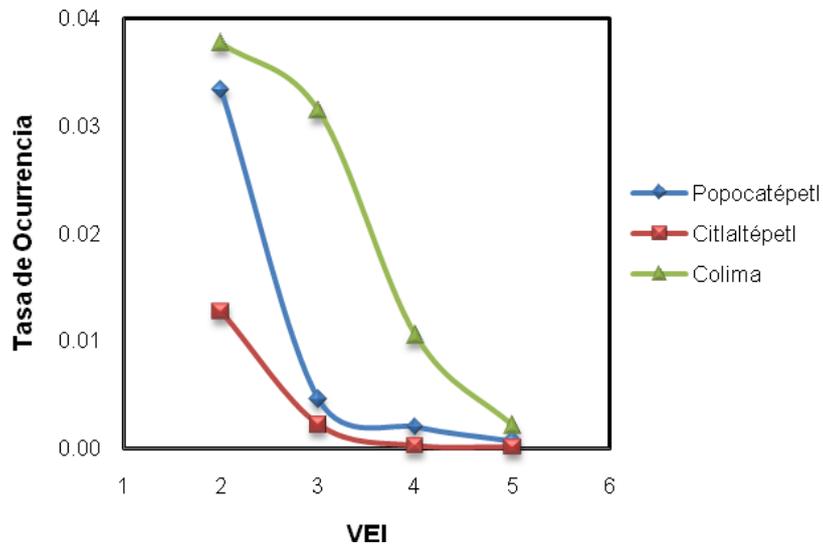


Figura 3.3 Tasa de erupciones estimadas para los volcanes Popocatépetl, Citlaltépetl y Colima en función a las magnitudes VEI.

Partiendo de estas tasas de ocurrencia podemos determinar mediante la distribución de Poisson la probabilidad de ocurrencia de los eventos, en la que tomamos en cuenta todo el tiempo que se tiene muestreado para cada volcán, separado en periodos de 10 años y considerando el numero de erupciones de cierto VEI ($\lambda = nVEI/nT$). Asi pues considerando VEI de 2,3 y ≥ 2 tenemos las siguientes graficas:

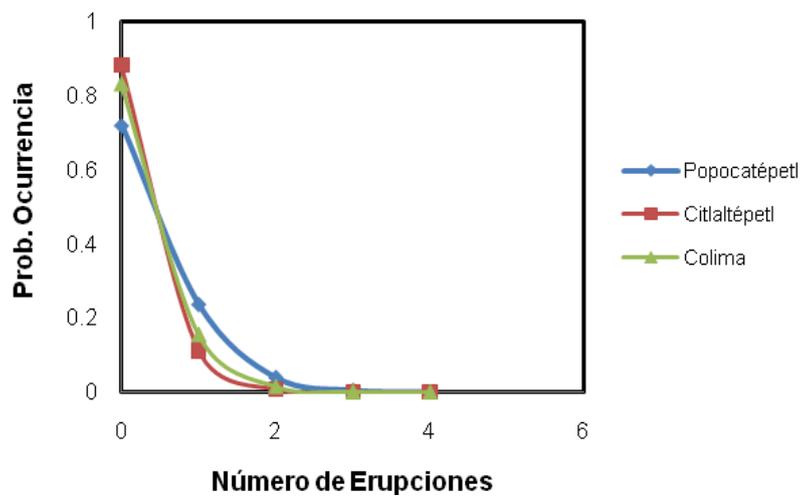


Figura 3.4 Probabilidad de Poisson con VEI=2 calculada para los volcanes Popocatépetl, Citlaltépetl y Colima ($\lambda=22/67$, $9/71$ y $8/43$ respectivamente) durante todo el periodo muestreado.

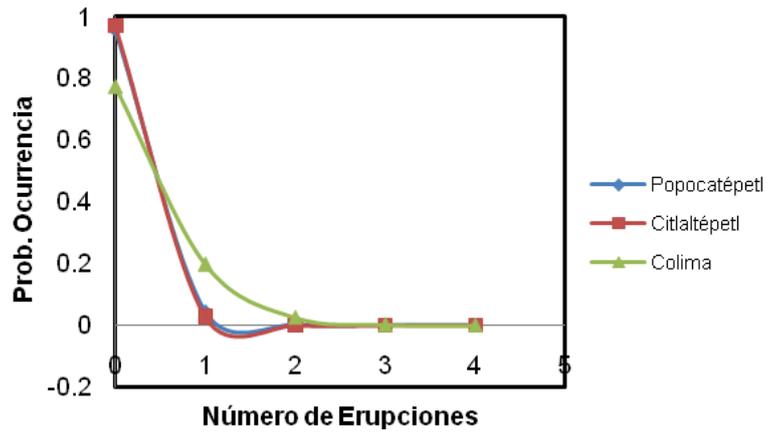


Figura 3.5 Probabilidad de Poisson con VEI=3 calculada para los volcanes Popocatepetl, Citlaltépetl y Colima ($\lambda=3/67$, $2/71$ y $11/43$ respectivamente) durante todo el periodo muestreado.

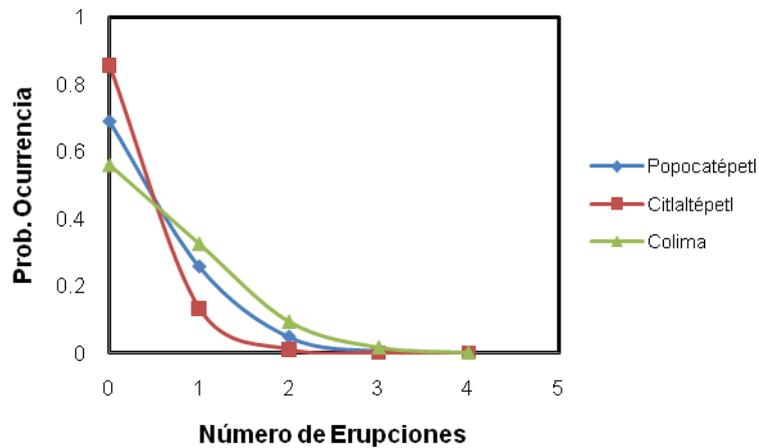


Figura 3.6 Relación de probabilidad de Poisson con VEI ≥ 2 calculada para los volcanes Popocatepetl, Citlaltépetl y Colima ($\lambda=25/67$, $11/71$ y $25/43$ respectivamente) durante todo el periodo muestreado.

En las graficas anteriores podemos observar como las erupciones de VEI menores a 3 son las que tienen más probabilidad de ocurrencia basándonos en que se tuviera un comportamiento como función de la distribución de Poisson.

También se pueden considerar otros parámetros para visualizar el comportamiento de los eventos eruptivos, analizando la variación de la altura eruptiva (H_c), el volumen de la lava, el volumen de tefra y coeficiente de fricción (H/L) con respecto al valor de VEI que se presente. Las siguientes graficas (Figura 3.4 a la 3.7) muestran este comportamiento:

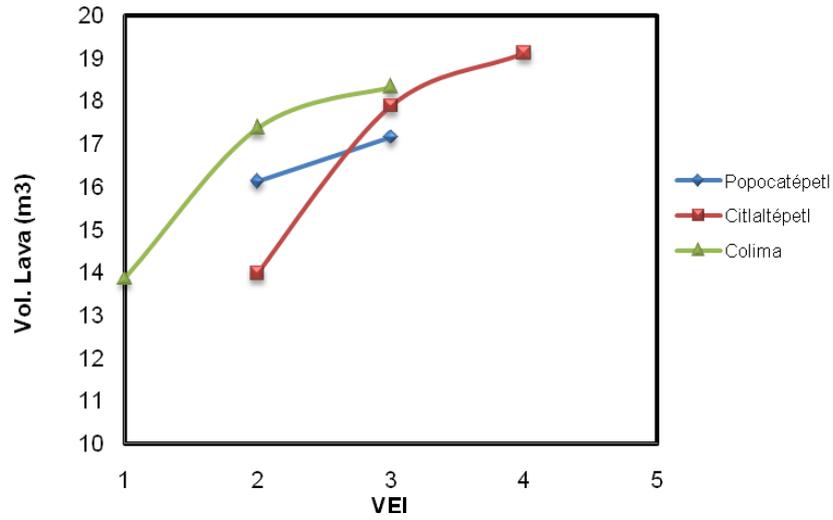


Figura 3.4 Relación entre el volumen de lava y el Índice de Explosividad Volcánica (VEI) estimadas para los volcanes Popocatepetl, Citlaltépetl y Colima.

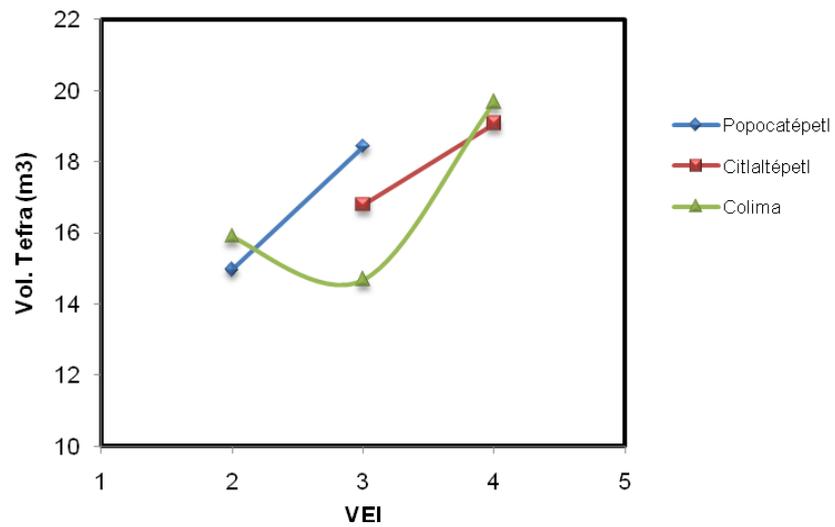


Figura 3.5 Relación entre el volumen de tefra y el Índice de Explosividad Volcánica (VEI) estimadas para los volcanes Popocatepetl, Citlaltépetl y Colima.

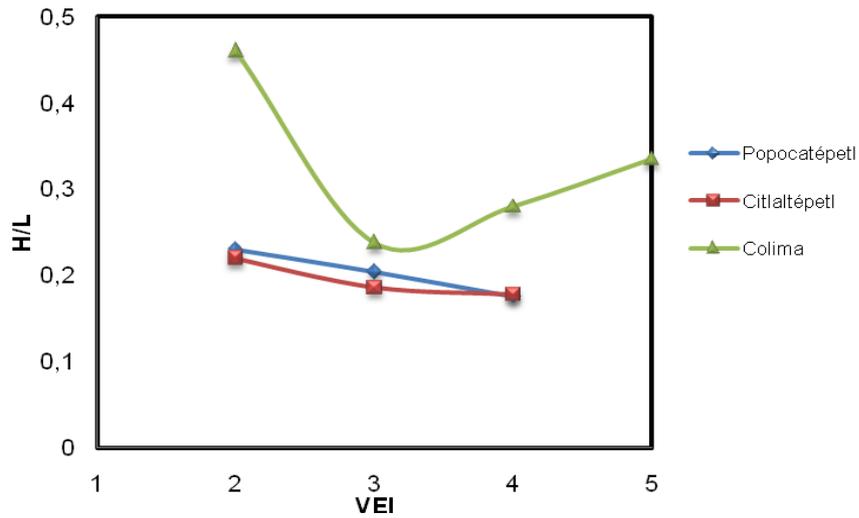


Figura 3.6 Relación entre el coeficiente de fricción (H/L) y el Índice de Explosividad Volcánica (VEI) estimadas para los volcanes Popocatepetl, Citlaltépetl y Colima.

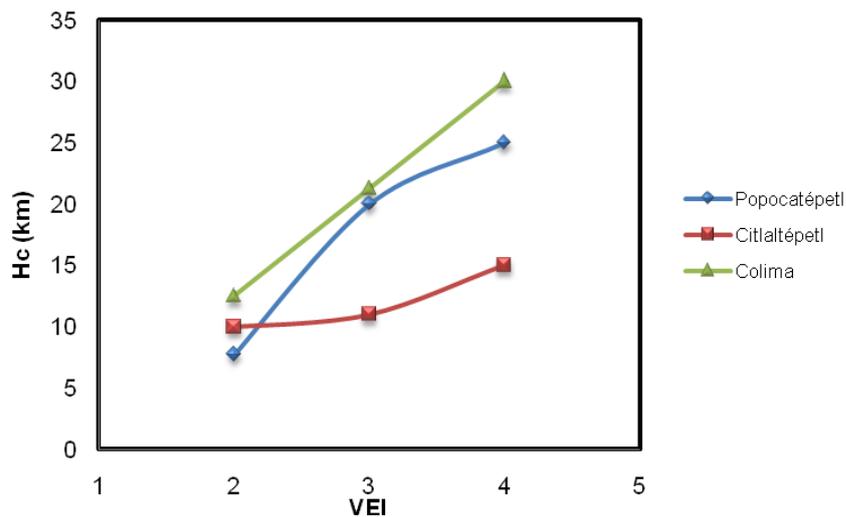


Figura 3.7 Relación entre la altura de la columna eruptiva (H_c) y el Índice de Explosividad Volcánica (VEI) estimadas para los volcanes Popocatepetl, Citlaltépetl y Colima.

De estas graficas podemos observar que mientras más grande es el Índice de Explosividad Eruptiva se registra un mayor volumen de lava y tefra, una columna eruptiva más grande y un mayor alcance horizontal, por consiguiente para un VEI menor todos estos parámetros son inversos es decir, se presenta un menor volumen de lava y tefra, una columna eruptiva y un alcance horizontal menor.

Capítulo 4

Modelación del Peligro

Introducción

De acuerdo a lo que se ha visto en los capítulos anteriores, los investigadores de los volcanes de Colima, Popocatepetl y Citlaltépetl han tratado de hacer una estimación aproximada de los periodos de tiempo en los cuales se pueda presentar una erupción volcánica de determinado tipo de VEI, esto tomando en cuenta los registros históricos que se tienen de cada uno de estos volcanes.

Los periodos de retorno están relacionados con la probabilidad o tasa de ocurrencia como:

$$\lambda(\text{VEI}) = \text{Tasa Ocurrencia} = 1/T_R$$

Donde T_R es el periodo de retorno.

Entonces el periodo de retorno de un volcán nos dice cual es la probabilidad de que en un periodo de tiempo X suceda un evento de magnitud Y, además podemos deducir que mientras más tiempo tarde un volcán en tener un evento eruptivo, mayor será el Índice de Explosividad Volcánica (VEI).

Aunque se sabe que los eventos volcánicos no se presentan de manera periódica, se tomará en cuenta la Tabla 4 del Capítulo 3, para determinar los escenarios que pudieran presentarse a un tiempo determinado con el objetivo de visualizar a grandes rasgos las zonas que se encontrarían expuestas a los flujos de lava, flujos piroclásticos y caída de ceniza. Así pues para el caso de cada uno de los volcanes tenemos:

- 1) Para el caso del volcán Popocatepetl el periodo de retorno esperado de acuerdo al valor de VEI es:

VEI	No. Eventos	Periodo(años)	Prob. Ocurrencia
2	1	660	0.0333
3	1	660	0.0045
4	1	1000	0.0020

- 2) Para el caso del volcán Citlaltépetl el periodo de retorno esperado de acuerdo al valor de VEI es:

VEI	No. Eventos	Periodo(años)	Prob. Ocurrencia
2	1	710	0.0127
3	1	6000	0.0022
4	1	8620	0.0002

- 3) Para el caso del volcán Colima el periodo de retorno esperado de acuerdo al valor de VEI es:

VEI	No. Eventos	Periodo(años)	Prob. Ocurrencia
2	1	450	0.0377
3	1	478	0.0314
4	1	478	0.0105

Por tanto a continuación se muestran los escenarios obtenidos de flujo de lava, flujos piroclásticos y caída de ceniza para cada uno de los valores de VEI.

Cabe señalar que las tasas de ocurrencia pueden variar dependiendo del intervalo de tiempo que se utilice en el análisis con lo cual el periodo de retorno también será diferente.

4.1 Caída de Ceniza

4.1.1 Volcán Popocatépetl

Para la elaboración de los escenarios al igual que en el Capítulo 2 se necesitaron una serie de parámetros. Para el caso de la caída de ceniza tenemos lo siguiente:

1. Valor del VEI (2,3,4)
2. Altura de la columna eruptiva estimada(km)
3. Desviación Estándar de los valores obtenidos para la altura de la columna(km)
4. Volumen de tefra (m^3)
5. Velocidad de caída del material (1 m/seg)
6. Dirección del viento a 135°

La altura de la columna eruptiva y el volumen de tefra varían dependiendo de la intensidad de la erupción. En las figuras 4.1 a 4.3 se muestran los escenarios obtenidos para el depósito de la ceniza volcánica con las características mencionadas.

Cabe mencionar que los datos empleados para cada valor de VEI, son el promedio de los valores registrados en la historia eruptiva del volcán, por lo cual si no se tiene más de un dato registrado se considera una desviación estándar de cero, de igual manera para el caso del volumen de tefra si no se tiene registro alguno se considera valor cero.

- Primer posible escenario de caída de ceniza, VEI=2 y periodo de retorno de 660 años:

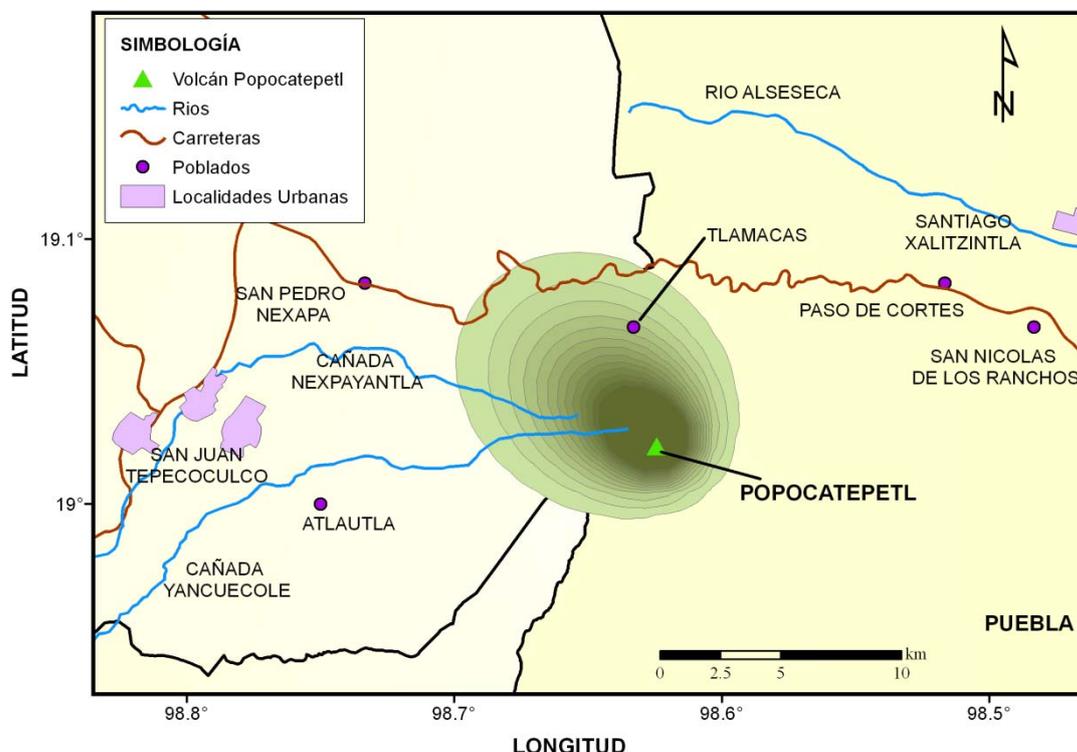


Figura 4.1 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Popocatépetl. Características del evento: altura de columna de 7.8 km, desviación estándar 0.35 km, volumen de tefra $14.97 m^3$.

- Segundo posible escenario de caída de ceniza, VEI=3 y periodo de retorno de 660 años:



Figura 4.2 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Popocatepetl. Características del evento: altura de columna de 20 km, desviación estándar 0, volumen de tefra $18.42m^3$.

- Tercer posible escenario de caída de ceniza, VEI=4 y periodo de retorno de 1000 años:

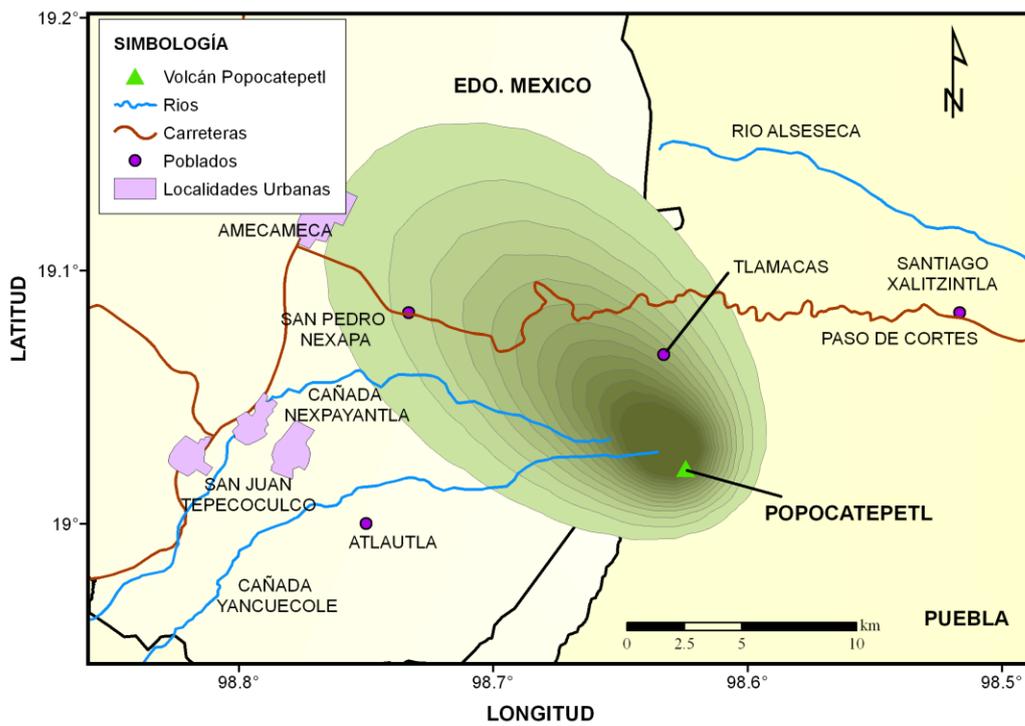


Figura 4.3 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Popocatepetl. Características del evento: altura de columna de 25 km, desviación estándar 0.

4.1.2 Volcán Citlaltépetl

Para el caso de Citlaltépetl se consideraron los mismos parámetros que para el Popocatepetl, por tanto los escenarios para este volcán quedaron de la siguiente manera:

- Primer posible escenario de caída de ceniza, VEI=2 y periodo de retorno de 710 años:



Figura 4.4 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Citlaltépetl. Características del evento: altura de columna de 10 km, desviación estándar 0.

- Segundo posible escenario de caída de ceniza, VEI=3 y periodo de retorno de 6000 años:

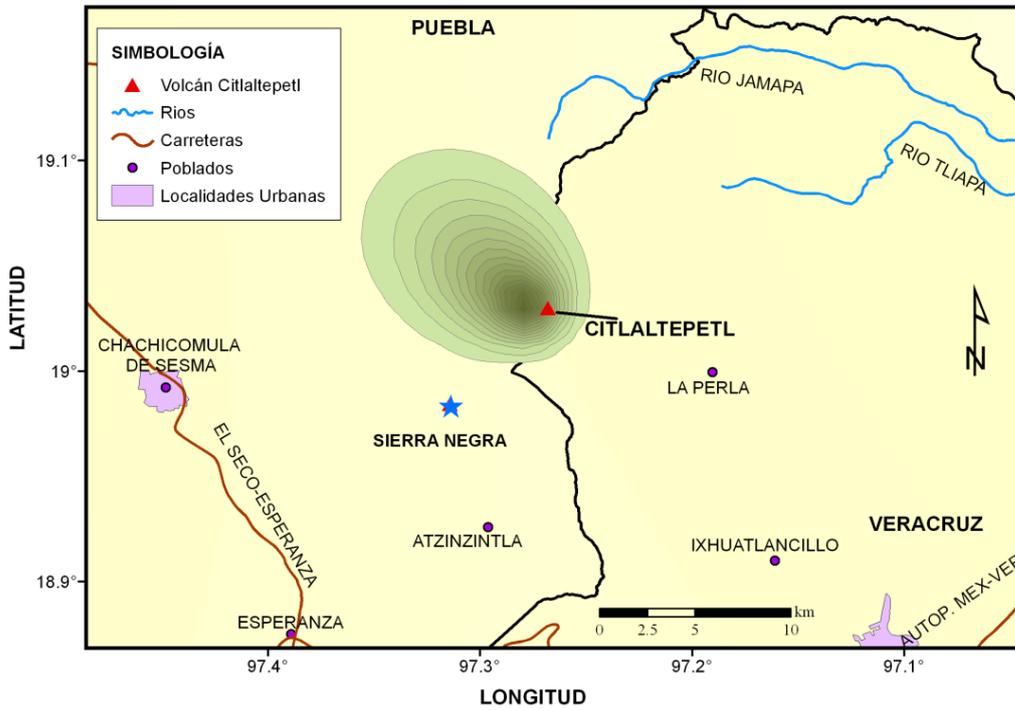


Figura 4.5 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Citlaltépetl. Características del evento: altura de columna de 11 km, desviación estándar 1.41 km, volumen de tefra 16.48m^3 .

- Tercer posible escenario de caída de ceniza, VEI=4 y periodo de retorno de 8620 años:

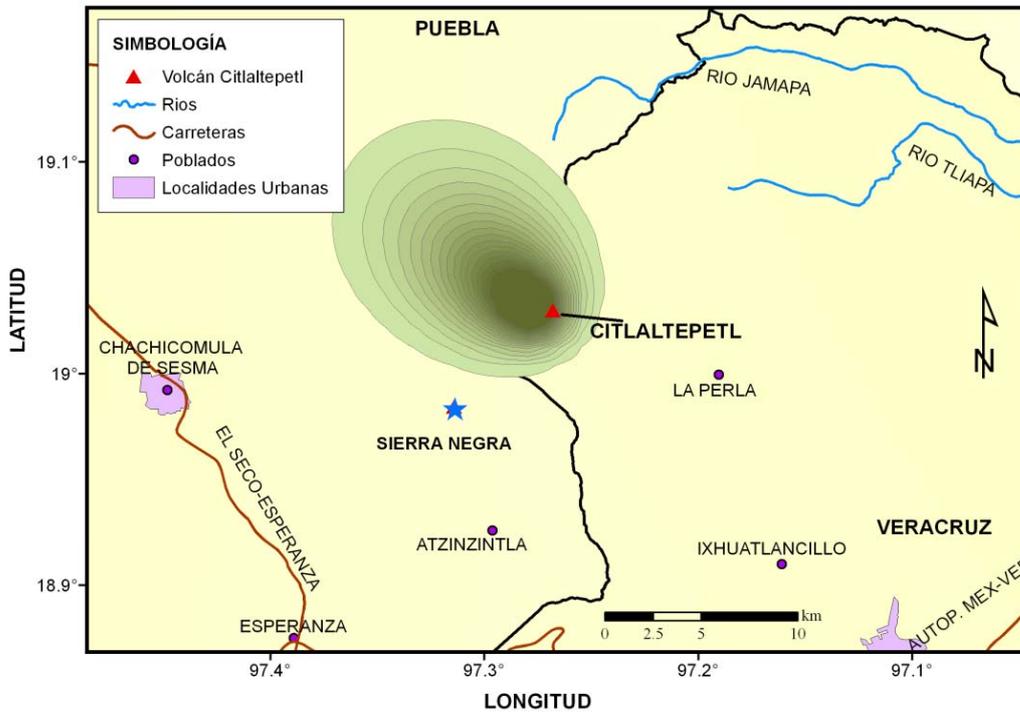


Figura 4.6 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Citlaltépetl. Características del evento: altura de columna de 15 km, desviación estándar 7.07 km, volumen de tefra 19.07m^3 .

4.1.3 Volcán Colima

Como ya se ha mencionado en los capítulos anteriores el volcán Colima es uno de los volcanes con mejor registro histórico por lo cual debería tenerse un pronóstico de los eventos más acertado, sin perder de vista que los eventos pueden variar ya que ocurren con características aleatorias pero se espera que los escenarios sean semejante a los eventos que ya ocurrieron.

- Primer posible escenario de caída de ceniza, VEI=2 y periodo de retorno de 450 años:

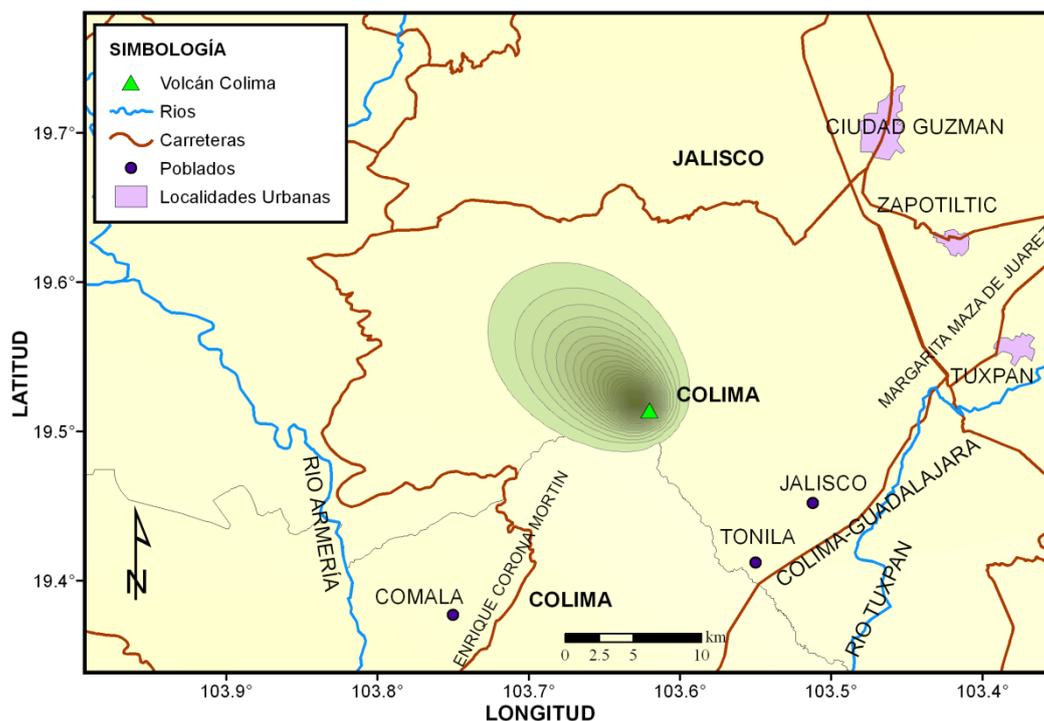


Figura 4.7 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Colima. Características del evento: altura de columna de 12.5 km, desviación estándar 3.54 km, volumen de tefra 16.48m³.

- Segundo posible escenario de caída de ceniza, VEI=3 y periodo de retorno de 478 años:

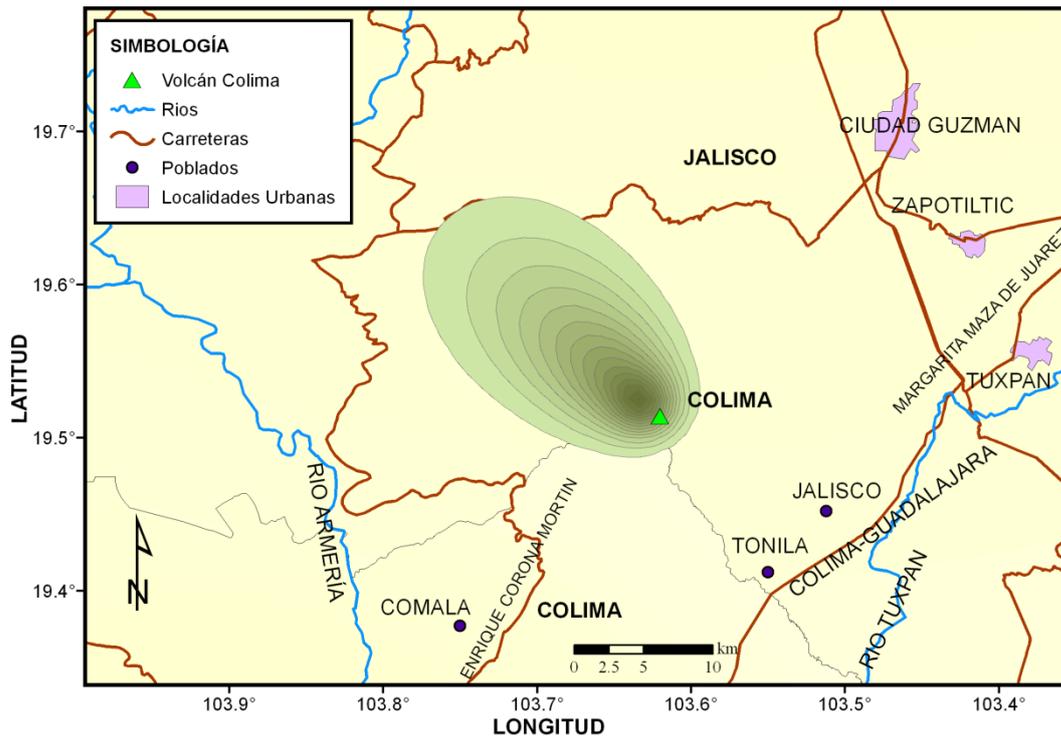


Figura 4.8 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Colima. Características del evento: altura de columna de 21.25 km, desviación estándar 2.50 km, volumen de tefra 14.69m³.

- Tercer posible escenario de caída de ceniza, VEI=4 y periodo de retorno de 478 años:

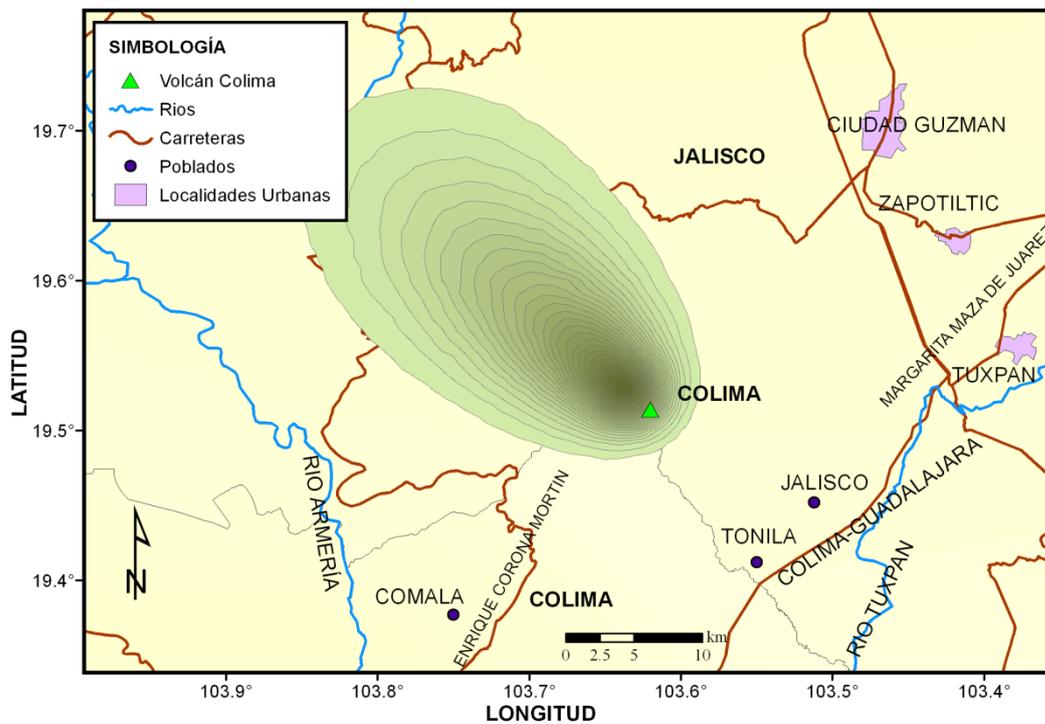


Figura 4.9 Escenarios de caída de ceniza volcánica en el volcán Colima. Características del evento: altura de columna de 30 km, desviación estándar 0, volumen de tefra 19.67m³.

4.2 Flujos Piroclásticos

4.2.1 Volcán Popocatepetl

Los escenarios de flujos piroclásticos en el Popocatepetl consideraran los siguientes parámetros:

1. El ángulo del cono de energía ($H/L=0.20$)

Este ángulo fue considerado como el promedio de todos los valores registrados sin tomar en cuenta el alcance horizontal, que de ser el caso también se tomaría el valor promedio.

2. Altura de la columna eruptiva (km)

Para este parámetro se varían los valores para cada VEI como en el caso de la caída de ceniza.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores obtenemos los posibles escenarios para los flujos piroclásticos en los cuales solo se observa el área que se verá afectada, las zonas corresponden con los valores de VEI.

La siguiente Figura muestra el escenario de flujo piroclástico en el volcán Popocatepetl. Las zonas delimitadas corresponden con los valores de VEI= 2,3 y 4, con sus periodos de retorno de 660, 660 y 1000 años respectivamente.



Figura 4.10 Escenario de flujos piroclásticos en el volcán Popocatepetl. Características del evento: VEI=2, altura de la columna 7.8, 20, 25 km, desviación estándar 0.35 km y periodo de retorno de 660 y 1000 años.

4.2.2 Volcán Citlaltépetl

Para el volcán Citlaltépetl se consideraron los siguientes parámetros:

1. El ángulo del cono de energía ($H/L=0.19$)
2. Altura de la columna eruptiva

Las siguientes Figuras (4.13 a 4.15) muestran escenarios de flujos piroclásticos en el volcán Citlaltépetl. Las zonas delimitadas corresponden con los valores de $VEI= 2,3$ y 4 , con sus periodos de retorno de 710, 6000 y 8620 años respectivamente.

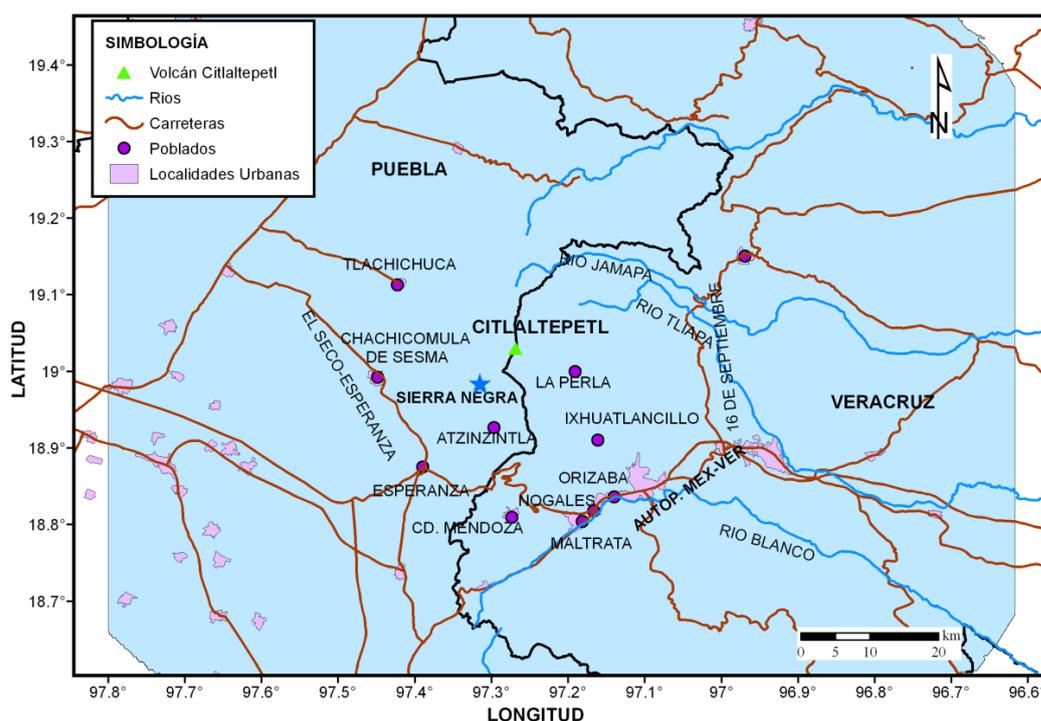


Figura 4.11 Escenarios de flujos piroclásticos en el volcán Citlaltépetl. Características del evento: $VEI=2$, altura de la columna 10 km, desviación estándar 0 y periodo de retorno de 710 años.

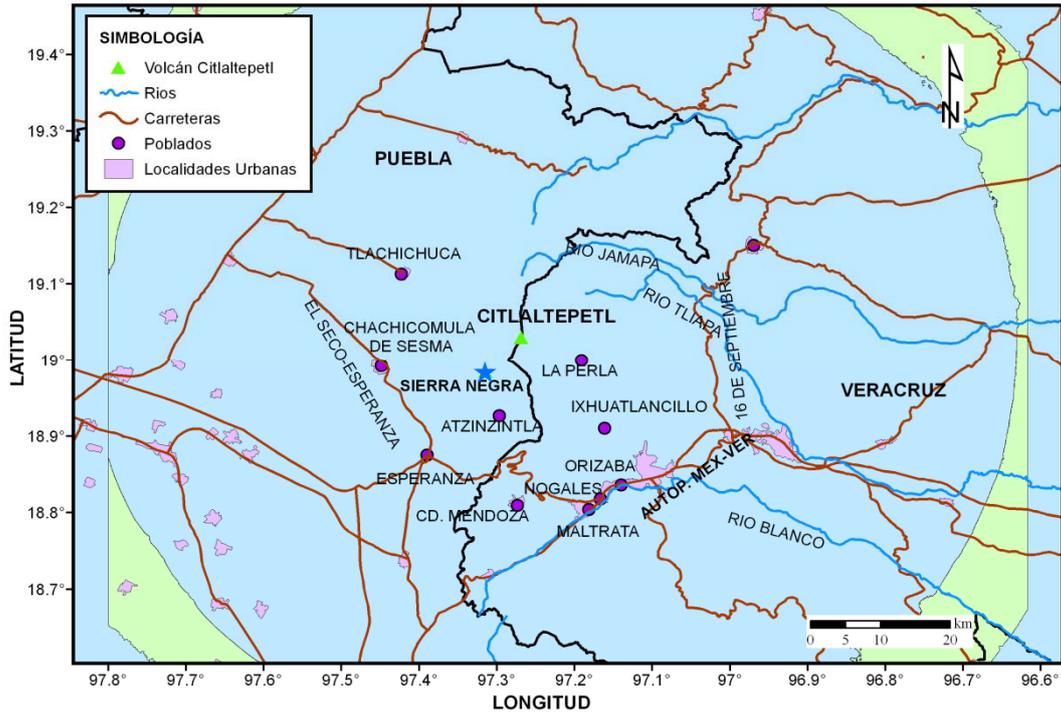


Figura 4.12 Escenarios de flujos piroclásticos en el volcán Citlaltépetl. Características del evento: VEI=3, altura de la columna 11 km, desviación estándar 1.41 km y periodo de retorno de 6000 años.

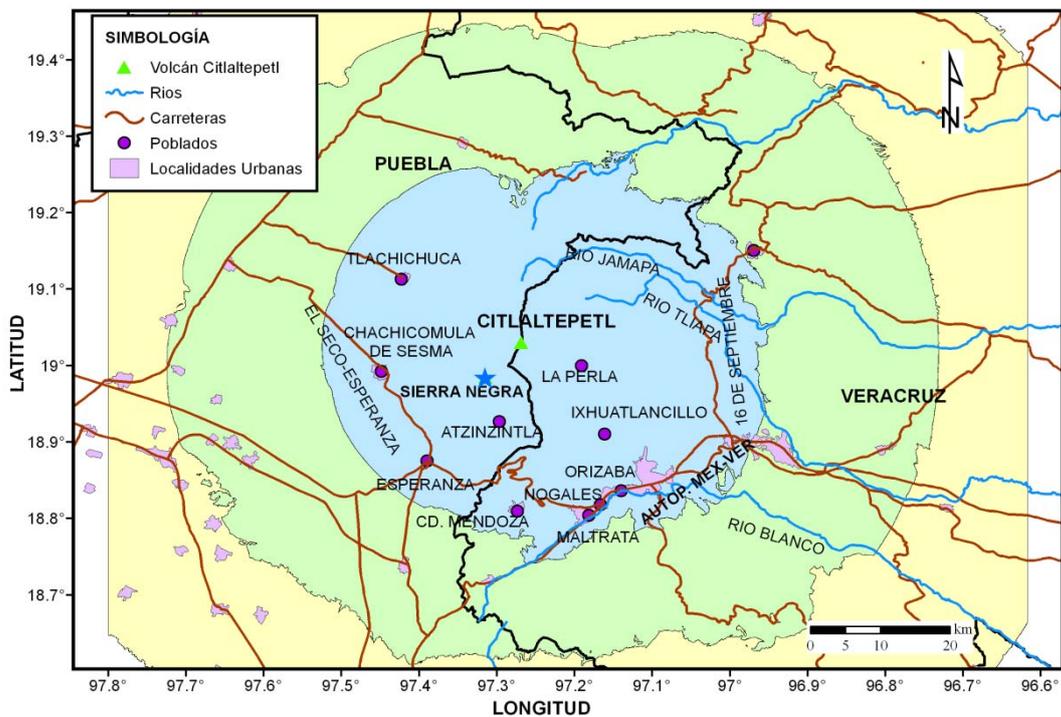


Figura 4.13 Escenarios de flujos piroclásticos en el volcán Citlaltépetl. Características del evento: VEI=4, altura de la columna 15 km, desviación estándar 7.07 km y periodo de retorno de 8620 años.

4.2.3 Volcán Colima

Para los flujos piroclásticos en el volcán Colima se consideraron los siguientes parámetros:

1. El ángulo del cono de energía ($H/L=0.34$)
2. Altura de la columna eruptiva

Las siguientes Figuras muestran escenarios de flujos piroclásticos en el volcán Colima. Las zonas delimitadas corresponden con los valores de VEI= 2,3 y 4, con sus periodos de retorno de 450, 478 y 478 años respectivamente.

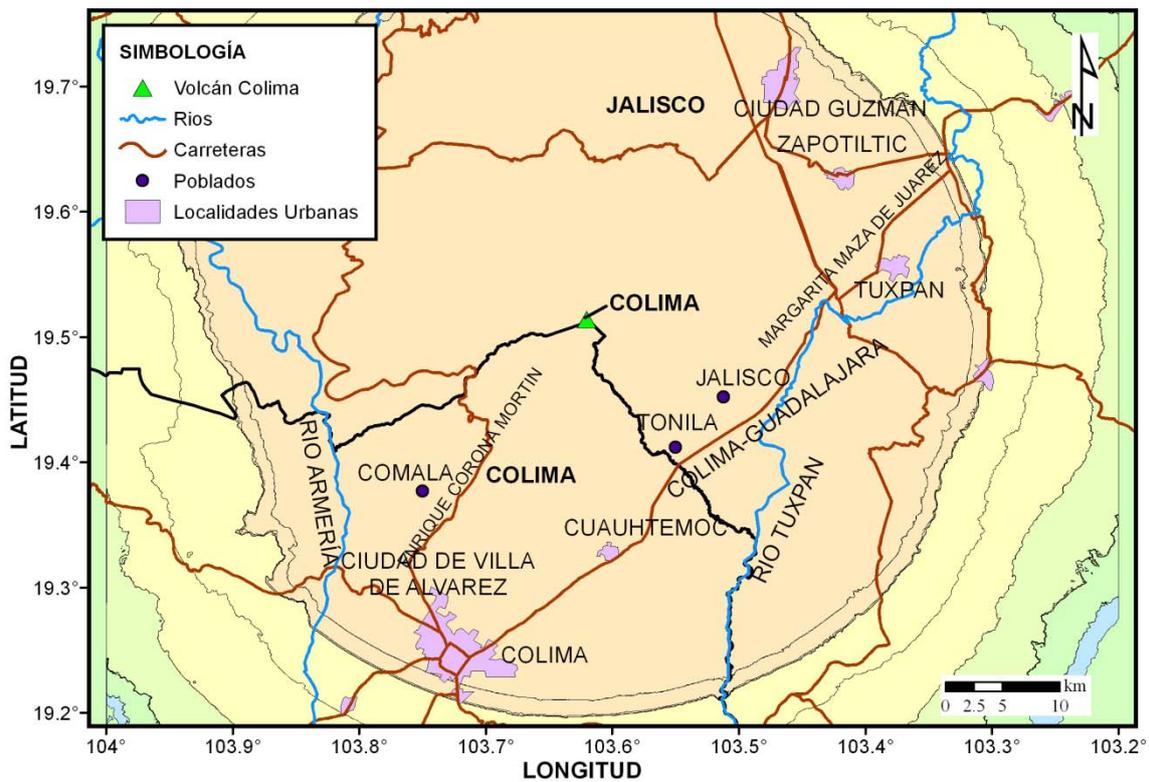


Figura 4.14 Escenarios de flujos piroclásticos en el volcán Colima. Características del evento: VEI=2, altura de la columna 12.5 km, desviación estándar 3.54 km y periodo de retorno de 450 años.

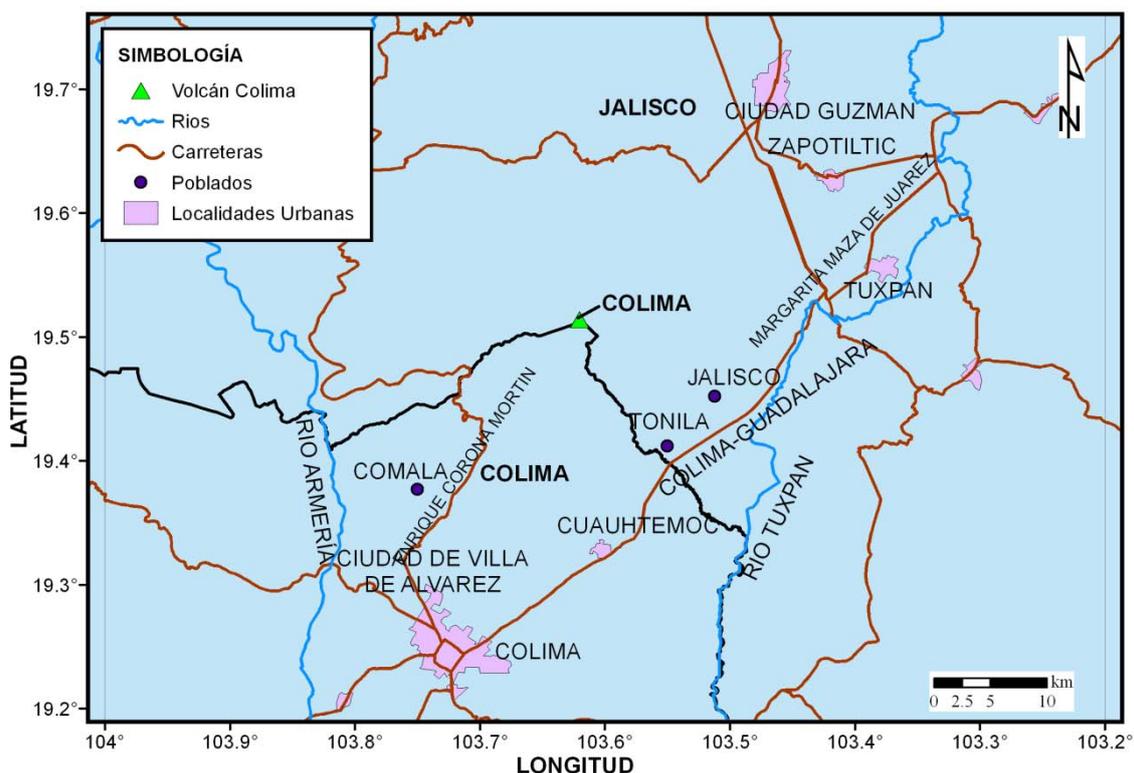


Figura 4.15 Escenarios de flujos piroclásticos en el volcán Colima. Características del evento: VEl=3, altura de la columna 21.25 km, desviación estándar 2.50 km y periodo de retorno de 478 años.

En la Figura 4.14 podemos observar las zonas de peligro que serían alcanzadas en una erupción de VEl=2 y se pueden apreciar claramente las zonas que serán más afectadas a comparación de la Figura 4.15 donde prácticamente toda la zona se verá afectada de la misma manera si la erupción fuese de mayor magnitud.

4.3 Flujos de Lava

4.3.1 Volcán Popocatepetl

En cuanto a los flujos de lava se consideró lo siguiente:

1. Valor de VEl (2, 3).
2. Valor esperado de volumen de lava
Ln [vol. Lava (m³)]
3. Desviación estándar de los valores del volumen de lava (m³).

Como se explicó en el capítulo 2 los escenarios para los flujos de lava dependen de la topografía del lugar, así que los escenarios se obtuvieron suponiendo que la topografía en varios cientos de años será la misma que ahora. Además los puntos de atribución que se toman en estos escenarios también son considerados como si la forma del cráter de los volcanes permaneciera igual a través de los años.

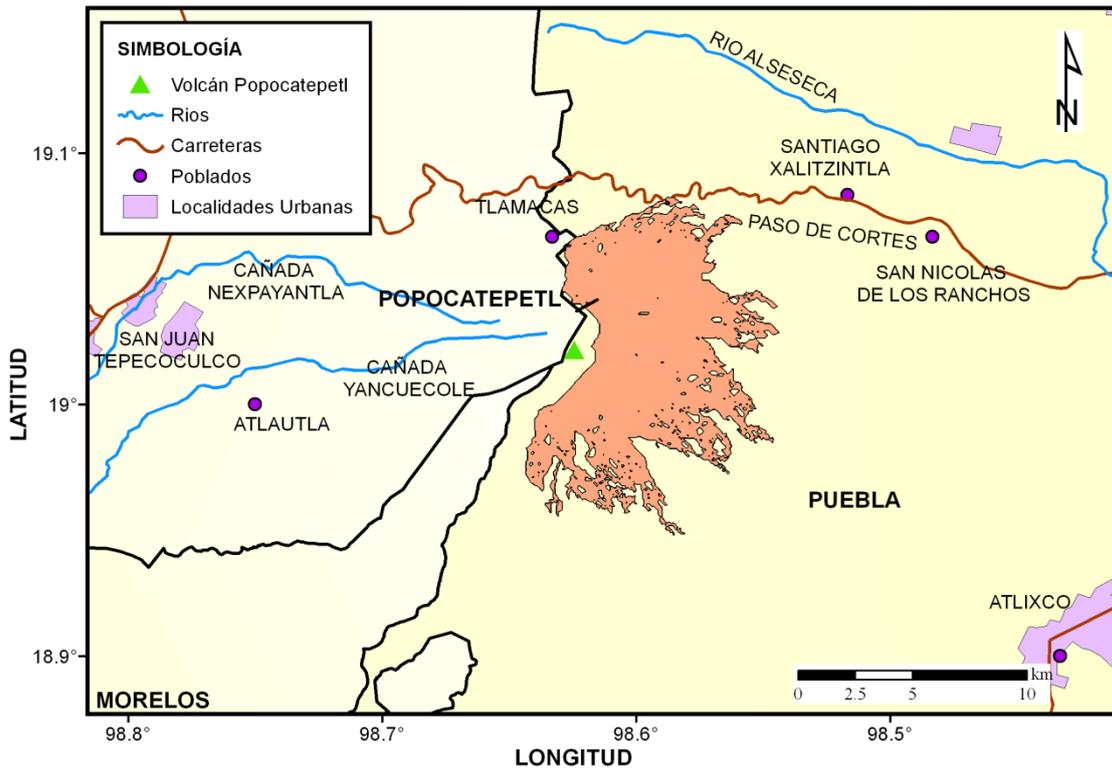


Figura 4.16 Escenario de lava para VEI=2, periodo de retorno a 660 años y volumen de lava de 16.12 m^3 y una desviación estándar 0.

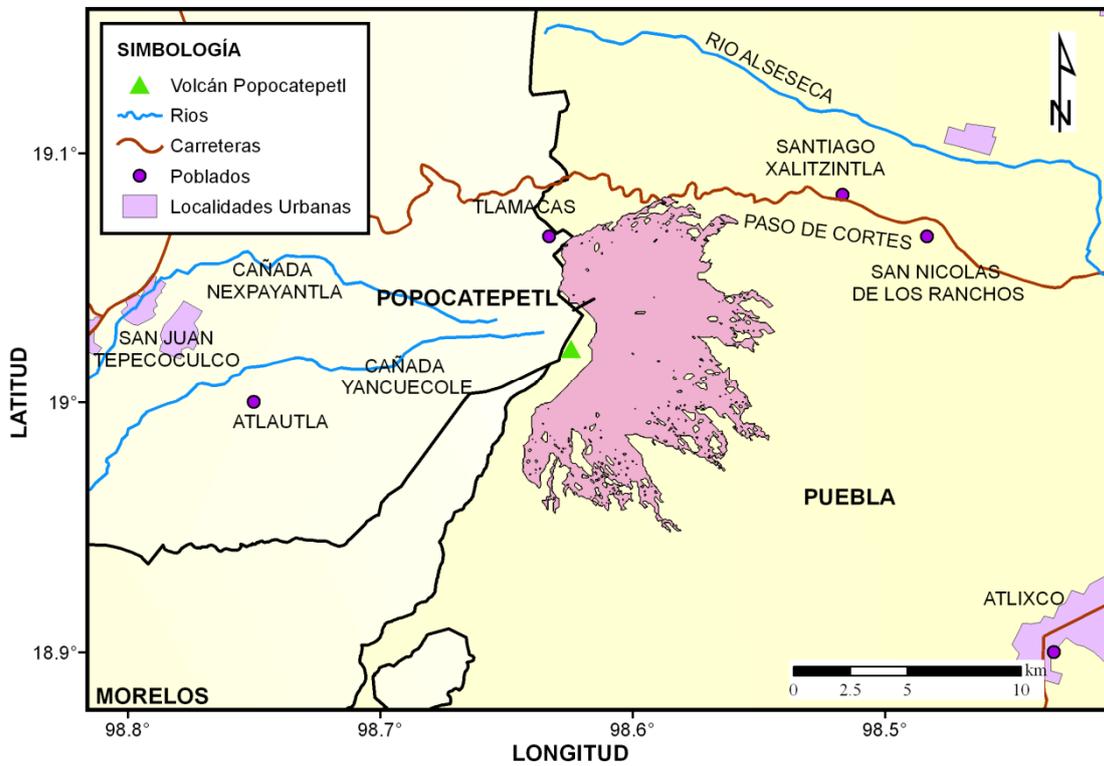


Figura 4.17 Escenario de lava para VEI=3, periodo de retorno a 660 años y volumen de lava de 17.15 m^3 y una desviación estándar 0.

4.3.2 Volcán Citlaltépetl

Para el flujo de lava en el Citlaltépetl se tomó en cuenta los siguientes valores de los parámetros:

1. Valor de VEI (2, 3, 4).
2. Valor esperado de volumen de lava
Ln [vol. Lava (m^3)]
3. Desviación estándar de los valores del volumen de lava (m^3).

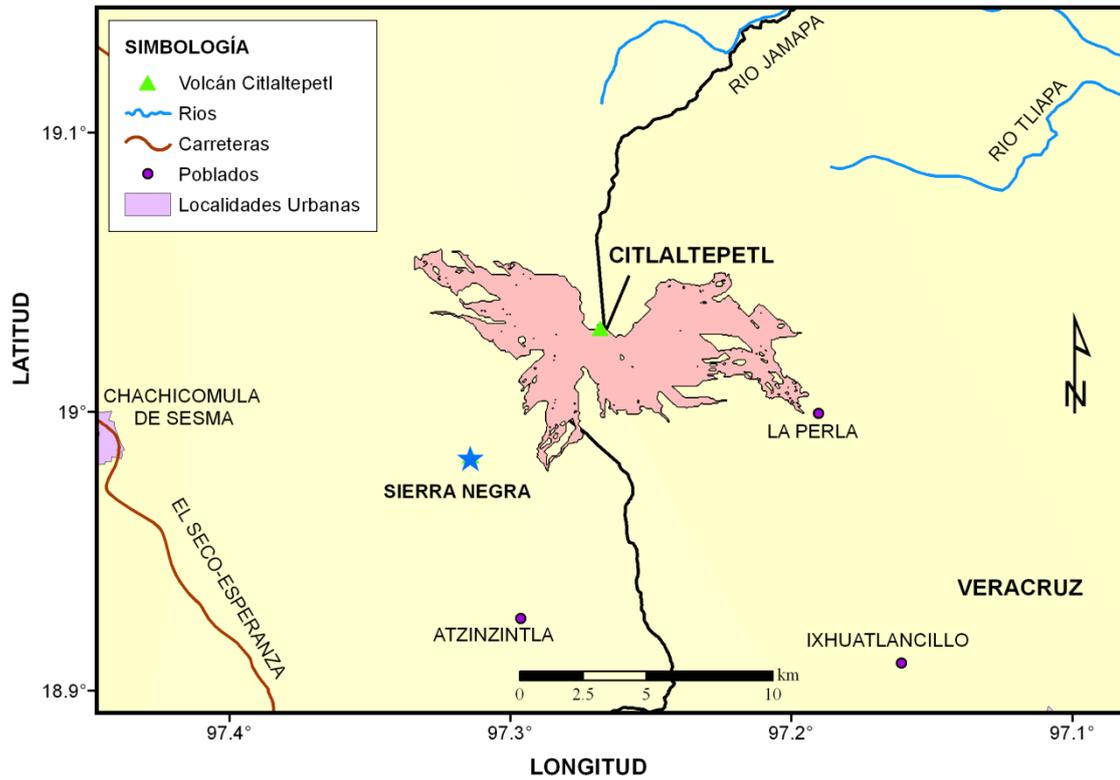


Figura 4.18 Escenario de lava para VEI=2, periodo de retorno a 710 años y volumen de lava de $13.97 m^3$ y una desviación estándar $0.83 m^3$.

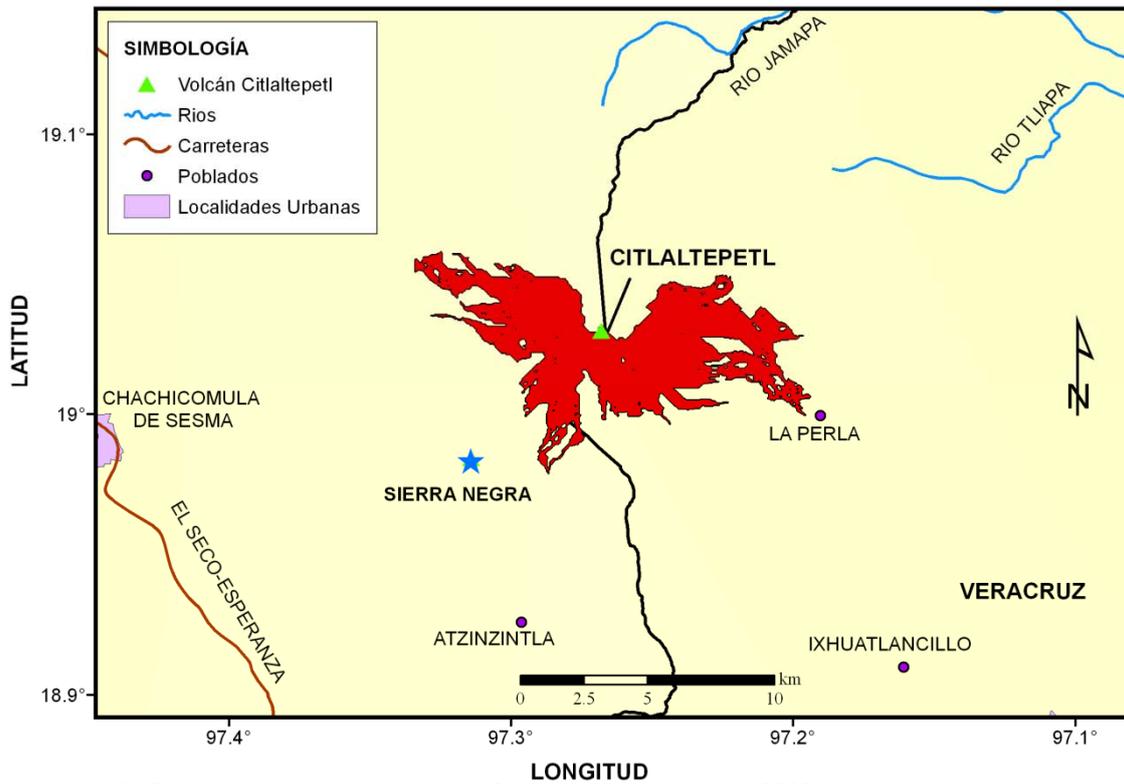


Figura 4.19 Escenario de lava para VEI=3, periodo de retorno a 6000 años y volumen de lava de 17.88 m^3 y una desviación estándar 0.61 m^3 .

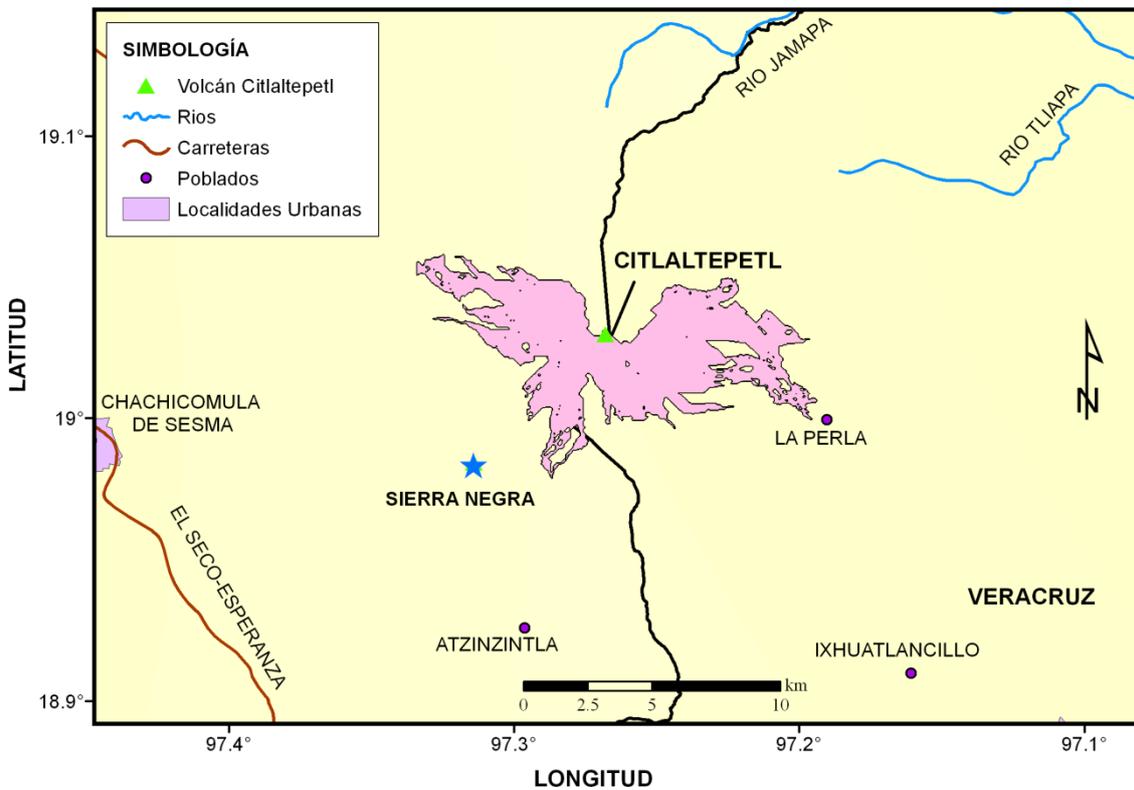


Figura 4.20 Escenario de lava para VEI=4, periodo de retorno a 8620 años y volumen de lava de 19.12 m^3 y una desviación estándar 0.31 m^3 .

4.3.3 Volcán Colima

Para el flujo de lava en el volcán Colima se consideraron los siguientes parámetros:

1. Valor de VEI (1, 2, 3).
2. Valor esperado de volumen de lava
Ln [vol. Lava (m^3)]
3. Desviación estándar de los valores del volumen de lava (m^3).

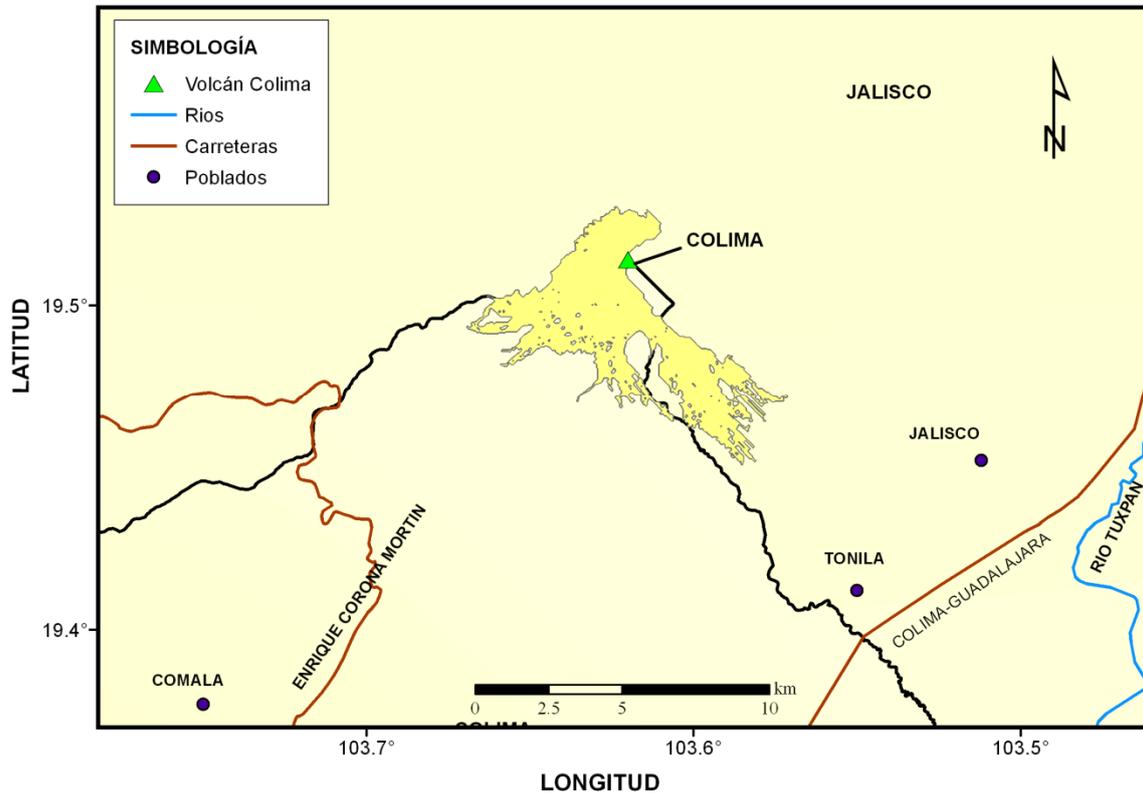


Figura 4.21 Escenario de lava para VEI=1, periodo de retorno a 450 años y volumen de lava de $13.85 m^3$ y una desviación estándar $2.48 m^3$.

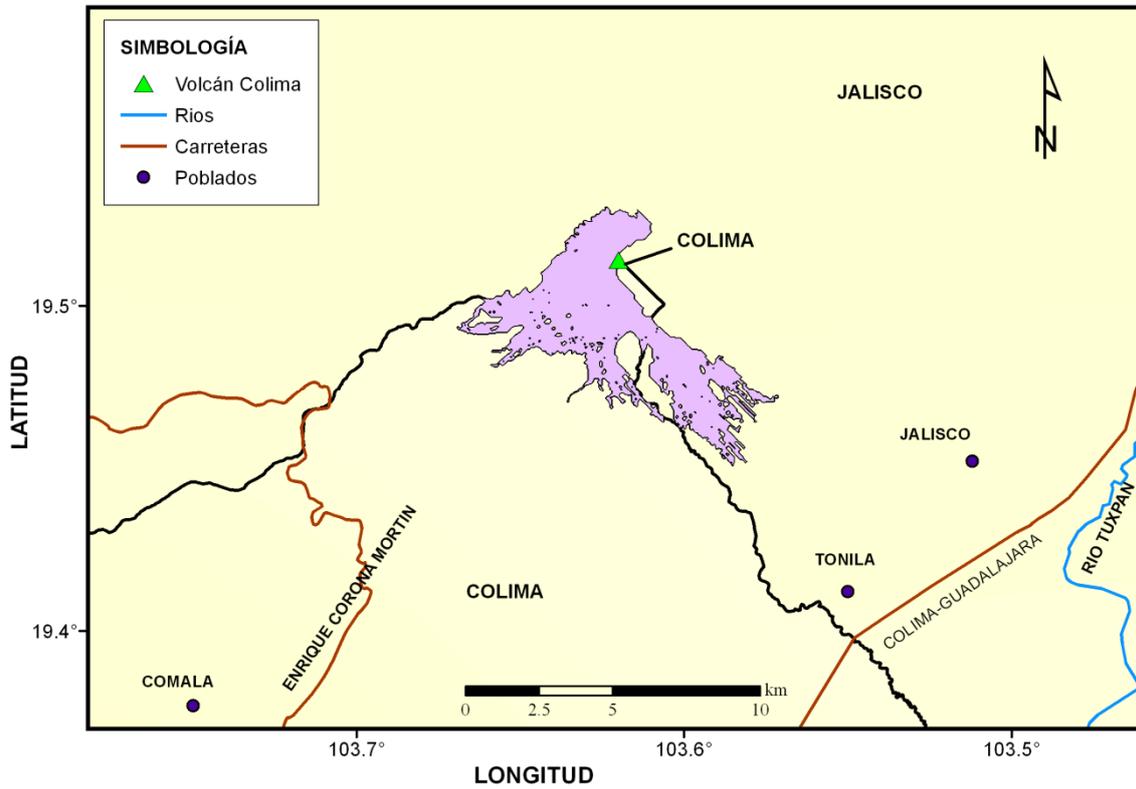


Figura 4.22 Escenario de lava para VEI=2, periodo de retorno a 478 años y volumen de lava de 17.36 m^3 y una desviación estándar $0.1.63 \text{ m}^3$.

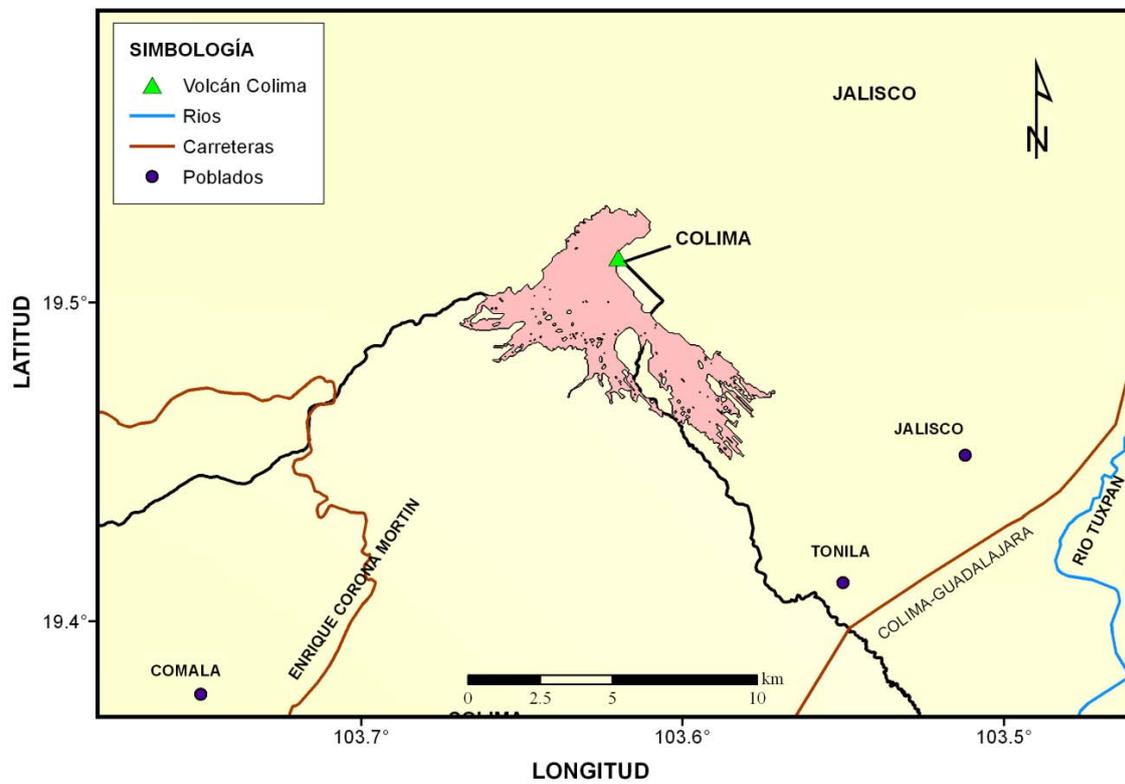


Figura 4.23 Escenario de lava para VEI=3, periodo de retorno a 478 años y volumen de lava de 18.32 m^3 y una desviación estándar 1.19 m^3 .

Capítulo 5

Discusión y Conclusiones

Durante el desarrollo de esta tesis se concluyeron varios puntos importantes:

- La comparación de los escenarios es muy demostrativa en cuanto a la dispersión de los peligros volcánicos para los diferentes índices de explosividad.
- El análisis de probabilidades puede variar dependiendo el intervalo de tiempo que se considere adecuado pues por ejemplo si se observa la tabla 3.1 la actividad del volcán Popocatepetl ha aumentado en los últimos años y con lo cual ciclos de tiempo más cortos nos daría probabilidades de ocurrencia más altas.
- Los escenarios obtenidos para los distintos periodos de retorno nos dieron una visualización a grandes rasgos de las zonas que serán afectadas por los peligros volcánicos de caída de ceniza, flujos piroclásticos y flujos de lava, cabe señalar que estos escenarios pueden variar al cambiar el valor de alguno de los parámetros.
- Por último con los escenarios obtenidos se generó un mapa en el cual se encuentran contenidos los escenarios de caída de ceniza para un índice de explosividad 3 para el caso de los 3 volcanes (Figura 5.1).

Se vió en esta tesis que se pueden determinar los escenarios de caída de ceniza , flujos piroclásticos y flujos de lava de la misma manera para cada uno de los tres volcanes estudiados, así pues cabe mencionar que si se pudiera hacer la recopilación de los parámetros esenciales para el programa ERN-Volcán (ángulo del cono de energía, la topografía y la dirección del viento) se podrían tener los escenarios de las zonas de afectación para todos los volcanes de México y en caso de ser necesario se pueden estos escenarios reajustar al cambio de las condiciones del lugar.

REFERENCIAS

- Armienti P., G. Macedonio, (1988), A Numerical Model for Simulation of Tephra Transport and Deposition: Applications to May 18, 1980, Mount St. Helens Eruption, *Journal Geophysical Research*, pp. 6463-6476.
- Bretón González, Mauricio, Juan J. Ramírez, Carlos Navarro, (2002), Summary of the Historical Eruptive Activity of Volcan De Colima, Mexico 1519-2000, *Journal Volcanology and Geothermal Research*, pp. 21-46.
- Capra L., J.L. Macias, K.M. Scott, M. Abrams, V.H. Garduño-Monroy, (2002), Debris Avalanches And Debris Flows Transformed From Collapses In The Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico-Behavior, And Implications For Hazard Assessment, *Journal Volcanology and Geothermal Research*, pp. 81-110.
- Carrasco-Núñez G., J.W. Vallance, W.I. Rose, (1993), A Voluminous Avalanche-Induced Lahar From Citlaltépetl Volcano, Mexico: Implications For Hazard Assessment, *Journal Volcanology and Geothermal Research*, pp. 35-46.
- Carrasco-Núñez, G. , James W. Vallance, William I. Rose, (1993), A Voluminous Avalanche-Induced Lahar From Citlaltépetl Volcano, Mexico: Implications For Hazard Assessment, *Journal Volcanology and Geothermal Research*, pp. 35-46.
- Carrasco-Núñez, G. , William I. Rose, (1995), Eruption of a Major Holocene Pyroclastic Flow at Citlaltépetl Volcano (Pico de Orizaba), México, 8.5-9.0 ka, *Journal Volcanology and Geothermal Research*, pp. 197-215.
- Carrasco-Núñez G., P. Cervantes, R. Cortés, H. Delgado, R. Molinero, (1995), Patrones De Viento En La Región Del Volcán Popocatépetl Y Ciudad De México, *Volcán Popocatépetl, Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994-1995*, Sistema Nacional de Protección Civil, CENAPRED-UNAM, México, D.F. pp. 295-324.
- Carrasco-Núñez, G.,(1997), Lava Flow Growth Inferred From Morphometric Parameters: A Case Study of Citlaltépetl Volcano, Mexico, *Cambridge Journal*, pp.151-162.
- De la Cruz- Reyna S.,(1993), Random Patterns of Occurrence of Explosive Eruptions at Colima Volcano, Mexico, *Journal Volcanology and Geothermal Research*, pp.51-68.
- De la Cruz-Reyna S. , J.L. Quezada, C. Peña, O. Zepeda, T. Sánchez, (1995), Historia De La Actividad Reciente Del Popocatépetl 1354-1995, *Volcán Popocatépetl, Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994-1995*, CENAPRED-UNAM, México, D.F. pp. 03-22.
- De la Cruz- Reyna S., G. Carrasco-Núñez, (2002), Probabilistic Hazard Analysis of Citlaltépetl (Pico de Orizaba) Volcano, Eastern Mexican Volcanic Belt, *Journal Volcanology and Geothermal Research*, pp. 307-318.
- De la Cruz-Reyna, Servando, and Robert I. Tilling (2007), Scientific and Public Responses to the Ongoing Volcanic Crisis at Popocatépetl Volcano, Mexico: Importance of an Effective Hazards-Warning System. Instituto de Geofísica UNAM.
- Macias J. L., (2005), Geología e Historia Eruptiva de Algunos Grandes Volcanes Activos de México, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, pp. 379-424.
- Macías J.L., G. Carrasco and C. Siebe, (1995), Zonificación de Peligros Volcánicos del Popocatépetl, *Volcán Popocatépetl, Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994-1995*, CENAPRED-UNAM, México, D.F. pp. 79-91.

- Macías J.L., G. Carrasco, H. Delgado, A.L. Martín, C. Siebe, R.P. Hobblitt, M. Sheridan and R.I. Tilling, (1995), Mapa de Peligros del Volcán Popocatepetl. Instituto de Geofísica, CENAPRED, México, D.F.
- Macías J.L., G. Carrasco, H. Delgado, A.L. Martín del P., C. Siebe., R. Hoblitt, M.F. Sheridan, R.I. Tilling, (1995), Mapa De Peligros Del Volcán Popocatepetl, Informe Técnico al Comité Científico del Volcán Popocatepetl, Instituto de Geofísica, CENAPRED, pp. 14.
- Martin-Del Pozzo, A. L., T. González-Morán, R. Espinasa-Pereña, M.A. Butron, M. Reyes, (2008), Characterization of the Recent Ash Emissions at Popocatepetl Volcano, Mexico, *Journal Volcanology and Geothermal Research*, pp. 61-75.
- Martínez-Bringas A., A. Gómez V., S. De la Cruz-Reyna, (2006), Elaboración de mapas de peligros volcánicos, *Guía Básica para la Elaboración de Mapas Estatales de Peligros y Riesgos*, CENAPRED-UNAM, México, D.F. pp.123-161.
- Rodríguez-Elizarrarás, Sergio R.,(1995), Consideraciones Preliminares Sobre Riesgo en el Volcán Colima, México, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 12, No. 1, México, D.F. pp. 47-51.
- Saucedo, R., J.L. Macías, M.F. Sheridan, M.I. Bursik, J.C. Komorowski, (2005), Modeling of Pyroclastic Flows of Colima Volcano, Mexico: Implications for Hazard Assessment, *Journal Volcanology and Geothermal Research*, pp. 103-115.
- Sheridan Michael F., José Luis Macías, (1995), Estimation of Risk Probability for Gravity-Driven Pyroclastic Flows at Volcan Colima, Mexico, *Journal Volcanology and Geothermal Research*, pp. 251-256.
- Sheridan Michael F., Michael C. Malin, (1983), Aplicación de Computer-Assisted Mapping to Volcanic Hazard Evaluation of Surge Eruptions: Vulcano, Lipari and Vesuvius, *Journal Volcanology and Geothermal Research*, pp. 187-202.
- Siebe C., M. Abrams and J.L. Macías, (1995), Derrumbes Gigantes, Depósitos de Avalancha de Escombros y Edad del Actual Cono del Volcán Popocatepetl, *Volcán Popocatepetl, Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994–1995*, CENAPRED-UNAM, México, D.F. pp. 195–220.
- Global Volcanism Program of the Smithsonian Institution, [12/07/2010], [en línea]
URL <http://www.volcano.si.edu/world/volcano.cfm?vnum=1401-09=&volpage=erupt>